

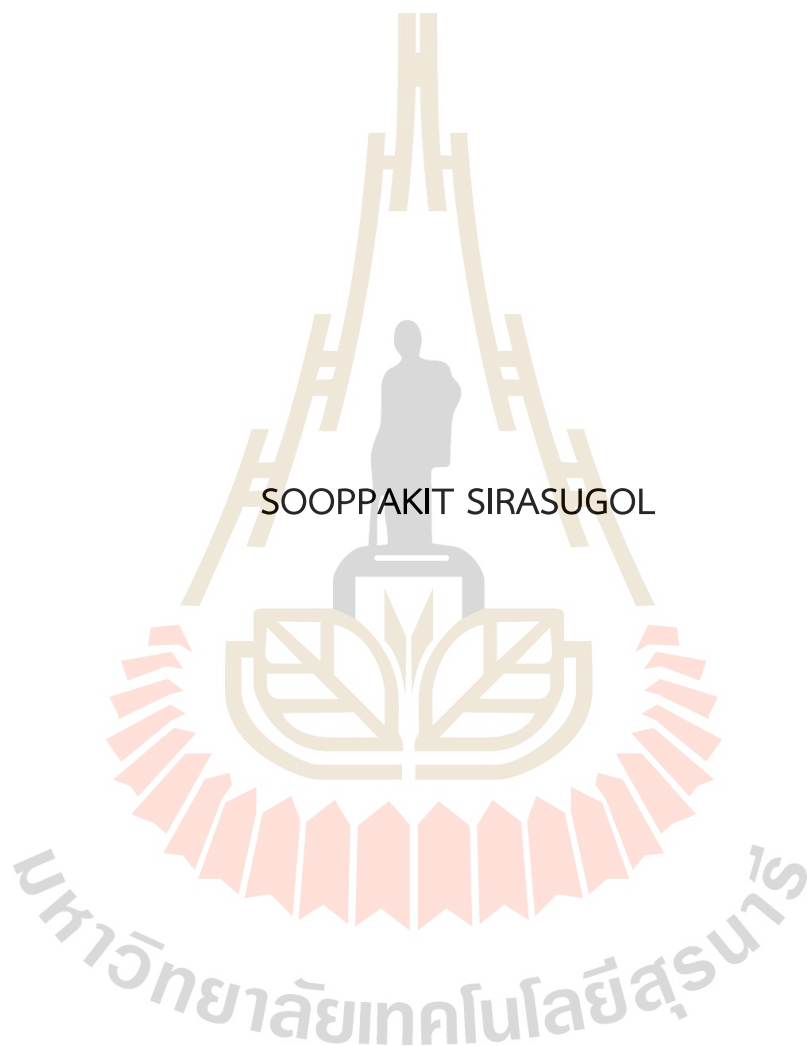
การควบคุมฮีสเตอร์ซิสแบบปรับตัวสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจร
กรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้า



นายศุภกฤต ศิริสุกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2568

ADAPTIVE HYSTERESIS CONTROL FOR COMPENSATING
CURRENT CONTROL OF ACTIVE POWER FILTER IN
ELECTRIC RAILWAY SYSTEMS



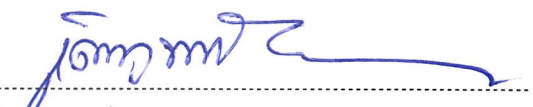
SOOPPAKIT SIRASUGOL

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 2025

การควบคุมฮีสเตอร์ซิสแบบปรับตัวสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยของ
วงจรรอกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(รศ. ดร.เดชา พงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ


(รศ. ดร.กองพล อารีรักษ์)

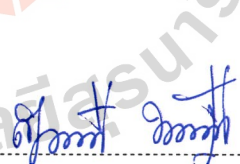
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


(ผศ. ดร.ทศพร ณรงค์ฤทธิ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)


(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

กรรมการ


(ผศ. ดร.สุตารัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ

กรรมการ


(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และประกันคุณภาพ

ศุภกฤต ศิริสุกุล : การควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบปรับตัวสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยของ
วงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้า (ADAPTIVE HYSTERESIS CONTROL FOR
COMPENSATING CURRENT CONTROL OF ACTIVE POWER FILTER IN ELECTRIC
RAILWAY SYSTEMS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารักษ์, 178 หน้า

คำสำคัญ : ระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ/การกำจัดฮาร์โมนิก/วงจรกรองกำลังแอกทีฟ/การตรวจจับ
ฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูรีเยร์/ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส/ตัวควบคุม
พีโอ/พีชชีลอจิก

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแนวทางการพัฒนาตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสสองแถบ (Double Band Hysteresis Current Control: DBHCC) สำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยในกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ส่วนการตรวจจับฮาร์โมนิกเพื่อกำหนดกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูรีเยร์หรือวิธี PQF และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงใช้ตัวควบคุมพีโอจากการศึกษาและทดสอบ พบว่า ตัวควบคุม DBHCC ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์โมนิกที่ไม่ดีในกรณีที่กระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการพัฒนาตัวควบคุม DBHCC โดยกำหนดให้ค่าแถบฮิสเตอร์ซิส (HB) สามารถปรับค่าได้ตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดด้วยการประยุกต์ใช้พีชชีลอจิก ซึ่งจะเรียกตัวควบคุมนี้ว่า ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสสองแถบแบบปรับตัวได้ (Adaptive Double Band Hysteresis Current Control: ADBHCC) การทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมที่พัฒนาขึ้นจะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware-in-the-Loop: HIL) โดยใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP ผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า ตัวควบคุม ADBHCC มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชย ส่งผลให้การกำจัดฮาร์โมนิกในกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (%THD) น้อยกว่า 5% ซึ่งเป็นไปตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2568

ลายมือชื่อนักศึกษา.....ศุภกฤต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ดร.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารักษ์

SOOPPAKIT SIRASUGOL : ADAPTIVE HYSTERESIS CONTROL FOR COMPENSATING
CURRENT CONTROL OF ACTIVE POWER FILTER IN ELECTRIC RAILWAY SYSTEMS
THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPOL AREERAK Ph.D., 178 PP.

Keywords : AC RAILWAY SYSTEMS/ HARMONIC ELIMINATION/ ACTIVE POWER FILTER/
INSTANTANEOUS REACTIVE POWER THEORY COMBINED WITH FOURIER ANALYSIS
/HYSTERESIS CONTROLLER/ PI CONTROLLER/ FUZZY LOGIC CONTROLLER

This thesis presents a development approach for a Double Band Hysteresis Current Control (DBHCC) controller used to control the compensating current of an active power filter for eliminating harmonics in a co-phase AC electric railway system. The objective is to enhance the performance of compensating current control under load current variation conditions. Harmonic detection for calculating the reference currents of the active power filter is based on the instantaneous reactive power theory combined with the Fourier method, or the PQF method. The DC bus voltage control is implemented using a PI controller. From the study and testing results, it was found that the DBHCC controller provides unsatisfactory harmonic elimination performance when the load current varies. To overcome this limitation, this thesis proposes an improved DBHCC controller in which the hysteresis band (HB) is adaptively adjusted according to load current variations using fuzzy logic. This controller is referred to as the Adaptive Double Band Hysteresis Current Control (ADBHCC). The performance of the developed controller is evaluated through Hardware-in-the-Loop (HIL) simulation using Simulink/MATLAB in conjunction with a DSP board. Simulation results demonstrate that the ADBHCC controller achieves effective compensating current control, resulting in improved harmonic elimination under load current variation conditions compared with the DBHCC controller. The percentage of total harmonic distortion (%THD) is less than 5%, complying with IEEE Std. 519-2022.

Student's Signature..... 

School of Electrical Engineering

Advisor's Signature..... 

Academic Year 2025

Co-Advisor's Signature..... 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งในด้านความรู้ทางวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งยังช่วยสละเวลาเพื่อตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนกระทั่งมีความครบถ้วนสมบูรณ์ อีกทั้งยังเป็นแรงผลักดันและเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินในทางดำเนินชีวิตในหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

คณาจารย์ เลขาณุกร และนักศึกษาคณะนิติศึกษาประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาทั้งทางด้านวิชาการ การติดต่อประสานงาน และข้อคิดต่าง ๆ ที่มีผลต่องานวิจัยวิทยานิพนธ์อย่างยิ่งมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และบุคคลที่สำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงครอบครัวทุก ๆ ท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ และการดูแลส่งเสริมทางด้านการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเสมอมา

ศุภกฤต ศิริสุกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.6 การจัดรูปเล่มรายงาน.....	6
2 ปรัชญาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 กล่าวนำ.....	9
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	9
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	13
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	16
2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสขดลวดของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	22
2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	28
2.7 สรุป.....	31
3 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกาลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูริเยร์.....	33

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1	กล่าวนำ.....	34
3.2	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง.....	34
3.3	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูริเยร์.....	35
3.4	การเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างวิธี PQ และวิธี PQF.....	38
3.5	สรุป.....	47
4	การออกแบบวงจรรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุม.....	49
4.1	กล่าวนำ.....	50
4.2	การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	50
4.3	โครงสร้างของวงจรรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบแรงไฟฟ้า กระแสสลับแบบเฟสรวม.....	51
4.4	การออกแบบวงจรรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบแรงไฟฟ้า กระแสสลับแบบเฟสรวม.....	52
4.4.1	การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรอง.....	52
4.4.2	การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี.....	55
4.5	การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	56
4.6	การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	60
4.6.1	การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสแบบหนึ่งแถบ.....	61
4.6.2	การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสแบบสองแถบ.....	65
4.7	การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้า กระแสสลับแบบเฟสรวม.....	70
4.7.1	ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้า กระแสสลับแบบเฟสรวม.....	71
4.7.2	ผลการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชย ด้วยตัวควบคุม SBHCC และตัวควบคุม DBHCC.....	76
4.7.3	ผลการทดสอบสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ.....	80

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.8 สรุป.....	81
5 การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมกรณีกระแสไหลด	
มีการเปลี่ยนแปลง.....	82
5.1 กล่าวนำ.....	82
5.2 การจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม กรณีกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลง.....	82
5.3 สรุป.....	94
6 การออกแบบตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีตสองแถบแบบปรับตัวได้.....	95
6.1 กล่าวนำ.....	95
6.2 ฟัชซีเซต.....	95
6.3 การดำเนินการทางฟัชซีเซต.....	97
6.4 ฟังก์ชันสมาชิก.....	99
6.4.1 การทดสอบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของฟัชซีลอจิก.....	101
6.5 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา.....	104
6.5.1 การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา.....	104
6.6 กฎฟัชซี.....	109
6.6.1 การออกแบบกฎฟัชซี.....	110
6.7 การอนุมานฟัชซี.....	112
6.7.1 การทดสอบการอนุมานฟัชซี.....	122
6.8 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของฟัชซีลอจิก.....	125
6.9 การจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า กระแสสลับแบบเฟสรวม.....	128
6.9.1 ผลการจัดฮาร์มอนิกกรณีใช้การควบคุมกระแสชดเชย ด้วยตัวควบคุม ADBHCC.....	129
6.9.2 การเปรียบเทียบผลการจัดฮาร์มอนิกระหว่างกรณีใช้ ตัวควบคุม DBHCC และ ADBHCC.....	137

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.10 สรุป.....	143
7 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป.....	144
7.1 กล่าวนำ.....	144
7.2 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป.....	144
7.3 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป.....	146
7.3.1 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC.....	147
7.3.2 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปกรณีใช้ตัวควบคุม ADBHCC.....	156
7.3.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูประหว่างกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC และ ADBHCC.....	164
7.4 สรุป.....	169
8 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	170
8.1 สรุป.....	170
8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	173
รายการอ้างอิง.....	174
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	176
ประวัติผู้เขียน.....	178

สารบัญตาราง

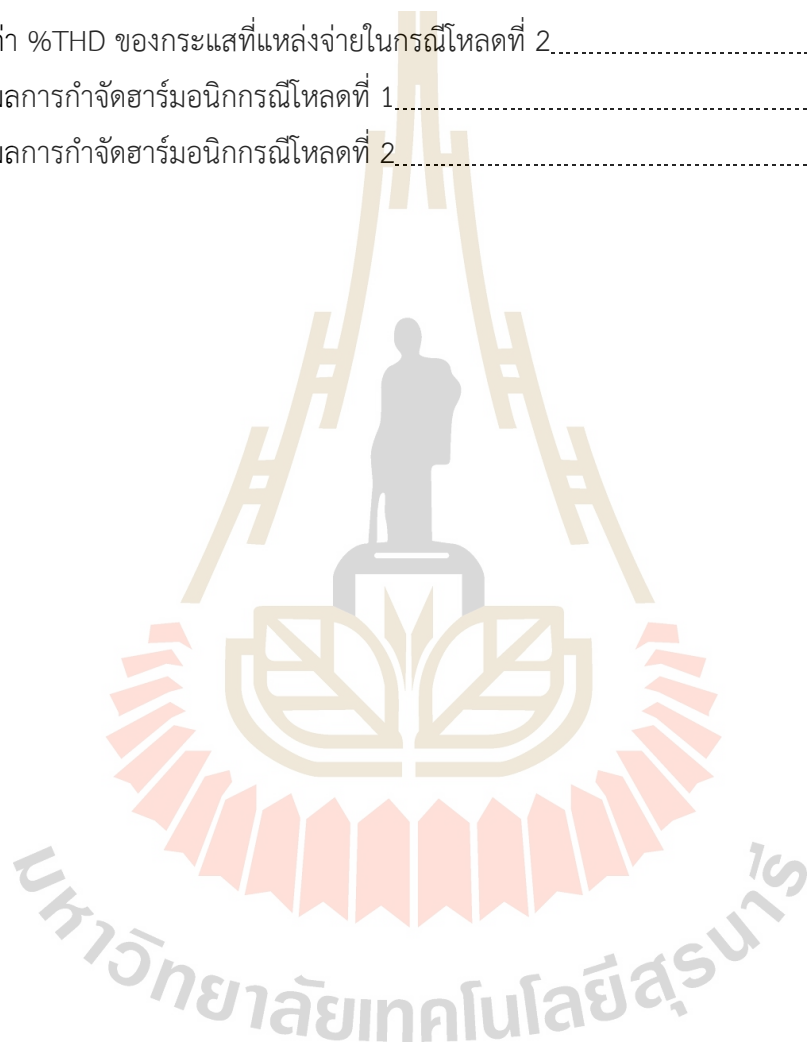
ตารางที่

หน้า

2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ สำหรับระบบไฟฟ้าแบบเฟสรวมและสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ.....	10
2.2	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	13
2.3	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	16
2.4	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	22
2.5	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	28
3.1	องค์ประกอบกระแสมูลฐานและองค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิก ที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าใต้ดิน.....	40
3.2	การเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และ PQF.....	47
4.1	การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC.....	62
4.2	การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC.....	69
4.3	ค่าพารามิเตอร์ของระบบกักจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	72
4.4	ผลการกักจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม.....	79
5.1	ค่าพารามิเตอร์ของระบบกักจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	83
5.2	ผลการกักจัดฮาร์มอนิกในกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง.....	92
5.3	การทดลองปรับเปลี่ยนค่า HB ภายใต้การเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดลดลง 0.5 เท่า.....	93
6.1	ผลการทดสอบเปรียบเทียบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซีลอจิก.....	104
6.2	ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาสำหรับฟัซซีลอจิก ในกรณี 3 ฟังก์ชันสมาชิก.....	107
6.3	ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาสำหรับฟัซซีลอจิก ในกรณี 5 ฟังก์ชันสมาชิก.....	108
6.4	ผลการทดสอบเปรียบเทียบจำนวนฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซีลอจิก.....	109
6.5	ข้อมูลค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร x ไต ๆ สำหรับการทำให้ฟัซซีแบบ BOA.....	117
6.6	การตรวจสอบค่าความเป็นสมาชิก.....	117
6.7	ผลการทดสอบการอนุมานฟัซซี.....	124

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.8	ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายในกรณีโหลดที่ 1.....141
6.9	ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายในกรณีโหลดที่ 2.....142
7.1	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกกรณีโหลดที่ 1.....167
7.2	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกกรณีโหลดที่ 2.....168



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	4
2.1 แผนภาพสรุปผลการสำรวจปรัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
3.1 การกรองปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ.....	35
3.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง.....	35
3.3 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูริเยร์.....	36
3.4 ไดอะแกรมการคำนวณค่า $\bar{p}_L$ ด้วยวิธี SWFA.....	38
3.5 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมสำหรับ ทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก.....	39
3.6 กราฟสเปกตรัมของกำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง.....	41
3.7 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในเฟส T กรณีใช้วิธี PQ.....	43
3.8 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในเฟส M กรณีใช้วิธี PQ.....	43
3.9 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในเฟส T กรณีใช้วิธี PQF.....	44
3.10 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในเฟส M กรณีใช้วิธี PQF.....	44
3.11 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสกรณีใช้วิธี PQ.....	45
3.12 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสกรณีใช้วิธี PQF.....	45
3.13 ผลการกรองปริมาณ $\bar{p}_L$	46
4.1 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	50
4.2 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	52
4.3 กราฟสเปกตรัมขนาดกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ในสภาวะกระแสไหล ของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาออกแบบ.....	54
4.4 ผลรวมปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟที่โหลด.....	55
4.5 แผนภาพแสดงการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงร่วมกับส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิก ด้วยวิธี PQF.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ.....58
4.7	บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ที่เป็นระบบเชิงเส้น.....58
4.8	วงจรรองกำลังแอกทีฟที่มีการควบคุมกระแสชดเชย.....60
4.9	การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC.....63
4.10	ลักษณะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC.....65
4.11	ลักษณะการทำงานของสวิตช์ไอจีบีทีในช่วงแถบฮีสเตอร์ซิสที่หนึ่ง.....66
4.12	ลักษณะการทำงานของสวิตช์ไอจีบีทีในช่วงแถบฮีสเตอร์ซิสที่สอง.....67
4.13	ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้า กระแสสลับแบบเฟสรวม.....71
4.14	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในกรณีใช้ ตัวควบคุม SBHCC สำหรับเฟส T.....72
4.15	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในกรณีใช้ ตัวควบคุม SBHCC สำหรับเฟส M.....73
4.16	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในกรณีใช้ ตัวควบคุม DBHCC สำหรับเฟส T.....73
4.17	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในกรณีใช้ ตัวควบคุม DBHCC สำหรับเฟส M.....74
4.18	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสในกรณีใช้ตัวควบคุม SBHCC.....74
4.19	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสในกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC.....75
4.20	ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC ในเฟส T.....76
4.21	ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC ในเฟส M.....77
4.22	ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ในเฟส T.....77
4.23	ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ในเฟส M.....78
4.24	สัญญาณพัลส์จากตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส.....79
4.25	ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ.....80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1	ระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมกรณีกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลง.....84
5.2	ผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสร่วมภายใต้การเปลี่ยนแปลง กระแสไหลดในกรณีที่ 1.....86
5.3	ผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสร่วมภายใต้การเปลี่ยนแปลง กระแสไหลดในกรณีที่ 2.....87
5.4	ผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสภายใต้การเปลี่ยนแปลง กระแสไหลดในกรณีที่ 1.....89
5.5	ผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสภายใต้การเปลี่ยนแปลง กระแสไหลดในกรณีที่ 2.....90
5.6	ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงภายใต้การเปลี่ยนแปลงกระแสไหลดในกรณีที่ 1.....91
5.7	ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงภายใต้การเปลี่ยนแปลงกระแสไหลดในกรณีที่ 2.....91
6.1	รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของเซตชัดเจน.....96
6.2	รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีเซต.....97
6.3	รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A.....97
6.4	รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกการยูเนียนของฟัซซีเซต A และ B.....98
6.5	รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกการอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และ B.....99
6.6	ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม.....100
6.7	ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู.....100
6.8	ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน.....101
6.9	ฟังก์ชันสมาชิกรูประฆังคว่ำ.....101
6.10	ระบบกำจัดฮาร์โมนิกที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ร่วมกับฟัซซีลอจิก.....102
6.11	รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีลอจิก.....103
6.12	ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ร่วมกับฟัซซีลอจิก.....106
6.13	ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุต กรณี 3 ฟังก์ชันสมาชิก.....107
6.14	ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุต กรณี 5 ฟังก์ชันสมาชิก.....107

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.15	ลักษณะของกระแสชดเชยสำหรับออกแบบกฎฟัซซี ในกรณีใช้ 3 ฟังก์ชันสมาชิก.....110
6.16	ลักษณะของกระแสชดเชยสำหรับออกแบบกฎฟัซซี ในกรณีใช้ 5 ฟังก์ชันสมาชิก.....111
6.17	การทำฟัซซี.....113
6.18	การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด (Maximum-minimum).....114
6.19	การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ผลคูณ (Maximum-product).....114
6.20	การทำดีฟัซซีแบบ COG.....115
6.21	การทำดีฟัซซีแบบ BOA.....116
6.22	การทำดีฟัซซีแบบ SOM.....118
6.23	ผลลัพธ์เอาต์พุตชัดเจนจากการทำดีฟัซซีแบบ SOM.....118
6.24	การทำดีฟัซซีแบบ LOM.....119
6.25	ผลลัพธ์เอาต์พุตชัดเจนจากการทำดีฟัซซีแบบ LOM.....119
6.26	การทำดีฟัซซีแบบ MOM.....120
6.27	ผลลัพธ์เอาต์พุตชัดเจนจากการทำดีฟัซซีแบบ MOM.....120
6.28	ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุต.....121
6.29	วิธีการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno.....121
6.30	ผลลัพธ์เอาต์พุตชัดเจนจากการทำดีฟัซซีแบบ WA.....122
6.31	ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตสำหรับการอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani.....123
6.32	ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตสำหรับการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno.....123
6.33	ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $\%E_{iC,avg} / i_{C,peak}^*$126
6.34	ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต K126
6.35	ค่า $\%E_{iC,avg} / i_{C,peak}^*$ ที่เกิดขึ้นในสถานะกระแสโหลดในสถานะปกติ.....127
6.36	ค่าของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $\%E_{iC,avg} / i_{C,peak}^*$127
6.37	ค่าของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต K128
6.38	ผลการจำลองฮาร์ดมอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมที่ใช้ตัวควบคุม ADBHCC สำหรับกรณีโหลดที่ 1.....132

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.39 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมที่ใช้ตัวควบคุม ADBHCC สำหรับกรณีโหลดที่ 2.....	133
6.40 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่ใช้ตัวควบคุม ADBHCC สำหรับกรณีโหลดที่ 1.....	134
6.41 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่ใช้ตัวควบคุม ADBHCC สำหรับกรณีโหลดที่ 2.....	135
6.42 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงภายใต้การควบคุมกระแสชดเชย ด้วยตัวควบคุม ADBHCC สำหรับกรณีโหลดที่ 1.....	136
6.43 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงภายใต้การควบคุมกระแสชดเชย ด้วยตัวควบคุม ADBHCC สำหรับกรณีโหลดที่ 2.....	136
6.44 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับค่า HB สำหรับกรณีโหลดที่ 1.....	139
6.45 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับค่า HB สำหรับกรณีโหลดที่ 2.....	140
7.1 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป.....	145
7.2 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป.....	147
7.3 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมโดยใช้ตัวควบคุม DBHCC ในกรณีโหลดที่ 1.....	150
7.4 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมโดยใช้ตัวควบคุม DBHCC ในกรณีโหลดที่ 2.....	151
7.5 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสโดยใช้ตัวควบคุม DBHCC ในกรณีโหลดที่ 1.....	153
7.6 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสโดยใช้ตัวควบคุม DBHCC ในกรณีโหลดที่ 1.....	154
7.7 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอร่วมกับการควบคุมกระแส ด้วยตัวควบคุม DBHCC ในกรณีโหลดที่ 1.....	155

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.8 ผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมพีไอร่วมกับการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุม DBHCC ในกรณีโหลดที่ 2.....	155
7.9 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมโดยใช้ตัวควบคุม ADBHCC ในกรณีโหลดที่ 1.....	158
7.10 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมโดยใช้ตัวควบคุม ADBHCC ในกรณีโหลดที่ 2.....	159
7.11 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสโดยตัวควบคุม ADBHCC ในกรณีโหลดที่ 1.....	161
7.12 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสโดยตัวควบคุม ADBHCC ในกรณีโหลดที่ 2.....	162
7.13 ผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมพีไอร่วมกับการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุม ADBHCC ในกรณีโหลดที่ 1.....	163
7.14 ผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงด้วยตัวควบคุมพีไอร่วมกับการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุม ADBHCC ในกรณีโหลดที่ 2.....	163
7.15 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับค่า HB สำหรับกรณีโหลดที่ 1.....	165
7.16 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับค่า HB สำหรับกรณีโหลดที่ 2.....	166

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

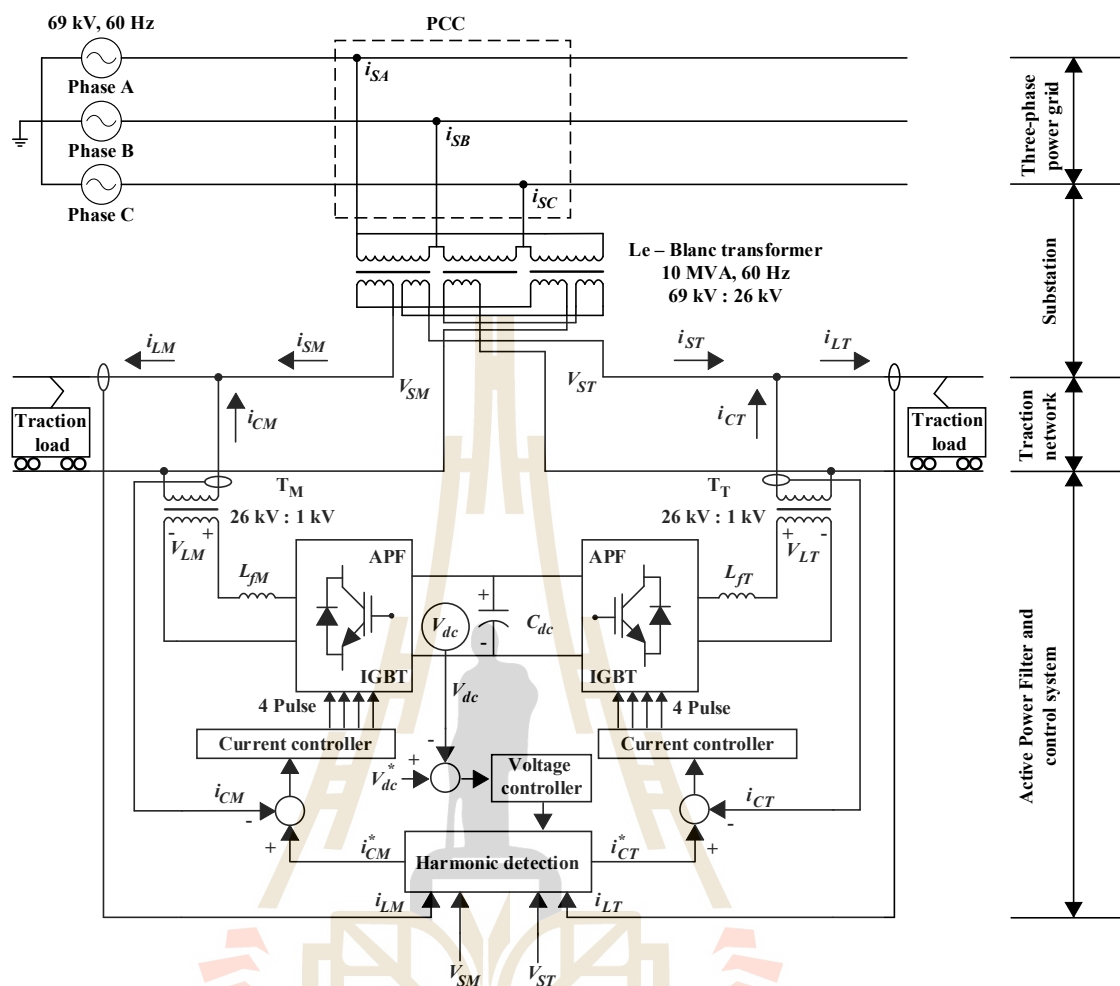
ในปัจจุบันเทคโนโลยีขนส่งทางระบบรางไฟฟ้าได้ถูกพัฒนาและใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งประเภทรถไฟฟ้าความเร็วปานกลางและความเร็วสูง โดยระบบรางไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญ คือระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดของระบบรางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ โหลดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ และโหลดประเภทอื่น ๆ สำหรับการอำนวยความสะดวกภายในรถไฟฟ้ามอเตอร์ เป็นต้น โหลดของระบบรางไฟฟ้าเหล่านี้ล้วนเป็นโหลดประเภทที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น จึงก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกจ่ายเข้าสู่ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นสาเหตุปัญหาทำให้คุณภาพทางไฟฟ้าต่ำและก่อให้เกิดผลกระทบตามมาหลายประการ อาทิเช่น เกิดกำลังงานสูญเสียในสายส่ง กำลังงานสูญเสียที่หม้อแปลงไฟฟ้า เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งส่งต่อการติดต่อสื่อสารในระบบรางไฟฟ้า เกิดความร้อนสูงและเกิดการสั้นที่คาปาซิเตอร์กำลัง (Power capacitor) การทำงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันและอุปกรณ์วัดไฟฟ้ากำลัง เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้าให้หมดไปเพื่อลดผลกระทบและเพิ่มคุณภาพทางไฟฟ้าให้กับระบบรางไฟฟ้า

การกำจัดฮาร์มอนิกที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีหลายวิธี ได้แก่ การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter : PPF) การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟ (Active Power Filter : APF) และการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแบบไฮบริด (Hybrid Power Filter : HPF) ซึ่งเป็นการผสมผสานการทำงานระหว่างวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟและวงจรกรองกำลังพาสซีฟ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธีการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนาน เนื่องจากสามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ดีโดยมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ และไม่ประสบปัญหาเรโซแนนซ์เหมือนกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟ โดยหลังจากนี้จะใช้คำว่า “วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟ” แทนวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟ

แบบขนาน สำหรับระบบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ แสดงได้ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรก คือ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้าโดยจะรับกำลังไฟฟ้าจากระบบกีดทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลังสามเฟส (เฟส ABC) ที่พิกัดแรงดัน 69 kV ความถี่ 60 Hz และแปลงไปเป็นระบบไฟฟ้าแบบเฟสร่วม (Co-phase systems) ที่พิกัดแรงดัน 26 kV ความถี่ 60 Hz โดยใช้หม้อแปลงชนิดเลอบลองก์ (Le-Blanc transformer) สำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากับโหลดรถไฟ (Traction load) ทั้งเฟส M และเฟส T ส่วนที่สอง คือ ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีส่วนประกอบย่อยที่สำคัญสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ในส่วนแรก คือ วงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งมีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสใช้สำหรับฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบรางไฟฟ้าเพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ส่วนที่สอง คือ ระบบควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟซึ่งประกอบด้วยการตรวจจับฮาร์มอนิก (Harmonic detection) ใช้สำหรับคำนวณกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้าสำหรับนำมาใช้เป็นกระแสอ้างอิงในการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อให้มีค่าคงที่สำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส และการควบคุมกระแสชดเชย (i_C) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อให้มีลักษณะรูปสัญญาณที่คล้ายตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิก โดยการควบคุมกระแสชดเชยถือเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของลักษณะกระแสชดเชยที่ฉีดเข้าสู่ระบบรางไฟฟ้า ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันวิธีที่นิยมใช้สำหรับควบคุมกระแสชดเชยมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ การใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) การใช้ตัวควบคุมแบบทำนาย (Predictive controller) การใช้ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก (Fuzzy logic controller) และ การใช้ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis controller) เป็นต้น โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสเนื่องจากสามารถให้สมรรถนะการควบคุมกระแสที่ดี โครงสร้างของตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อน ออกแบบได้ง่าย ให้ผลตอบแทนต่อการควบคุมที่รวดเร็ว และเหมาะสำหรับการนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบดั้งเดิมหนึ่งแถบ (Single Band Hysteresis Current Controller : SBHCC) มีข้อเสียหลัก คือ มีจำนวนครั้งการสวิตช์ที่สูงทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่ตัวอุปกรณ์สวิตช์กำลังภายในวงจรกรองกำลังแอกทีฟสูงตามไปด้วย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวในปี ค.ศ. 2015 Hasan Komurcugil [1] จึงนำเสนอการออกแบบใช้ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบสองแถบ (Double Band Hysteresis Current Control : DBHCC) ซึ่งพบว่าสามารถช่วยลดจำนวนครั้งการสวิตช์ได้ถึงสองเท่าเมื่อเทียบกับตัวควบคุม SBHCC จากข้อดีดังกล่าว ในงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุม DBHCC สำหรับควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา

นอกจากนี้อีกหนึ่งประเด็นปัญหาที่สำคัญที่ควรคำนึงถึง คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่โหลดของระบบรางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงซึ่งประสิทธิภาพดังกล่าวจะขึ้นกับสามองค์ประกอบหลัก ได้แก่ การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ และการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC อย่างไรก็ตาม การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF สามารถคำนวณกระแสอ้างอิงได้แม่นยำแม้ในสภาวะกระแสโหลดเปลี่ยนแปลง และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟใหม่ให้มีความเหมาะสมกับทุกช่วงของการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดนั้นเป็นสิ่งที่ซับซ้อนยากต่อการออกแบบและยากต่อการเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ในทางปฏิบัติ ดังนั้น ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากรณีโหลดของระบบรางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจึงขึ้นอยู่กับตัวควบคุม DBHCC โดยตรง อย่างไรก็ตาม โดยปกติการออกแบบค่าแถบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Band : HB) ของตัวควบคุม DBHCC จะพิจารณาออกแบบให้มีความเหมาะสมกับสภาวะโหลดที่พิจารณาที่กำหนดตามข้อมูลกระแสโหลดที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าได้วัน โดยยังไม่คำนึงถึงกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เมื่อค่ากระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงในบางกรณี พบว่า %THD มีค่าสูงขึ้นเกิน 5% ไม่เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 นำไปสู่สมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกของระบบที่ลดลง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องปรับเปลี่ยนค่าแถบฮิสเทอรีซิสเพื่อประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดี โดยมีค่า %THD น้อยกว่า 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 ซึ่งงานวิจัยในอดีตได้นำเสนอกลไกการปรับค่าแถบฮิสเทอรีซิสโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ อย่างไรก็ตาม แนวทางดังกล่าวมีความซับซ้อนในการนำไปปรับใช้งานจริง ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) สำหรับปรับเปลี่ยนค่าแถบฮิสเทอรีซิสของตัวควบคุม DBHCC โดยอาศัยการกำหนดกฎการควบคุมบนพื้นฐานของความรู้และประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญในระบบแทนการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะช่วยลดความยุ่งยากในการออกแบบ การยืนยันประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าของแนวทางที่พัฒนาดังกล่าวจะดำเนินการโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the Loop) ที่ใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด Digital Signal Processor (DSP) เพื่อแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม DBHCC ที่สามารถปรับค่าแถบฮิสเทอรีซิสได้มีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีและส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกมีประสิทธิภาพที่ดีเป็นตามกรอบมาตรฐานในทุกกรณีของการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 1.1 ระบบกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาคำสั่งความรู้เกี่ยวกับการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

1.2.2 เพื่อศึกษาการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูริเยร์สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

1.2.3 ออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

1.2.4 ออกแบบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

1.2.5 พัฒนาการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสสำหรับวงจรรองกำลัง แยกทีฟในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

1.2.6 สร้างระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบ เฟสรวมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the loop)

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบรางไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกเป็นระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ แบบเฟสรวมของประเทศไต้หวัน (Sy-Ruen Huang and Bing-Nan Chen, 2002) [2] ซึ่งมีพิกัด แรงดันไฟฟ้า 26 kV 60 Hz

1.3.2 โหลดรถไฟในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกจะแทนด้วยแหล่งจ่าย กระแสในอุดมคติซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจริงใน ระบบรางไฟฟ้าของประเทศไต้หวัน (Sy-Ruen Huang and Bing-Nan Chen, 2002) [2]

1.3.3 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม ใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB

1.3.4 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปจะใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด Digital Signal Processor (DSP)

1.3.5 การวัดประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมจะใช้ ค่า %THD ที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling : PCC) ของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสเป็น ตัวชี้วัด

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณากำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ แบบเฟสรวมที่ฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้า

1.4.2 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของระบบรางไฟฟ้าเป็นรูป คลื่นไซน์บริสุทธิ์

1.4.3 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณากระแสโหลดทางด้านระบบไฟฟ้าเฟสรวมมีความสมดุล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

1.5.2 ได้การตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

1.5.3 สามารถออกแบบและได้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

1.5.4 ได้ระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

1.5.5 ได้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

1.5.6 ได้ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

1.5.7 ได้บทความวิจัยสำหรับเผยแพร่ในระดับชาติหรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มรายงาน

โครงร่างงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 8 บท โดยมีการนำเสนอเนื้อหาในแต่ละบทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย รวมถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

บทที่ 3 นำเสนอการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งหรือวิธี PQ และการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูริเยร์ หรือวิธี PQF สำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม รวมถึงนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการ

ตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างวิธี PQ และวิธี PQF ด้วยการจำลองสถานการณ์ภายในโปรแกรม Simulink/MATLAB

บทที่ 4 นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และรายละเอียดการออกแบบระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งประกอบด้วยการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI controller) และการควบคุมกระแสตรงจะนำเสนอเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมกระแสตรงด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์รีซิสแบบดั้งเดิมหนึ่งแถบ (Single Band Hysteresis Current Controller : SBHCC) และการควบคุมกระแสตรงด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์รีซิสแบบสองแถบ (Double Band Hysteresis Current Control : DBHCC) รวมถึงการนำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัด ฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมเพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB

บทที่ 5 นำเสนอการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ออกแบบไว้ในบทที่ 4 ในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

บทที่ 6 นำเสนอการออกแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) สำหรับปรับเปลี่ยนค่าแถบฮิสเตอร์รีซิสของตัวควบคุม DBHCC และนำเสนอทฤษฎีทางฟัซซีลอจิก ได้แก่ ฟัซซีเซต (Fuzzy set) การดำเนินการทางฟัซซีเซต (Fuzzy set operations) ฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) ตัวแปรภาษา (Linguistic variables) และค่าเชิงภาษา (Linguistic value) กฎฟัซซี (Fuzzy rules) และการอนุมาน ฟัซซี (Fuzzy inference) และได้้นำเสนอการทดสอบและออกแบบฟัซซีลอจิกสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวควบคุม DBHCC โดยการทดสอบและการออกแบบโครงสร้างของฟัซซีลอจิกประกอบด้วยการสับรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา พร้อมทั้งทดสอบจำนวนฟังก์ชันสมาชิก การออกแบบกฎฟัซซี การทดสอบวิธีการอนุมานฟัซซี โดยการทดสอบจะมุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกเป็นหลัก นอกจากนี้จะนำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม DBHCC ที่สามารถปรับค่าแถบฮิสเตอร์รีซิสได้โดยใช้ฟัซซีลอจิกที่ได้ออกแบบ

บทที่ 7 นำเสนอการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the Loop : HIL) ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป และการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยเทคนิค

ฮาร์ดแวร์ในรูป เพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ที่สามารถปรับค่าแถบฮิสเตอร์ซิสได้โดยใช้พีซีลอจิกที่ออกแบบไว้ในบทที่ 6 ในลักษณะการทำงานที่มีความใกล้เคียงกับการทำงานในระบบฮาร์ดแวร์จริงมากยิ่งขึ้น

บทที่ 8 สรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเกี่ยวกับการกำจัลดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการวิจัยเกี่ยวกับหัวข้อดังกล่าวอย่างต่อเนื่องดังนั้น ในบทนี้จึงเป็นการเสนอปรัทัศนัวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา และพัฒนาต่อไป โดยการนำเสนอจะแบ่งตามหัวข้อ คือ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจัลดฮาร์โมนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

สิ่งหนึ่งที่ควรคำนึงถึงเพื่อให้ได้ประสิทธิผลที่ดีของการกำจัลดฮาร์โมนิก คือ โครงสร้างของกรองกำลังแอกทีฟต้องมีความเหมาะสมกับระบบที่พิจารณากำจัลดฮาร์โมนิก โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณากำจัลดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมซึ่งประกอบด้วยเฟส T และเฟส M ซึ่งเป็นระบบกำลังไฟฟ้าสองเฟส ส่งผลให้ต้องเลือกใช้โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เหมาะสมกับระบบกำลังไฟฟ้าสองเฟสที่พิจารณากำจัลดฮาร์โมนิก ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ทั้งระบบไฟฟ้าแบบสองเฟสหรือเฟสร่วม (Co-phase Systems) และสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้าแบบเฟสรวมและสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2019	Liu, Hao, et al.	Shunt Isolated Active Power Filter with Common DC Link in Urban Rail Transit System.	นำเสนอโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรถไฟฟ้าภายในเขตเมือง ซึ่งอาศัยการใช้ประโยชน์จากแรงดันบัสไฟตรงร่วมกับระบบรถไฟฟ้าภายในเขตเมือง โดยได้ประยุกต์ใช้หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์กำลังความถี่สูงเพื่อให้เกิดการแยกส่วนทางไฟฟ้า ซึ่งช่วยลดผลกระทบของกระแสหมุนเวียนลำดับศูนย์ (Zero-sequence circulating current)
2021	S.Waosungnern, T.Narongrit and K.Areerak	Design of a Shunt Active Power Filter for Single-Phase Power Systems	นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมที่อาศัยการคำนวณที่ง่ายและไม่ซับซ้อนสำหรับใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส และจากการจำลองสถานการณ์พบว่าสามารถลด %THD จาก 27.9% เป็น 1.856%
2021	Trongjai, Thanan, et al.	The Comparison of Three-Phase and Co-Phase Shunt Active Power Filters for Harmonic Elimination in AC Electric Railway Systems.	นำเสนอการเปรียบเทียบวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ 2 รูปแบบ ได้แก่ สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส และระบบไฟฟ้าแบบเฟสรวม พบว่า รูปแบบสำหรับระบบไฟฟ้าแบบเฟสรวมให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกทางด้านสามเฟสที่ดีกว่า โดยมีค่า %THD ต่ำกว่า อีกทั้งยังลดฮาร์มอนิกได้ทั้งด้านสามเฟสและเฟสรวม ส่งผลให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยรวมดีขึ้น

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้าแบบเฟสรวมและสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	Trongjai, Thanan, et al.	The Comparison of Three-Phase and Co-Phase Shunt Active Power Filters for Harmonic Elimination in AC Electric Railway Systems.	นำเสนอเปรียบเทียบ 2 รูปแบบของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส และรูปแบบที่ 2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้าแบบเฟสรวม จากผลการเปรียบเทียบพบว่ารูปแบบที่ 2 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกทางด้านสามเฟสที่ดีกว่าโดยมี %THD ที่น้อยกว่ารูปแบบที่ 1 นอกจากนี้ ยังช่วยลดฮาร์มอนิกทั้งทางด้านสามเฟส และทางด้านเฟสรวม ส่งผลให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยรวมดีขึ้น
2022	Sattarov, Robert, et al.	Active filters in the power supply of electrified railway applications.	นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยแทนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นโหลดของรถไฟด้วยตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแส และจากการทดลองพบว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกโดยสามารถลด %THD จาก 21.31% เป็น 1.7%

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้าแบบเฟสรวมและสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2024	Popescu, Mihaela, et al.	Shunt Active Power Filters in Three-Phase, Three-Wire Systems: A Topical Review.	นำเสนอวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอินเตอร์ลิตฟซึ่งเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันเชื่อมต่อกัน 2 ชุด และใช้ตัวเก็บประจุร่วมเป็นแหล่งสะสมพลังงานให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชุด รูปแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เสนอช่วยลดขนาดตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองได้ถึง 70% เมื่อเทียบกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบดั้งเดิม
2025	B. Dwinanto, Setiyono, F. Thalib and H. Siswono	Single-phase power shunt active filter design using photovoltaic as reactive power compensator	นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับชดเชยกำลังรีแอกทีฟและกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ โดยผลการจำลองสถานการณ์พบว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ออกแบบมีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก โดยในกรณีโหลดตัวเหนี่ยวนำ %THD ลดลงจาก 37.93% เป็น 0.35% และในกรณีโหลดตัวเก็บประจุลดลงจาก 18.77% เป็น 1.45%

จากการสำรวจผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้สำหรับระบบไฟฟ้าแบบเฟสรวม และสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับดังแสดงในตารางที่ 2.1 พบว่ารูปแบบของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมมี 2 รูปแบบ ได้แก่ วงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส (Three-phase active power filter) และ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้าแบบเฟสรวม (Co-phase active power filter) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้าแบบเฟสรวม เนื่องจากช่วยลดกระแสฮาร์มอนิกได้ทั้งด้านระบบไฟฟ้าแบบเฟสรวม และระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส ส่งผลให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยรวมของระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมดีขึ้น ซึ่งโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้าแบบเฟสรวมที่เลือกใช้มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน 2 ชุดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นแหล่งสะสมพลังงานร่วมกันสำหรับกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแบบเฟสรวมที่ประกอบด้วยเฟส T และเฟส M

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยมีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เลือกใช้ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
1997	Ingram, David ME, and Simon D. Round.	A novel digital hysteresis current controller for an active power filter.	นำเสนอการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยอาศัยการเลือกค่าที่มีขนาดไม่เกินค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f,max}$) ที่ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของกระแสชดเชยมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของกระแสชดเชยอ้างอิง
1998	Thomas, T., Haddad, K., Joos, G., & Jaafari, A.	Design and performance of active power filters.	นำเสนอการออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยเลือกค่าที่มากกว่าค่าตัวเก็บประจุต่ำสุด ($C_{dc,min}$) ที่คำนวณโดยใช้สมการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่โหลด

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2003	Jain, s. K. And Agarwal, p.	Design Simulation and Experimental Investigations, on a Shunt Active Power Filter for Harmonics, and Reactive Power Compensation.	นำเสนอการออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยใช้สมการที่เกี่ยวข้องกับการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟขณะหนึ่ง และนำเสนอการเลือกค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยเลือกใช้ค่าที่อยู่ระหว่างค่ายอดแรงดันที่จุด PCC ถึงสองเท่าของค่ายอดแรงดันที่จุด PCC
2020	Kumaresan, S., and H. Habeebullah Sait.	Design and control of shunt active power filter for power quality improvement of utility powered brushless DC motor drives.	นำเสนอการออกแบบตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) โดยใช้สมการแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ และพิจารณาถึงผลรวมกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ นำเสนอการออกค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) โดยคำนึงผลของตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่มีในระบบ ส่งผลให้ได้ค่าแรงดันบัสไฟตรงอยู่ในช่วง $2\sqrt{2}V_{pcc} < V_{dc} < 4\sqrt{2}V_{pcc}$ และนำเสนอการออกแบบตัวเก็บประจุ (C_{dc}) โดยใช้สมการที่เกี่ยวข้องกับพลังงานของตัวเก็บประจุ
2021	Fallah, Mehdi, et al.	A modified indirect extraction method for a single-phase shunt active power filter with smaller DC-link capacitor size.	นำเสนอการลดขนาดความจุของตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) โดยที่ยังคงสมรรถนะที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟไว้ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนโดยรวม และลดขนาดของพื้นที่ลง นอกจากนี้ ยังช่วยให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟมีความยืดหยุ่นที่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงโหลด

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรองกำลังแอคทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2023	Szromba, Andrzej.	Improving the efficiency of the shunt active power filter acting with the use of the hysteresis current control technique.	นำเสนอประเด็นสำคัญที่ควรพิจารณาในการออกแบบวงจรรองกำลังแอคทีฟ ดังต่อไปนี้ - ตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) : เพื่ออายุการใช้งานที่ยาวนานของตัวเก็บประจุ ควรลดการกระเพื่อม (Ripple) ของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ - แรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) : ควรมีค่ามากกว่าแรงดันที่จุด PCC ($V_{dc} \gg V_{pcc}$) เสมอ ซึ่งช่วยให้วงจรรองกำลังแอคทีฟ ทำงานได้ถูกต้อง และช่วยป้องกันความเสียหายที่เกิดจากแรงดันเกินที่ตัวเก็บประจุได้ - ตัวเหนี่ยวนำวงจรรอง (L_f) : ค่าของตัวเหนี่ยวนำที่เลือกใช้ส่งผลโดยตรงต่อการกระเพื่อมของกระแสซัดเซยและช่วงเวลาของการตอบสนองของวงจรรองกำลังแอคทีฟ
2025	Baria, Derradji, et al.	An optimized shunt active power filter using the golden Jackal optimizer for power quality improvement	นำเสนอการออกแบบวงจรรองกำลังแอคทีฟแบบขนานโดยใช้อัลกอริธึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยเปรียบเทียบอัลกอริธึม 4 วิธีได้แก่ Grey Wolf Optimizer, Sine Cosine Algorithm, Particle Swarm Optimization และ Golden Jackal Optimizer ผลการจำลองสถานการณ์พบว่าวิธี Golden Jackal Optimizer มีสมรรถนะที่ดีในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยสามารถลดค่า %THD ลดลงจาก 14.64% เป็น 0.8%

จากการสำรวจผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟในตารางที่ 2.2 พบว่า การออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟประกอบด้วยค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรอก (L_f) ตัวเก็บประจุคิตซี (C_{dc}) และแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ซึ่งมีวิธีการออกแบบที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้าได้ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกออกแบบให้ค่า V_{dc} ที่มีค่ามากกว่าค่ายอดแรงดันที่จุด PCC ค่า C_{dc} เลือกใช้ค่าที่มากกว่าค่าตัวเก็บประจุต่ำสุด ($C_{dc,min}$) ที่คำนวณโดยใช้สมการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่โหลด และค่า L_f เลือกใช้ค่าที่มีขนาดไม่เกินค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f,max}$) ที่ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของกระแสชดเชยมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของกระแสชดเชยอ้างอิง ทั้งนี้เพื่อให้วงจรรอกำลังแอกทีฟมีประสิทธิภาพที่ดีในการฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิก

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกำลังแอกทีฟ

การตรวจจับฮาร์มอนิกถือเป็นส่วนสำคัญที่สุดในกระบวนการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟ โดยประสิทธิภาพของการกำจัดฮาร์มอนิกจะขึ้นกับความแม่นยำของวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่เลือกใช้ ดังนั้น วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกที่เลือกใช้จึงมีความสำคัญ ซึ่งตารางที่ 2.3 นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกำลังแอกทีฟเพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาต่อไป

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกำลังแอกทีฟ

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
1984	Akagi H., Kanazawa Y., and Nabae A.	Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power theory หรือ PQ) และแสดงขั้นตอนสำหรับคำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟและค่ากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยให้กับวงจรรอกำลังแอกทีฟ โดยพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
1988	Takeda M., Ikeda K., Teramoto A., and Aritsuka T.	Harmonic current and reactive power compensation with an active filter	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีแกน หมุนดีคิว (DQ-axis) หรือเรียกว่าวิธี DQ โดย วิธีดังกล่าวจะคำนวณค่ากระแสอ้างอิงที่ สามารถชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับวงจร กรองกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้ากำลัง สามเฟสสมดุล
2002	Newman, Michael John, Daniel Nahum Zmood, and Donald Grahame Holmes.	Stationary frame harmonic reference generation for active filter systems.	นำเสนอการพัฒนาวิธีการตรวจจับ ฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงแกนหยุดนิ่ง (Stationary Reference Frame : StatRF) เพื่อใช้เป็นทางเลือกแทนวิธีกรอบอ้างอิง ซิงโครนัส (Synchronous reference frame : SRF) โดยจากผลการทดลอง พบว่า วิธี StatRF แสดงการทำงานที่รวดเร็ว และเรียบ ง่ายกว่าเมื่อใช้งานร่วมกับการประมวลผล สัญญาณแบบดิจิทัล
2013	Monfared, Mohammad, Saeed Golestan, and Josep M. Guerrero.	A new synchronous reference frame- based method for single-phase shunt active power filters.	เสนอการพัฒนาการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วย วิธี SRF ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดย แสดงข้อดีของวิธีที่นำเสนอ คือ ความซับซ้อน ของการคำนวณที่ลดลง เพิ่มเสถียรภาพของ ระบบ และประสิทธิภาพของการตอบสนองใน สภาวะชั่วคราว และปรับปรุงการชดเชยกำลัง รีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	Tiyarachakun, S., Areerak, K.N., and Areerak, K.L.	Instantaneous power theory with Fourier and optimal predictive controller design for shunt active power filter.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ร่วมกับการวิเคราะห์ฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis : SWFA) หรือเรียกว่าวิธี PQF ในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล และไม่สมดุล โดยจากผลการทดลองพบว่าวิธี PQF สามารถให้ประสิทธิภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี PQ แบบดั้งเดิม
2018	Narongrit, T., Santiprapan, P., and Janpong, S.	A synchronous detection with fourier analysis for single-phase shunt active power filters.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SD ร่วมกับการวิเคราะห์ฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis : SWFA) หรือเรียกว่าวิธี SDF ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยจากผลการทดลองพบว่าวิธี SDF สามารถให้ประสิทธิภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี SD แบบดั้งเดิม
2021	Chen, Dongdong and et al.	A harmonics detection method based on triangle orthogonal principle for shunt active power filter	นำเสนอวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย โดยใช้หลักการทแยงมุมตั้งฉากของฟังก์ชันตรีโกณมิติ (Triangle Orthogonal Principle) ซึ่งอาศัยสมบัติทางคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันที่ตั้งฉากกัน ในการแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิก ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับวิธี SRF แสดงให้เห็นว่าวิธีที่เสนอมีโครงสร้างที่เรียบง่ายกว่า ใช้ทรัพยากรในการประมวลผลน้อยกว่า และมีเวลาในการประมวลผลสั้นกว่า

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2023	Tao, Zongguo, et al.	Harmonic detection of active power filter based on improved gray wolf algorithm with optimized VMD.	นำเสนอเทคนิค Grey Wolf เพื่อค้นหาและปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยการแยกโหมดเชิงแปรผัน (Variational Mode Decomposition : VMD) โดยพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟส ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีที่เสนอช่วยลด %THD จากเดิมที่ 31.04% เป็น 3.88%
2023	Barik, Prasanta Kumar, et al.	A novel negative feedback phase locked loop-based reference current generation technique for shunt active power filter.	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคกรอบอ้างอิงซิงโครนัสที่ใช้เฟสล็อกแบบป้อนกลับเชิงลบ (Negative Feedback Phase-locked Loop : NFPLL) ซึ่งปรับปรุงความสามารถในการกรองสัญญาณลำดับเฟสบวกภายใต้เงื่อนไขสัญญาณจากระบบกริดเกิดการรบกวนอย่างรุนแรง ผลการทดลองแสดงประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีเมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2023	S.Waosungnern, T. Narongrit and K. Areerak	Improvement of Harmonic Detection Using SDF for Shunt Active Power Filter in Single-phase Power Systems	นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการตรวจจับ ฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์เอสดี (SDF) ร่วมกับวิธีการตรวจจับแรงดันลำดับ เฟสบวกมูลฐาน (PSVD) เพื่อเพิ่มความ ถูกต้องในการตรวจจับฮาร์มอนิกในกรณีที่ แรงดันจากแหล่งจ่ายมีความเพี้ยนของ รูปคลื่นผลการจำลองสถานการณ์การกำจัด ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส แสดงให้เห็นว่าวิธีที่เสนอมีสมรรถนะที่ดีใน การตรวจจับฮาร์มอนิก โดยให้ค่า %THD ภายหลังการกำจัดฮาร์มอนิกน้อยกว่าวิธี SD และ SDF แบบดั้งเดิม
2025	Liu, Yikai, et al.	A frequency shifting and filtering algorithm for online harmonic detection in active power filters	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบ ไฟฟ้าสามเฟสด้วยอัลกอริทึมการเลื่อน ความถี่และกรองสัญญาณ (Frequency Shifting and Filtering: FSF) ร่วมกับตัว กรองผ่านต่ำและตัวกรองค่าเฉลี่ยแบบวนซ้ำ โดยสามารถแยกฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับได้ อย่างแม่นยำและมีการตอบสนองที่รวดเร็ว ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิก แสดงประสิทธิภาพที่ดีซึ่งมีค่า %THD ลดลง จาก 14.73% เหลือ 1.80%

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2025	Faruk J. Sayyad, Professor Shivaji S. Bhosale	AI-Enhanced Shunt Active Power Filters for Minimizing Harmonics in Microgrid System	นำเสนอแนวทางการพัฒนางจรกรองกำลัง แอกทีฟโดยประยุกต์ใช้เทคนิค Machine Learning เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการ ตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยเฉพาะในสภาวะที่โหลดและแหล่ง พลังงานหมุนเวียนมีการเปลี่ยนแปลงอย่าง รวดเร็ว โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks) ในการวิเคราะห์ คลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันเพื่อ ตรวจจับฮาร์มอนิกได้อย่างแม่นยำแบบ เรียลไทม์ ผลลัพธ์จากการจำลอง สถานการณ์แสดงให้เห็นว่าสามารถลด %THD ได้ดีกว่าวิธีควบคุมแบบดั้งเดิม

จากตารางที่ 2.3 แสดงผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้
งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ พบว่า วิธีที่ให้ผลดีและเป็นที่ยอมรับมาจนถึงปัจจุบัน ได้แก่ วิธีทฤษฎี
กำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (PQ) วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (SRF) หรือวิธีแกนหมุนดีคิว (DQ) วิธีตรวจจับ
ซิงโครนัส (SD) และวิธีกรอบอ้างอิงแกนหยุดนิ่ง (StatRF) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้วิธี
ทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (PQ) เนื่องจากมีการคำนวณที่ง่ายไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพในการ
ตรวจจับฮาร์มอนิกที่เพียงพอต่อระบบ อีกทั้งยังสามารถคำนวณกำลังรีแอกทีฟเพื่อชดเชย หรือการ
ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor : PF) ให้กับระบบไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ยังมีความ
เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก อย่างไรก็ตาม
ข้อเสียของวิธี PQ คือ การใช้วงจรกรอง (Filter) สำหรับการแยกปริมาณฮาร์มอนิก ซึ่งหากออกแบบ
หรือเลือกใช้วงจรกรองที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกได้ โดยจากการ
สำรวจพบว่าวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (SWFA) ให้สมรรถนะการแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่
ดีกว่าการใช้วงจรกรอง ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธีการผสมผสานระหว่างวิธี PQ
ร่วมกับวิธี SWFA เพื่อสมรรถนะการตรวจจับ ฮาร์มอนิกที่ดียิ่งขึ้นสำหรับระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา

2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลัง แยกทีฟ

การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแยกทีฟมีวัตถุประสงค์เพื่อให้กระแสชดเชยที่ฉีดเข้าสู่ระบบรางไฟฟ้ามีลักษณะรูปสัญญาณที่คล้ายตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก โดยการควบคุมกระแสชดเชยถือเป็นอีกส่วนที่สำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของลักษณะกระแสชดเชยที่ฉีดเข้าสู่ระบบรางไฟฟ้า ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่เสนอเกี่ยวกับวิธีการควบคุมกระแสชดเชยไว้อย่างแพร่หลาย ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลัง แยกทีฟด้วยวิธีต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแยกทีฟ

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
1990	Bose, Bimal K.	An Adaptive Hysteresis-Band Current Control Technique of a Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System	นำเสนอการปรับตัวได้ของแถบฮิสเตอร์ซิสสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส (Adaptive Hysteresis controller) ทำได้โดยปรับเปลี่ยนค่าแถบฮิสเตอร์ซิสตามการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ เป็นกระบวนการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบดั้งเดิม ช่วยให้ค่าความถี่สวิตช์มีค่าคงที่
2004	Hamadi, Abdelhamid, et al.	Indirect current control techniques of three phase APF using fuzzy logic and proportional integral controller: comparative analysis.	นำเสนอการทดสอบเปรียบเทียบตัวควบคุมกระแสชดเชย 2 วิธี ได้แก่ ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) และตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic controller) โดยจากผลการทดสอบพบว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดี โดยให้ผลค่า %THD ภายหลังการชดเชยที่ต่ำกว่ากรณีใช้ตัวควบคุมพีไอ นอกจากนี้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกยังมีการตอบสนองที่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงโหลด

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Qiu, Hong, et al.	A direct current control of shunt active power filter.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยพิจารณาแบบจำลองไฟฟ้าสามเฟส ผลการจำลองสถานการณ์บน PSCAD/EMTDC พบว่าวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดี
2010	Mansour Mohseni, Syed M. Islam	A New Vector-Based Hysteresis Current Control Scheme for Three-Phase PWM Voltage-Source Inverters	นำเสนอการควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันโดยใช้ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบหลายระดับร่วมกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีที่เสนอช่วยลดความถี่สวิตช์ได้
2015	Hasan Komurcugil	Double-band hysteresis current-controlled single-phase shunt active filter for switching frequency mitigation	นำเสนอตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบสองแถบ (Double Band Hysteresis Current Control : DBHCC) สำหรับควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความถี่สวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์กำลังลดลงเมื่อเทียบกับตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบดั้งเดิม

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2016	A. Fereidouni, M. A. S. Masoum and K. M. Smedley	Supervisory Nearly Constant Frequency Hysteresis Current Control for Active Power Filter Applications in Stationary Reference Frame	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสด้วยวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ร่วมกับวิธีการปรับตัวได้ของแถบฮิสเตอร์ซิสของตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส (Constant Frequency Space-Vector Hysteresis-Band Current Control : CF-SVHCC) โดยเสนอการทดสอบเปรียบเทียบวิธี CF-SVHCC กับวิธีการปรับตัวได้ของแถบฮิสเตอร์ซิสของตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบดั้งเดิม และวิธีการปรับตัวได้ของแถบฮิสเตอร์ซิสของตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสที่ได้รับการปรับปรุง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธี CF-SVHCC ช่วยลด และคงค่าความถี่สวิตช์ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับอีก 2 วิธี และยังแสดงสมรรถนะการควบคุมที่ดีในสภาวะคงตัวและสภาวะทางพลวัตที่เกิดขึ้นกับระบบ
2017	Rameshkumar, K., et al.	Model predictive current control of single-phase shunt active power filter.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยด้วยโมเดลตัวควบคุมกระแสแบบทำนาย (Model Predictive Current Control : MPCC) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมกระแสแบบทำนายช่วยให้วงจรรอกำลังแอกทีฟสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว และแม่นยำ นอกจากนี้ยังแสดงประสิทธิภาพที่ดีของการกำจัดฮาร์โมนิกโดยพิจารณาในระบบกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	Hien, Phan Thanh, Dang Van Huyen, and Nguyen Duy Cuong.	Harmonic elimination based on fuzzy logic in combination with hysteresis control algorithm.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยวิธีการปรับตัวได้ของแถบฮิสเตอร์ซิสของตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส โดยใช้ฟuzzyลอจิก โดยพิจารณาการจัดฮาร์โมนิกในระบบกำลังไฟฟ้าสามเฟส ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถลด %THD จาก 29.9% เหลือเพียง 1.54% นอกจากนี้วิธีดังกล่าวยังช่วยลดความถี่สวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์กำลังจาก 500 kHz เหลือเพียง 60 kHz ซึ่งช่วยลดกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นกับตัวอุปกรณ์สวิตช์กำลังได้
2022	Misra, Banishree, et al.	Performance analysis of an adaptive hysteresis band current controller based active power filter.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยวิธีการปรับตัวได้ของแถบฮิสเตอร์ซิสของตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส โดยใช้สมการโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบ วิธีการที่เสนอช่วยให้ความถี่สวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์กำลังมีค่าคงที่ และการทดสอบสมรรถนะของวิธีการที่เสนอมิพิจารณาในระบบกำลังไฟฟ้าสามเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด ผลการทดสอบพบว่าวิธีการที่เสนอมีผลตอบสนองที่ดีต่อการเปลี่ยนแปลงโหลด และให้ประสิทธิภาพการจัดฮาร์โมนิกที่ดีโดย %THD มีค่าน้อยกว่า 5%

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2023	Sozanski, Krzysztof, and Pawel Szczesniak.	Advanced Control Algorithm for Three-Phase Shunt Active Power Filter Using Sliding DFT.	นำเสนออัลกอริทึมการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามเฟส โดยใช้วิธีการสลับกันของการแปลงฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่องแบบเลื่อน (Switching sliding discrete Fourier transform : SSDFT) ซึ่งเป็นวิธีที่แก้ปัญหาค่าความผิดพลาดสะสมเชิงตัวเลขที่เกิดขึ้นกับวิธีการแบบดั้งเดิม และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวิธี SSDFT ช่วยลดความผิดพลาดสะสมเชิงตัวเลข ส่งผลให้เกิดความถูกต้องในการตรวจจับฮาร์มอนิก และการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
2024	Agata Bielecka	Advanced Control Algorithm for Shunt Active Power Filter: Enhancing Power Quality in Autonomous Grids	นำเสนอการพัฒนาตัวควบคุมกระแสแบบทำนายสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัตโนมัติ โดยเน้นการใช้ข้อมูลกระแสที่แหล่งจ่ายแทนการพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความสามารถในการปรับตัวต่อสถานะโหลดที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าวิธีที่เสนอสามารถลดค่า %THD จาก 21.33% เหลือเพียง 0.93%

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2025	Gao, Yifei, et al.	Active power filter control strategy based on repetitive quasi-proportional resonant control with linear active disturbance rejection control.	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ โดยใช้ตัวควบคุมแบบ Repetitive Quasi-Proportional Resonant (QPR) ร่วมกับ Linear Active Disturbance Rejection Control (LADRC) เพื่อแก้ปัญหาความผิดพลาดในสถานะคงตัวที่พบในตัวควบคุมพีโอแบบดั้งเดิม โดยผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า วิธีที่เสนอสามารถลดค่า %THD จาก 17.76% เหลือเพียง 1.64% ในขณะที่การใช้ตัวควบคุมพีโอลดค่า %THD ได้เพียง 3.48%

จากผลการสำรวจผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟดังแสดงในตารางที่ 2.4 พบว่า มีหลายวิธีที่นิยมใช้ควบคุมกระแสชดเชย ได้แก่ การใช้ตัวควบคุมพีโอ (PI Controller) การใช้ตัวควบคุมแบบทำนาย (Predictive Controller) การใช้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic Controller) การใช้ตัวควบคุมฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Controller) เป็นต้น โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้และพัฒนาตัวควบคุมฮิสเทอรีซิสเนื่องจากสามารถให้สมรรถนะการควบคุมกระแสที่ดี มีโครงสร้างของตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อน ออกแบบได้ง่าย ให้ผลตอบสนองต่อการควบคุมที่รวดเร็ว และเหมาะสำหรับการนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากตัวควบคุมฮิสเทอรีซิสแบบดั้งเดิมหนึ่งแถบ (Single Band Hysteresis Current Controller : SBHCC) มีข้อเสียหลัก คือ มีจำนวนครั้งการสวิตช์ที่สูงนำไปสู่การเกิดกำลังงานสูญเสียที่ตัวอุปกรณ์สวิตช์กำลังที่ใช้สร้างวงจรรองกำลังแอกทีฟสูงตามไปด้วย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวในปี ค.ศ. 2015 Hasan Komurcugil ได้นำเสนอการพัฒนาออกแบบใช้ตัวควบคุมฮิสเทอรีซิสแบบสองแถบ (Double Band Hysteresis Current Control : DBHCC) ซึ่งพบว่าสามารถช่วยลดจำนวนครั้งการสวิตช์ได้ถึงสองเท่าเมื่อเทียบกับการควบคุมด้วยวิธีฮิสเทอรีซิสแบบดั้งเดิม ด้วยข้อดีดังกล่าว ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้ตัวควบคุมฮิสเทอรีซิสแบบสองแถบสำหรับควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับที่พิจารณา

2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟจะมีสมรรถนะการทำงานที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกมีความจำเป็นต้องควบคุมระดับแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจร (C_{dc}) ให้มีค่าคงที่ตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2010	Colak, Ilhami, et al.	DC bus voltage regulation of an active power filter using a fuzzy logic controller.	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิก โดยจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสามารถคงค่าแรงดันบัสไฟตรงได้ดี และอาศัยการออกแบบที่ไม่ซับซ้อนเนื่องจากไม่ต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบ
2012	Xi, Zi-qiang, et al.	Research on DC-side voltage fuzzy control method of shunt active power filter.	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยผสมผสานตัวควบคุมฟัซซีลอจิก และตัวควบคุมพีไอ ซึ่งอาศัยการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอโดยอาศัยตัวควบคุมฟัซซีลอจิก และจากผลการทดสอบตัวควบคุมที่เสนอสามารถลดการเกิดการพุ่งเกิน (Overshoot) ของแรงดันบัสไฟตรง

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2015	Benchouia, M. T., et al.	Implementation of adaptive fuzzy logic and PI controllers to regulate the DC bus voltage of shunt active power filter.	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง 2 วิธี คือ ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก และตัวควบคุมพีไอ จากผลการทดสอบพบว่า ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกมีประสิทธิภาพในการรักษาระดับแรงดันให้คงที่มากกว่าเมื่อเทียบกับตัวควบคุมพีไอ และให้ประสิทธิผลการควบคุมที่ดีในสภาวะการตอบสนองแบบชั่วครู่
2015	Wang, Chao, Xiju Zong, and Xingong Cheng.	Control DC bus voltage of active power filter with a novel PID control.	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอดี (PID controller) โดยมุ่งเน้นแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม คือ การเกิดการพุ่งเกินที่สูง และเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่ามาก นอกจากนี้ ผลการทดสอบยืนยันว่า ตัวควบคุมที่เสนอมีประสิทธิผลที่ดีในการคงค่าแรงดันบัสไฟตรง และการตอบสนองที่รวดเร็วในสภาวะชั่วครู่
2019	Janpong, Sarawut, et al.	DC-bus voltage control for single-phase active power filter using neural network.	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงโดยใช้ตัวควบคุม ADALINE Neural networks สำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมที่เสนอให้ประสิทธิผลที่ดีในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงและแสดงผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ที่ดีโดยไม่เกิดการสั่นไหว

ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	Hadi, Ayad Mahmood, Ekhlal M. Thajeel, and Ali K. Nahar.	A novel optimizing PI control of shunt active power filter for power quality enhancement.	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจร รอกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ร่วมกับอัลกอริทึม Lévy flight distribution เพื่อค้นหาค่าเกน K_p และเกน K_i ที่มีความ เหมาะสมที่สุด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดัน บัลไฟตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2023	Deffaf, Brahim, et al.	Synergetic control for three-level voltage source inverter-based shunt active power filter to improve power quality.	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงโดยใช้ตัว ควบคุมไฮเนอโรเจติก (Synergetic Controller : SC) ซึ่งพิจารณาระบบกำลังไฟฟ้าสามเฟสที่มี โหลดเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสเชื่อมต่อกับ โหลด 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 ตัวต้านทาน อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ และรูปแบบที่ 2 ตัว ต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุ โดยผลการ ทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมดังกล่าว สามารถรักษาระดับแรงดันบัลไฟตรงได้ทั้ง 2 รูปแบบโหลดที่แตกต่างกัน

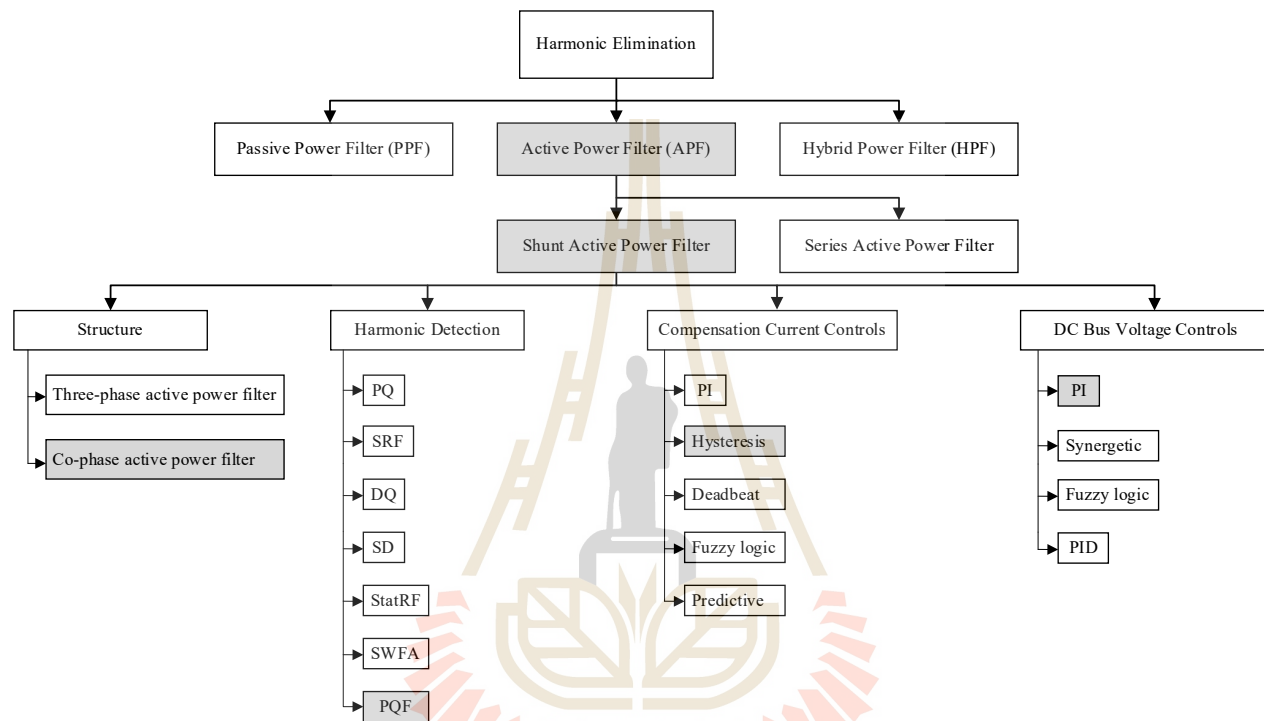
ตารางที่ 2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่พิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	ชื่อบทความ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2024	N. Madhuri and MS. Kalavathi	Fault-tolerant shunt active power filter with synchronous reference frame control and self- tuning filter.	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจร รอกกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุม พีไอ ซึ่งอาศัยการปรับค่าพารามิเตอร์โดยใช้ โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) เพื่อการควบคุมที่เหมาะสม ภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของระบบ จาก ผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า ระบบที่ใช้ตัว ควบคุมพีไอร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม สามารถค่า %THD จากเดิมเท่ากับ 27.62% เหลือเพียง 3.09% ในขณะที่การควบคุมด้วย ตัวควบคุม PI เพียงอย่างเดียวลดค่า %THD เท่ากับ 8.54% ซึ่งไม่เป็นไปตามกรอบ มาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

จากผลการสำรวจผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลัง
แอกทีฟดังแสดงในตารางที่ 2.5 พบว่า ปัจจุบันมีแนวโน้มการนำตัวควบคุมพีซีลอจิก และเทคโนโลยี
ปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์
นี้จะเลือกใช้ตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม เนื่องจากมีสมรรถนะเพียงพอสำหรับการควบคุมแรงดันบัล
ไฟตรงในระบบที่พิจารณา นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนทำให้ง่ายต่อการออกแบบและการใช้
งานจริง

2.7 สรุป

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 นี้เกี่ยวข้องกับระบบการ
กำจัด ฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยสามารถแสดงแผนภาพสรุปผลการสำรวจได้ดังรูป
ที่ 2.1 ซึ่งทุกผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในบทนี้ล้วนเป็นประโยชน์ที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัย สำหรับ
ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และพัฒนาต่อยอดเพื่อให้เกิดประโยชน์ และได้ประสิทธิผลในการกำจัด
ฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมที่พิจารณาให้ดียิ่งขึ้น



PQ : Instantaneous reactive power theory

PI : Proportional Integral

SRF : Synchronous reference frame

PID : Proportional Integral Derivative

DQ : DQ-axis

PQF : Instantaneous reactive power theory with Fourier

SD : Synchronous Detection

StatRF : Stationary Reference Frame

SWFA : Sliding Window with Fourier Analysis

รูปที่ 2.1 แผนภาพสรุปผลการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูริเยร์

3.1 กล่าวนำ

การตรวจจับฮาร์มอนิกใช้สำหรับคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้าและนำมาใช้เป็นกระแสอ้างอิงในการชดเชยของวงจรกรองกำลังรีแอกทีฟ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูริเยร์ หรือวิธี PQF ซึ่งเป็นวิธีการผสมผสานระหว่างวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (Instantaneous reactive power theory) หรือเรียกว่าวิธี PQ (Akagi, Kanazawa, and Nabae, 1984) [3] ร่วมกับการใช้หลักการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดวเลื่อน (Sliding Window with Fourier Analysis : SWFA) (El-Habrouk, and Darwish, 2001) [4] โดยวิธี PQF ได้รวมข้อดีของวิธี PQ และวิธี SWFA เข้าด้วยกัน ส่งผลให้วิธี PQF มีความถูกต้อง และแม่นยำในการตรวจจับฮาร์มอนิกมากขึ้น และสามารถชดเชยกำลังรีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้ด้วย สำหรับเนื้อหาที่จะนำเสนอในบทนี้ประกอบด้วย การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูริเยร์ และการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าระหว่างวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง และวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูริเยร์ ซึ่งแสดงรายละเอียดในแต่ละหัวข้อได้ดังนี้

3.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง หรือวิธี PQ [3] สำหรับระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวมซึ่งเป็นระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส สามารถแบ่งการคำนวณได้ 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 แปลงแรงดันที่แหล่งจ่าย (v_s) และกระแสทางด้านโหลด (i_L) เป็นปริมาณบนแกน $\alpha\beta$ โดยเนื่องจากระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวมประกอบด้วยเฟส T และเฟส M ที่มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่งตรงกับมุมเฟสของปริมาณบนแกน α และ β ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงกำหนดให้แรงดันไฟฟ้า

ที่แหล่งจ่ายของเฟส T และ M (v_{ST}, v_{SM}) เป็นปริมาณแรงดันบนแกน α และ β ($v_{S\alpha}, v_{S\beta}$) ดังแสดงในสมการที่ (3.1) และกำหนดให้กระแสทางด้านโหลดของเฟส T และ M (i_{LT}, i_{LM}) เป็นปริมาณกระแสบนแกน α และ β ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$) ดังแสดงในสมการที่ (3.2)

$$\begin{bmatrix} v_{S\alpha} \\ v_{S\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ST} \\ v_{SM} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{LT} \\ i_{LM} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง (p_L) และค่ากำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (q_L) ด้วยสมการที่ (3.3)

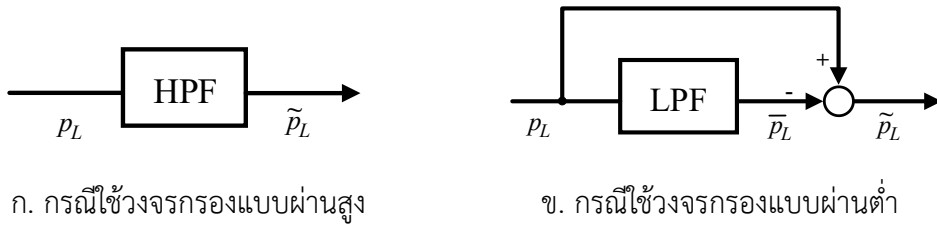
$$\begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{S\alpha} & v_{S\beta} \\ -v_{S\beta} & v_{S\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3) ค่า p_L และ q_L ประกอบด้วยปริมาณมูลฐาน ($\bar{p}_L$ และ $\bar{q}_L$) และปริมาณฮาร์มอนิก ($\tilde{p}_L$ และ $\tilde{q}_L$) ดังแสดงในสมการที่ (3.4) และ (3.5) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ปริมาณ $\tilde{p}_L$ และ $\tilde{q}_L$ จะถูกเลือกใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อวัตถุประสงค์สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิก และชดเชยกำลังรีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณา

$$p_L = \bar{p}_L + \tilde{p}_L \quad (3.4)$$

$$q_L = \bar{q}_L + \tilde{q}_L \quad (3.5)$$

ขั้นตอนที่ 3 กรองปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ หรือ $\tilde{p}_L$ โดยใช้วงจรกรอง (Filter) ซึ่งสามารถเลือกใช้ทั้งวงจรกรองแบบผ่านสูง (High Pass Filter : HPF) หรือวงจรกรองแบบผ่านต่ำ (Low Pass Filter : LPF) แสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 3.1 โดยในรูปที่ 3.1(ก) คือ การกรองปริมาณ $\tilde{p}_L$ โดยตรงผ่านวงจรกรองแบบผ่านสูง (HPF) ในขณะที่รูปที่ 3.1(ข) คือ การกรองปริมาณ $\tilde{p}_L$ ทางอ้อมโดยใช้วงจรกรองแบบผ่านต่ำ ทำได้โดยนำวงจรกรองแบบผ่านต่ำมาแยกส่วนปริมาณ $\bar{p}_L$ ออกจากค่า p_L แล้วจึงนำค่า p_L มาหักลบกับส่วนปริมาณ $\bar{p}_L$ เพื่อให้ได้มาซึ่งปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟหรือ $\tilde{p}_L$



รูปที่ 3.1 การกรองปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ

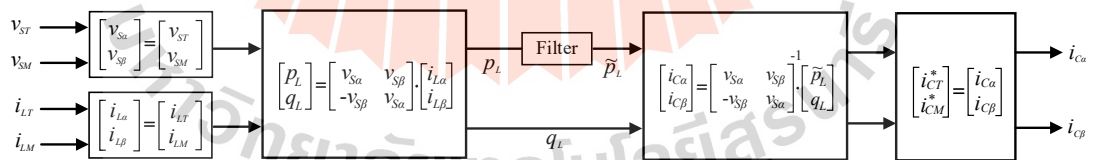
ขั้นตอนที่ 4 คำนวณกระแสสำหรับชุดเซเวนแกน α และ β ($i_{C\alpha}$, $i_{C\beta}$) โดยใช้สมการที่ (3.6)

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{S\alpha} & v_{S\beta} \\ -v_{S\beta} & v_{S\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดกระแสอ้างอิงของเฟส T (i_{CT}^*) เท่ากับค่ากระแส $i_{C\alpha}$ และกำหนดให้กระแสอ้างอิงของเฟส M (i_{CM}^*) เท่ากับค่ากระแส $i_{C\beta}$ แสดงได้ดังสมการที่ (3.7)

$$\begin{bmatrix} i_{CT}^* \\ i_{CM}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

จากขั้นตอนการคำนวณทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนภาพไดอะแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 โดยที่ i_{CT}^* และ i_{CM}^* จะถูกนำไปใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาต่อไป

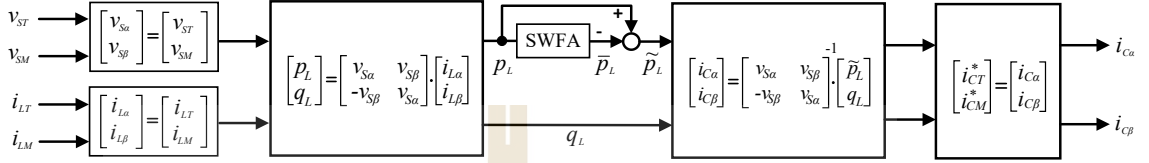


รูปที่ 3.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง

3.3 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูริเยร์

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูริเยร์ หรือวิธี PQF (Tiyarachakun, Suksan, Kongpol Areerak, and Kongpan Areerak., 2014) [5] เป็นวิธีที่พัฒนาต่อยอดจากวิธี PQ โดยได้นำหลักการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดวเลื่อนมาใช้สำหรับกรองปริมาณ

ฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง ($\bar{p}_L$) แทนการใช่วงจรกรองในขั้นตอนที่ 3 ของการคำนวณการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่นำเสนอในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพไดอะแกรมการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับวิธีฟูริเยร์

จากรูปที่ 3.3 ในขั้นตอนที่ 3 วิธี SWFA จะถูกใช้สำหรับการคำนวณหาปริมาณมูลฐานของกำลังแอกทีฟ ($\bar{p}_L$) จากนั้นจะนำไปหักลบกับค่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง (p_L) ซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์คือ ปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ ($\tilde{p}_L$) เพื่อใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟต่อไป โดยวิธี SWFA จะอาศัยการพิจารณาความสัมพันธ์ของสมการออยเลอร์-ฟูริเยร์ (Euler-Fourier formulas) ของกำลังแอกทีฟขณะหนึ่งได้ดังสมการที่ (3.8) โดยที่ T_s คือ ช่วงเวลาซิกตัวอย่าง (Sampling time) ในหน่วยวินาที (s) และ ω คือ ความถี่เชิงมุมในหน่วย rad/s

$$p_L(kT_s) = \underbrace{\frac{A_{op}}{2}}_{DC \text{ component}} + \underbrace{\sum_{h=1}^{\infty} [A_{hp} \cos(h\omega kT_s) + B_{hp} \sin(h\omega kT_s)]}_{AC \text{ component}}; k = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (3.8)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ A_{op} , A_{hp} และ B_{hp} สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.9) ถึง (3.11) ตามลำดับ

$$A_{op} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_L(nT_s) \quad (3.9)$$

$$A_{hp} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_L(nT_s) \cos(nh\omega T_s); h = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (3.10)$$

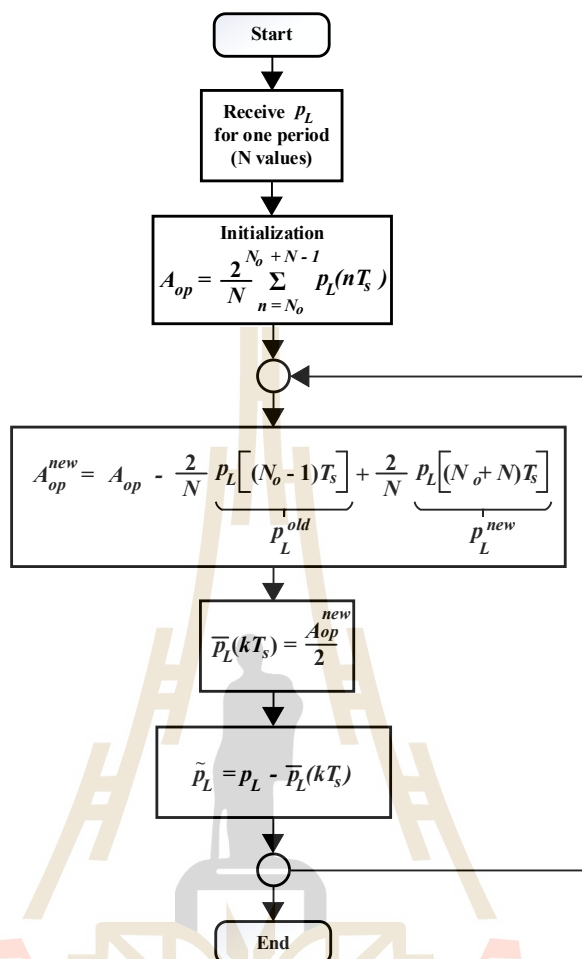
$$B_{hp} = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_L(nT_s) \sin(nh\omega T_s); h = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.8) จะเห็นได้ว่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง ($p_L(kT_s)$) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนประกอบกระแสตรง (DC component) และส่วนประกอบกระแสสลับ (AC component) โดยที่ส่วนประกอบกระแสตรงเทียบเท่ากับปริมาณ $\bar{p}_L$ และส่วนประกอบกระแสสลับเทียบเท่ากับปริมาณ $\tilde{p}_L$ ดังนั้นการคำนวณปริมาณ $\bar{p}_L$ ในขั้นตอนที่ 3 ของวิธี PQF จะพิจารณาเฉพาะส่วนประกอบกระแสตรงเท่านั้น ซึ่งจะอาศัยการคำนวณด้วยวิธี SWFA ที่มีลำดับการคำนวณแสดงได้ดังแผนภาพไดอะแกรมในรูปที่ 3.4 โดยเริ่มต้นจากการรับข้อมูลค่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง ($p_L(kT_s)$) 1 คาบ สัญญาณความถี่มูลฐาน จำนวน N ข้อมูล และนำข้อมูลดังกล่าวคำนวณค่า A_{op} เริ่มต้น (Initialization) จากสมการที่ (3.9) ในลำดับถัดไปจะรับข้อมูลกำลังแอกทีฟขณะหนึ่งค่าใหม่ (p_L^{new}) และลบข้อมูลกำลังแอกทีฟค่าเก่า (p_L^{old}) ออกจากสัมประสิทธิ์ A_{op} ในรอบการทำงานก่อนหน้านี้ (A_{op}^{old}) เพื่อคำนวณสัมประสิทธิ์ A_{op} ค่าใหม่ (A_{op}^{new}) โดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.12) ผลลัพธ์จากการคำนวณจะถูกนำไปคำนวณเป็นส่วนประกอบกระแสตรง ($\bar{p}_L(kT_s)$) จากสมการที่ (3.13) และในลำดับสุดท้ายจะคำนวณปริมาณ $\tilde{p}_L$ ดังแสดงในสมการที่ (3.14) เพื่อใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงในขั้นตอนที่ 4 ของวิธี PQ ต่อไป โดยการคำนวณปริมาณ $\tilde{p}_L$ ของวิธี SWFA จะวนซ้ำเพื่อรับข้อมูลกำลังแอกทีฟขณะหนึ่งค่าใหม่และลบข้อมูลกำลังแอกทีฟขณะหนึ่งค่าเก่า เพื่ออัปเดตข้อมูลตลอดช่วงเวลาการตรวจจับฮาร์มอนิก

$$A_{op}^{new} = A_{op}^{old} - \frac{2}{N} \underbrace{p_L[(N_0 - 1)T_s]}_{p_L^{old}} + \frac{2}{N} \underbrace{p_L[(N_0 + N)T_s]}_{p_L^{new}} \quad (3.12)$$

$$\bar{p}_L(kT_s) = \frac{A_{op}}{2} \quad (3.13)$$

$$\tilde{p}_L = p_L - \bar{p}_L(kT_s) \quad (3.14)$$



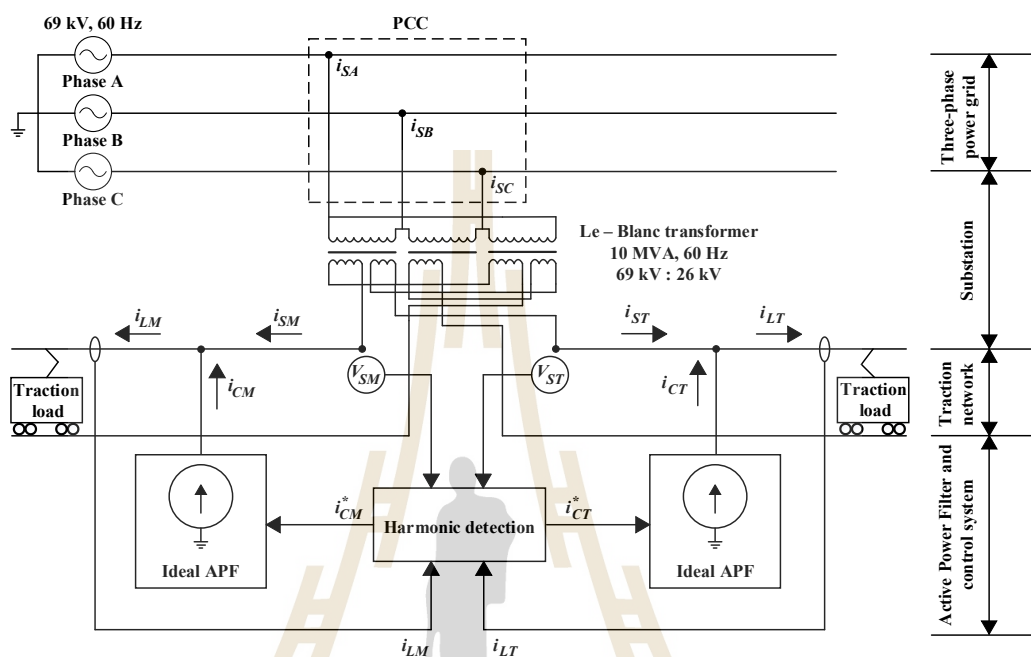
รูปที่ 3.4 ไตอะแกรมการคำนวณค่า $\tilde{p}_L$ ด้วยวิธี SWFA

3.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างวิธี PQ และวิธี PQF

ระบบก่าจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับที่พิจารณาสำหรับใช้เปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี PQF สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้า โดยจะรับกำลังไฟฟ้าจากระบบกิตทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสที่กักตังแรงดัน 69 kV ความถี่ 60 Hz และแปลงเป็นระบบไฟฟ้าแบบเฟสร่วม (Co-phase systems) ที่กักตังแรงดัน 26 kV ความถี่ 60 Hz โดยใช้หม้อแปลงชนิดเลอบลองก์ (Le-Blanc transformer) สำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดรถไฟ (Traction load) ทั้งเฟส T และเฟส M โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาให้โหลดรถไฟ (Traction load) แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติที่ประกอบด้วยองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิก

ซึ่งกำหนดตามข้อมูลกระแสโหลดที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าใต้หวัน (Sy-Ruen Huang and Bing-Nan Chen, 2002) [2] ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 ระบบกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมสำหรับทดสอบ
เปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์โมนิก

ส่วนที่ 2 การตรวจจับฮาร์โมนิก (Harmonic detection) สำหรับคำนวณกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้าสำหรับนำมาเป็นกระแสอ้างอิงในการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งเฟส T (i_{CT}^*) และเฟส M (i_{CM}^*) โดยในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์โมนิกระหว่างวิธี PQ และวิธี PQF ที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

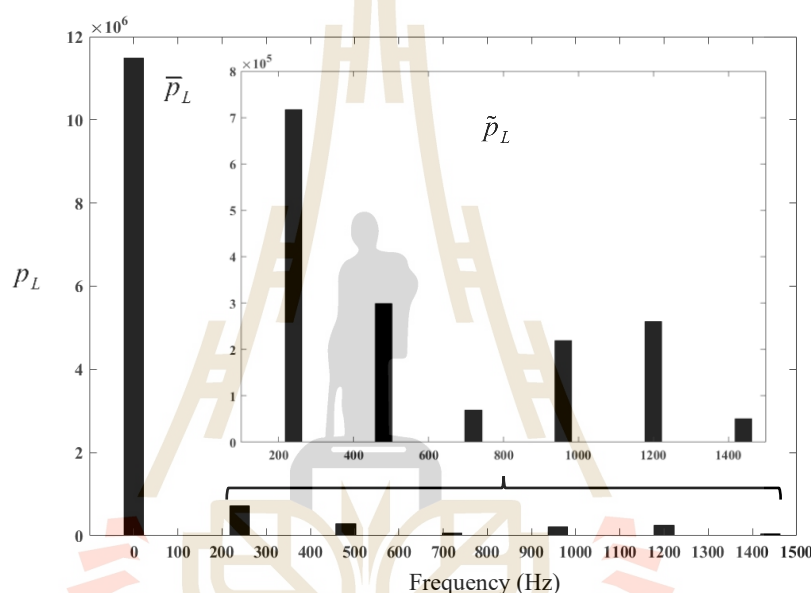
ส่วนที่ 3 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งในที่นี้จะแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าทางอุดมคติ (Ideal APF) ที่สามารถชดเชยได้เหมือนลักษณะรูปสัญญาณกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์โมนิกทุกประการ ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมในขั้นตอนการศึกษาและการตรวจสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQ และวิธี PQF โดยยังไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบของโครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุมการทำงาน

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบกระแสมูลฐานและองค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบแรงไฟฟ้าใต้หวัน

อันดับฮาร์มอนิก (h)	กระแสไหล (A)	ร้อยละ (%)
1	221.000	100.000
3	39.900	18.100
5	26.110	11.820
7	5.760	2.610
11	4.224	1.910
13	2.880	1.303
17	4.224	1.911
19	4.992	2.260
23	2.230	1.010
25	1.250	0.566
29	1.630	0.740
31	2.496	1.130
35	1.152	0.521
37	1.152	0.521
41	1.050	0.475
43	0.860	0.390
47	1.050	0.475
49	1.250	0.566

สำหรับการออกแบบการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ในขั้นตอนที่ 3 ในงานวิทยานิพนธ์นี้ จะเลือกใช้วงจรกรองแบบผ่านต่ำ (Low Pass Filter : LPF) โดยมีรายละเอียดที่ต้องพิจารณา ออกแบบ คือ ชนิดของวงจรกรอง (Filter type) อันดับของวงจรกรอง (Filter order) และค่าความถี่ตัด (Cutoff frequency : f_c) ซึ่งการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกในหัวข้อนี้ จะเลือกใช้วงจรกรองชนิด Butterworth เนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกรองปริมาณบนความถี่ที่ต้องการ และมีผลตอบสนองทางความถี่ที่แม่นยำ [6] ในส่วนอันดับวงจรกรองเลือกใช้วงจรกรองอันดับที่สองซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนที่ไม่ซับซ้อนอีกทั้งยังเพียงพอสำหรับการกรองปริมาณฮาร์มอนิกที่

ต้องการ และค่าความถี่ตัด (f_c) ของวงจรกรองสำหรับใช้กรองปริมาณมูลฐานของกำลังแอกทีฟ ($\bar{p}_L$) สามารถออกแบบได้โดยการพิจารณาสเปกตรัมของกำลังแอกทีฟขณะหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 3.6 จากรูปดังกล่าวประกอบด้วยปริมาณ $\bar{p}_L$ ที่ความถี่ 0 Hz และปริมาณ $\tilde{p}_L$ ที่ความถี่ตั้งแต่ 240 Hz เป็นต้นไป ดังนั้นการออกแบบค่าความถี่ตัด (f_c) จึงสามารถเลือกได้ในช่วงความถี่เท่ากับ 0 Hz ถึงความถี่ตำแหน่งแรกที่ปรากฏปริมาณ $\tilde{p}_L$ คือ 240 Hz ($0 \text{ Hz} < f_c < 240 \text{ Hz}$) โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ค่าความถี่ตัดเท่ากับ 120 Hz



รูปที่ 3.6 กราฟสเปกตรัมของกำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง

การเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกของวิธี PQ และวิธี PQF ในที่นี้จะใช้ตัวชี้วัด 2 ตัว ดังนี้

ดัชนีชี้วัดตัวที่หนึ่ง คือ การบ่งบอกถึงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง จะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion : %THD) ที่เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.15)

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (3.15)$$

โดยที่ I_1 = ค่า RMS ของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน (60 Hz)

I_n = ค่า RMS ของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 ถึง 50

ดัชนีชี้วัดตัวที่สอง คือ ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor : PF) ที่สามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ (3.16) โดยประกอบด้วย ค่าตัวประกอบกำลังความเพี้ยน (Distortion power factor : PF_{dist}) และค่าตัวประกอบกำลังการกระจัด (Displacement power factor : PF_{disp}) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.17) และ (3.18) ตามลำดับ

$$PF = PF_{dist} \times PF_{disp} \quad (3.16)$$

$$PF_{dist} = \frac{P}{S_1} \quad (3.17)$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้าจริง หน่วย W

S_1 คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ความถี่มูลฐาน หน่วย VA

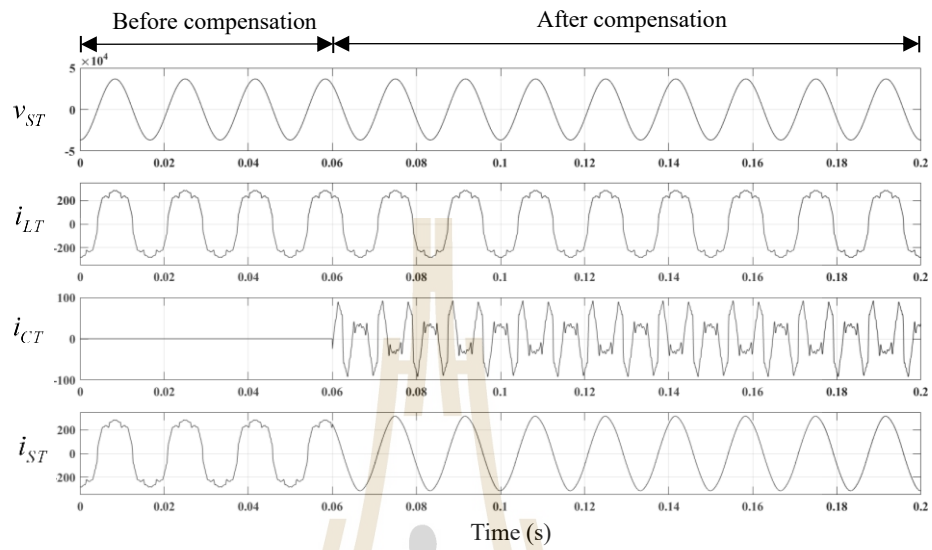
$$PF_{disp} = \frac{S_1}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (3.18)$$

โดยที่ THD_V คือ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของแรงดันไฟฟ้า

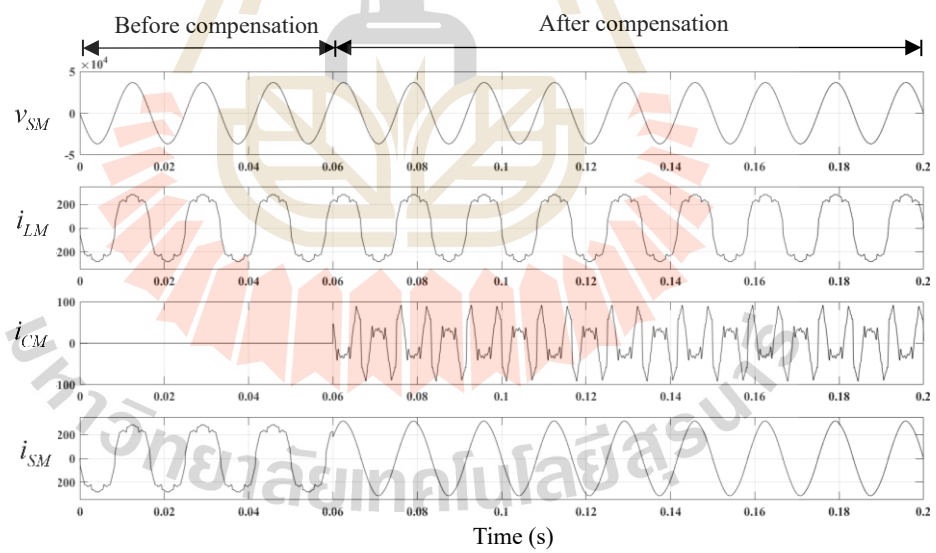
THD_I คือ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมของกระแสไฟฟ้า

S คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ หน่วย VA

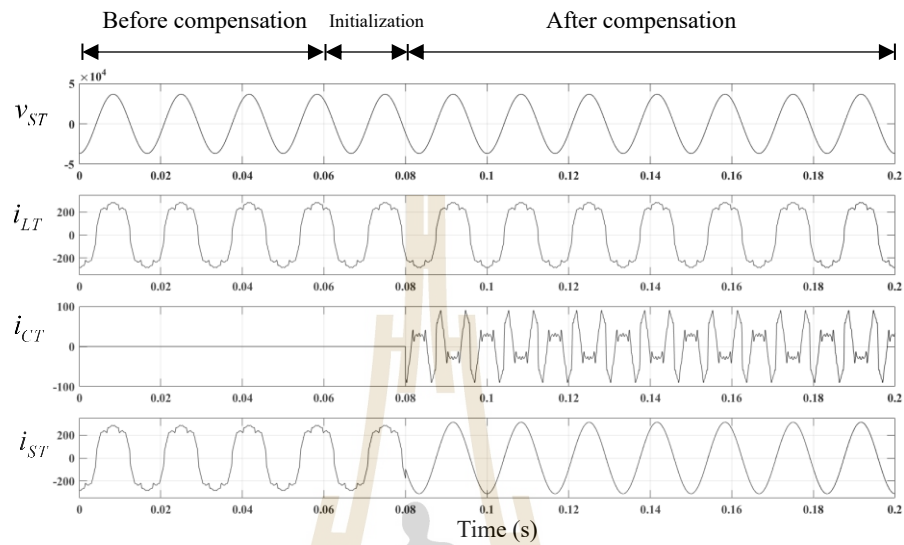
ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาดังรูปที่ 3.5 ในกรณีการตรวจจับฮาร์โมนิกใช้วิธี PQ สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในเฟส T และ เฟส M ได้ดังรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ ส่วนกรณีใช้วิธี PQF แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับเฟส นอกจากนี้การกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสกรณีใช้การตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQ และวิธี PQF แสดงได้ดังรูปที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ โดยกำหนดเวลาในการจำลองสถานการณ์ทั้งหมด 0.2 วินาที และกำหนดให้วงจรรบกวนกำลังแอกทีฟเริ่มฉีดกระแสชดเชย (i_{CT} และ i_{CM}) เข้าสู่ระบบรางไฟฟ้าที่ฝั่งระบบไฟฟ้าเฟสรวมตั้งแต่เวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไป ทั้งนี้การคำนวณจำลองสถานการณ์กำหนดใช้ช่วงเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 10 ไมโครวินาที



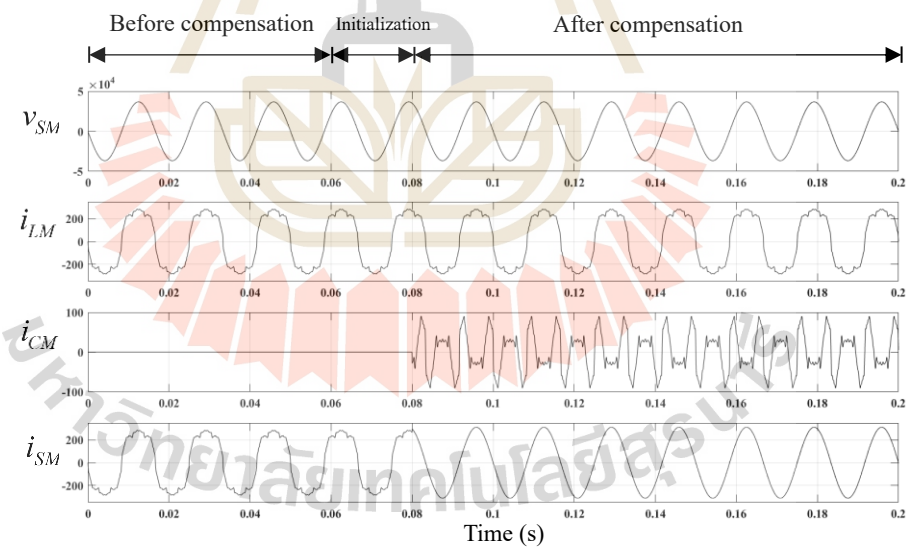
รูปที่ 3.7 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในเฟส T กรณีใช้วิธี PQ



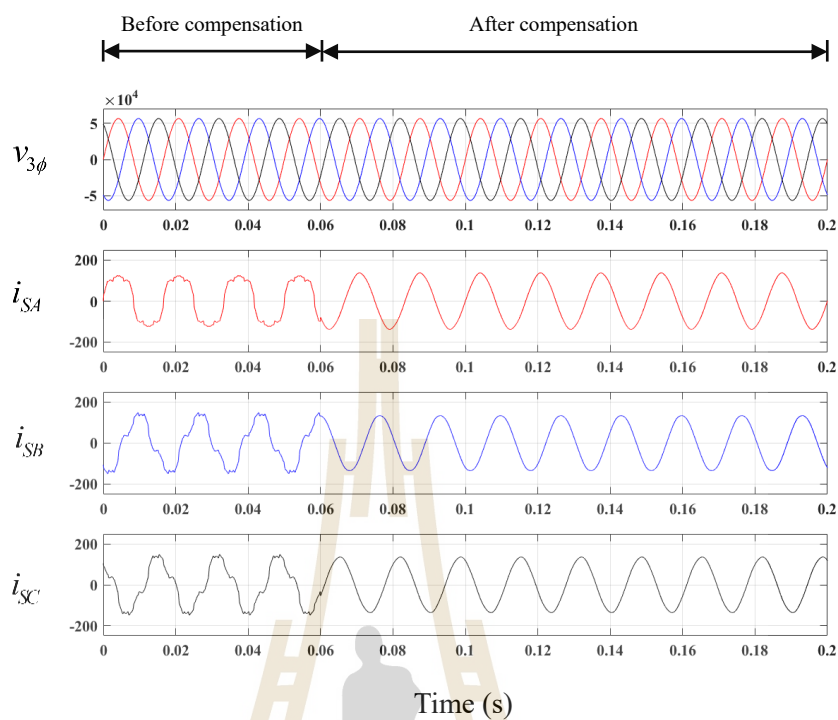
รูปที่ 3.8 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในเฟส M กรณีใช้วิธี PQ



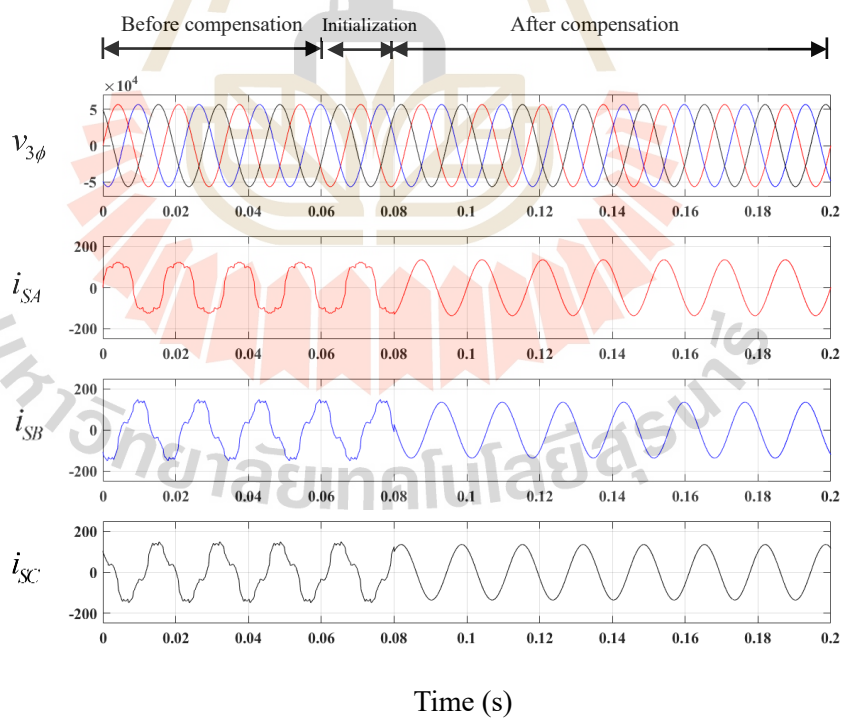
รูปที่ 3.9 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในเฟส T กรณีใช้วิธี PQF



รูปที่ 3.10 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในเฟส M กรณีใช้วิธี PQF



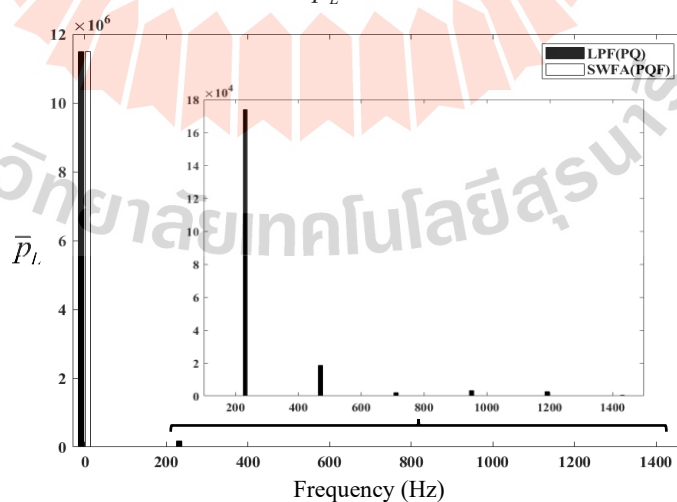
รูปที่ 3.11 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสกรณีใช้วิธี PQ



รูปที่ 3.12 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสกรณีใช้วิธี PQF

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมของระบบรางดังรูปที่ 3.7 ถึง 3.10 ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 0.06 วินาที คือ ช่วงที่ยังไม่มีการฉีดกระแสชดเชย (i_{CT} , i_{CM}) เข้าสู่ระบบรางไฟฟ้าส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่าย (i_{ST} , i_{SM}) ยังคงมีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ เช่นเดียวกับกระแสโหลด (i_{LT} , i_{LM}) ทุกประการ จากนั้นตั้งแต่ 0.06 วินาที เป็นต้นไป เมื่อวงจรกรองกำลังแอคทีฟฉีดกระแสชดเชย (i_{CT} , i_{CM}) ที่มีลักษณะเหมือนกับรูปสัญญาณกระแสอ้างอิง (i_{CT}^* , i_{CM}^*) ที่ได้จากวิธี PQ และวิธี PQF เข้าสู่ระบบรางไฟฟ้า สังเกตได้ว่า กระแสที่แหล่งจ่าย (i_{ST} , i_{SM}) มีลักษณะกลับมาเป็นรูปไซน์ทั้งสองวิธี โดยในกรณีที่ใช้การตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQF พบว่า ในช่วงเวลา 0.06 ถึง 0.08 วินาที มีค่ากระแสชดเชยเท่ากับศูนย์ เนื่องจากจะต้องอาศัยช่วงเวลา 1 คาบรูปสัญญาณสำหรับการคำนวณค่า A_{op} เริ่มต้น (Initialization) ตามวิธี SWFA จากผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ฝั่งระบบไฟฟ้าเฟสรวมของระบบรางดังกล่าว เมื่อพิจารณาที่ฝั่งของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส พบว่า กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) ภายหลังจากการกำจัดฮาร์โมนิกกลับมาเป็นรูปไซน์เช่นเดียวกันทั้งกรณีใช้วิธี PQ และ PQF ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.12 โดยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายทั้งระบบไฟฟ้าเฟสรวมและระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

นอกจากนี้ผลการกรองปริมาณ $\bar{p}_L$ ทั้งกรณีใช้ LPF ของวิธี PQ และกรณีใช้ SWFA ของวิธี PQF สามารถแสดงกราฟสเปกตรัมของปริมาณ $\bar{p}_L$ ได้ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีใช้ SWFA ไม่พบปริมาณ $\bar{p}_L$ (ที่ความถี่ตั้งแต่ 240 Hz เป็นต้นไป) ในขณะที่กรณีใช้ LPF ยังคงพบปริมาณ $\bar{p}_L$ โดยมีขนาดมากที่สุดที่ความถี่ 240 Hz และที่ความถี่สูงขึ้นจะมีขนาดลดลงตามลำดับ ซึ่งหมายความว่ากรณีใช้ SWFA มีสมรรถนะการกรองปริมาณ $\bar{p}_L$ ที่ดีกว่ากรณีใช้ LPF



รูปที่ 3.13 ผลการกรองปริมาณ $\bar{p}_L$

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และ PQF

วิธีตรวจจับ ฮาร์มอนิก	ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม		ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส			PF
	เฟส T	เฟส M	เฟส A	เฟส B	เฟส C	
	ก่อนการชดเชย					
	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	0.975
	ภายหลังการชดเชย					
	วิธี PQ	1.12%	1.12%	1.12%	1.12%	1.12%
วิธี PQF	0.29%	0.29%	0.29%	0.29%	0.29%	0.999

จากตารางที่ 3.2 แสดงค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) และกระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.15) และ PF คำนวณได้จากสมการที่ (3.16) จากตารางพบว่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชยมีค่าสูงเท่ากับ 22.16% เท่ากันในทุกเฟส ในขณะที่ภายหลังการชดเชย พบว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี PQF ให้ผลค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมเท่ากับ 1.12% และ 0.29% ตามลำดับวิธี (โดยมีค่าที่เท่ากันทั้งเฟส T และเฟส M) และส่งผลให้ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส ลดลงเหลือเท่ากับ 1.12% และ 0.29% ตามลำดับวิธี (มีค่าที่เท่ากันทั้งสามเฟส) โดยค่า %THD ดังกล่าวมีค่าไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 ทั้ง 2 วิธี อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าวิธี PQF สามารถให้ %THD ภายหลังการชดเชยที่น้อยกว่าวิธี PQ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธี PQF ที่ใช้ SWFA มีความถูกต้องและแม่นยำในการตรวจจับฮาร์มอนิกมากกว่าวิธี PQ ที่ใช้วงจรกรองผ่านต่ำ จากผลดังกล่าวหมายความว่าวิธี PQF มีสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี PQ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (PF) พบว่าค่า PF ของระบบแรงไฟฟ้า ในกรณีที่ใช้วิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี PQF สามารถปรับปรุงค่า PF ให้ดีขึ้นใกล้เคียง 1 เท่ากันทั้ง 2 วิธี

3.5 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF สำหรับระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม และได้นำเสนอการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างวิธี PQ และ

วิธี PQF ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกพบว่าวิธี PQF สามารถให้ %THD ของ
กระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยที่มีค่าน้อยกว่าวิธี PQ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการตรวจจับ
ฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQF ที่ดีกว่าวิธี PQ นอกจากนี้ วิธี PQF ยังมีสมรรถนะที่ดีในการตรวจจับ
ฮาร์โมนิกภายใต้สภาวะของกระแสโหลดที่แตกต่างกัน ในขณะที่วิธี PQ มีความจำเป็นต้องออกแบบ
วงจรกรองใหม่ให้เหมาะสมกับแต่ละสภาวะของกระแสโหลด ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึง
เลือกใช้การตรวจจับ ฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQF สำหรับคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลัง
แอคทีฟในระบบแรงไฟฟ้าที่จะนำเสนอในบทถัดไป



บทที่ 4

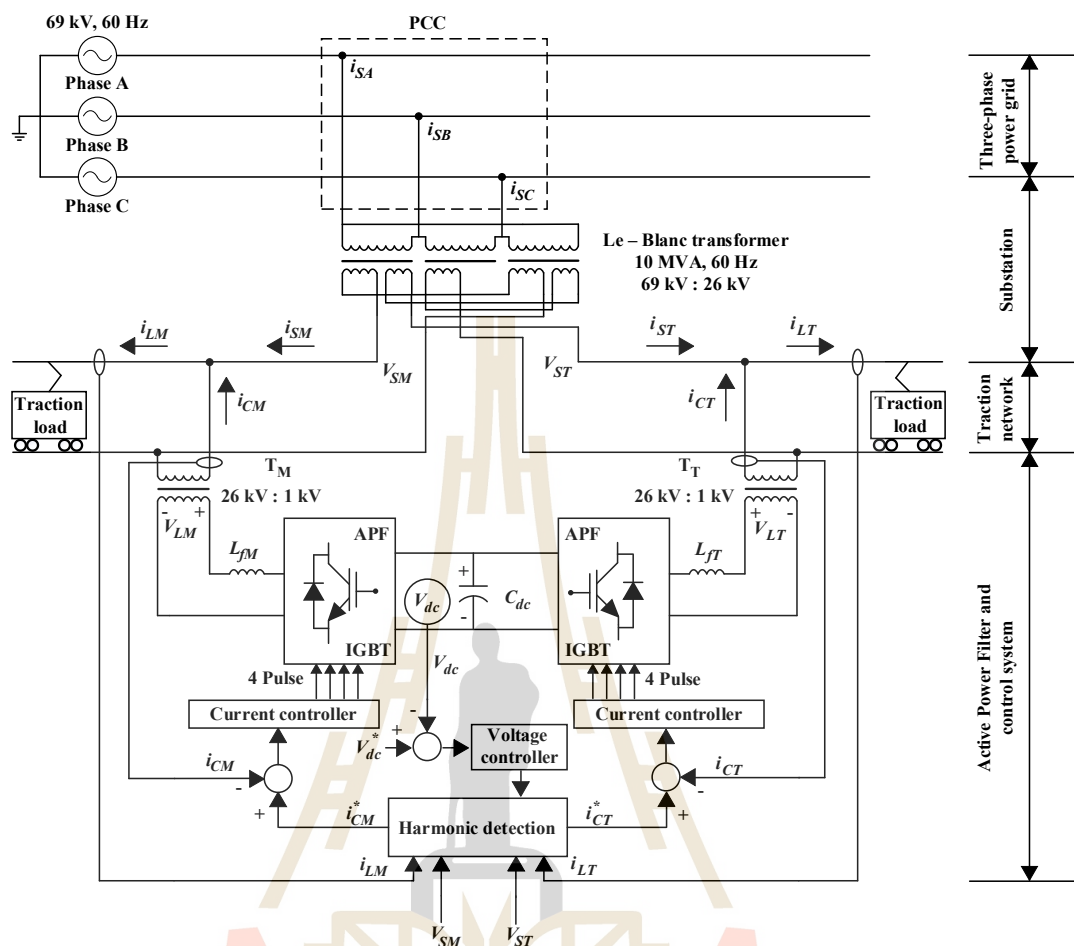
การออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟและระบบควบคุม

4.1 กล่าวนำ

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมจะมีประสิทธิภาพที่ดีเมื่อวงจรรอกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยที่มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกมากที่สุด และส่วนที่มีความสำคัญต่อการทำงานของวงจรรอกำลังแอกทีฟดังกล่าว คือ ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่เหมาะสม และสมรรถนะที่ดีของระบบควบคุมของวงจรรอกำลังแอกทีฟ ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ และการออกแบบระบบควบคุมของวงจรรอกำลังแอกทีฟสำหรับใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม โดยการนำเสนอจะแบ่งเป็นหัวข้อ ดังนี้ การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟ โครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟ การออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟ การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟ และการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมเพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรรอกำลังแอกทีฟและระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบ ซึ่งรายละเอียดในแต่ละหัวข้อสามารถแสดงได้ดังนี้

4.2 การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟ

ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมโดยวงจรรอกำลังแอกทีฟแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้



รูปที่ 4.1 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยวงจรรองกำลังแยกทีฟ

ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม (Substation) ซึ่งจะรับกำลังไฟฟ้าจากระบบกริดทางด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส (Three-phase power grid) ที่พิกัดแรงดัน 69 kV ความถี่ 60 Hz และแปลงเป็นระบบไฟฟ้าแบบเฟสร่วม (Co-phase systems) ที่พิกัดแรงดัน 26 kV ความถี่ 60 Hz โดยใช้หม้อแปลงชนิดเลอบลองก์ (Le-Blanc transformer) สำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากับโหลดรถไฟ (Traction load) ทั้งเฟส T และเฟส M โดยพิจารณาให้โหลดรถไฟ (Traction load) แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติที่กำหนดตามข้อมูลกระแสโหลดที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าได้หวิน (Sy-Ruen Huang and Bing-Nan Chen, 2002) [2]

ส่วนที่ 2 วงจรรองกำลังแยกทีฟและระบบควบคุม (Active Power Filter and control system) ในส่วนของวงจรรองกำลังแยกทีฟมีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสใช้สำหรับฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบรางไฟฟ้าเพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า ส่วนระบบควบคุม

การทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ประกอบด้วย การตรวจจับฮาร์มอนิก (Harmonic detection) ใช้สำหรับคำนวณกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้าสำหรับนำมาใช้เป็นกระแสอ้างอิงในการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้วิธี PQF (อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 3) การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (Voltage control) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อให้มีค่าคงที่สำหรับใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานของวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส และการควบคุมกระแสชดเชย (Current control) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อให้มีลักษณะรูปสัญญาณที่คล้ายตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก

4.3 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

การกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมซึ่งจะใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสจำนวน 2 ชุด สำหรับกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในเฟส T และเฟส M ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยสามารถแบ่งส่วนประกอบอุปกรณ์ได้ 3 ส่วน คือ

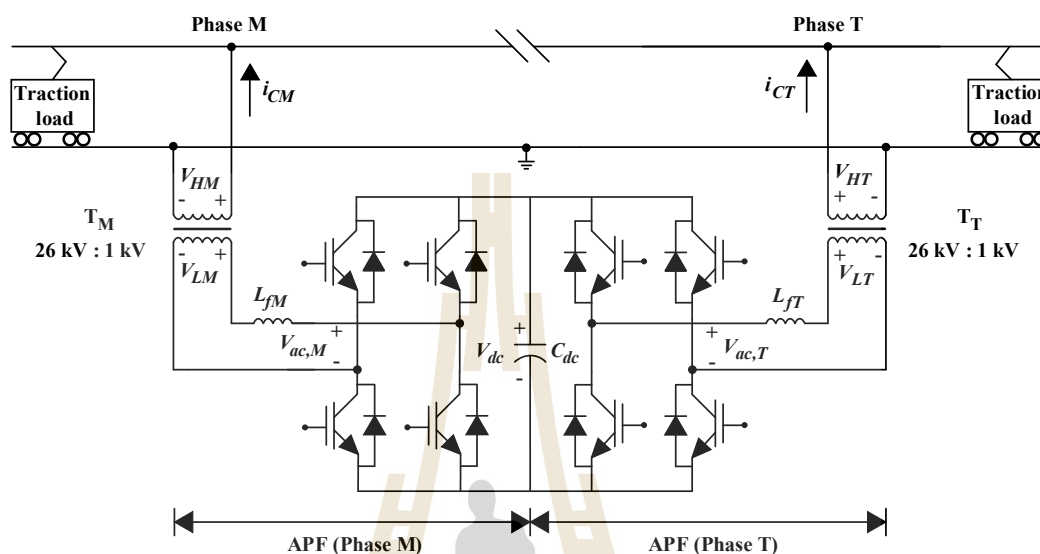
ส่วนที่ 1 ตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองชุดจะใช้ตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) ร่วมกันสำหรับใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานและจ่ายแรงดันบัสไฟตรงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ส่วนที่ 2 อุปกรณ์สวิตช์กำลังไอจีบีที (IGBT) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในแต่ละชุดประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไอจีบีที (IGBT) จำนวน 4 ตัว เชื่อมต่อกันในลักษณะวงจรบริดจ์ ซึ่งทำหน้าที่นำกระแส (on) และหยุดนำกระแส (off) ตามสัญญาณพัลส์ควบคุมที่ส่งมาจากส่วนระบบควบคุมกระแสชดเชยเพื่อให้ได้แรงดันกระแสสลับ ($V_{ac,T}$, $V_{ac,M}$) ตรงตามที่ต้องการ

ส่วนที่ 3 ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองจำนวน 2 ตัว (L_{fT} , L_{fM}) ทำหน้าที่ส่งผ่านแรงดันกระแสสลับที่ได้รับจากส่วนที่ 2 ให้อยู่ในรูปของกระแสชดเชยสำหรับฉีดเข้าสู่จุดที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าทั้งเฟส M และ T

นอกจากนี้เนื่องจากระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสร่วมที่พิจารณามีพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงที่ 26 kV ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยการใช้หม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส (T_T , T_M) พิกัด 26 kV : 1 kV สำหรับทำหน้าที่ลดระดับแรงดันให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่จุดพิจารณา

การจัดฮาร์โมนิกของระบบแรงไฟฟ้าแบบเฟสรวมได้ โดยการใช้หม้อแปลงดังกล่าวจะช่วยลดฟลักตของ
วงจรรองกำลังแอกทีฟและราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรได้ในทางปฏิบัติ



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟ

4.4 การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟเพื่อรองรับปริมาณกระแสโหลดเป็นสองเท่าของกระแสโหลดที่พิจารณาที่กำหนดตามข้อมูลกระแสโหลดที่เกิดขึ้นจริงในระบบแรงไฟฟ้าได้ห้วน (ข้อมูลกระแสโหลดสามารถดูได้จากตารางที่ 3.1 ในบทที่ 3) ซึ่งพารามิเตอร์ของวงจรที่จะต้องดำเนินการออกแบบประกอบด้วยค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรอก (L_f) ค่าตัวเก็บ ประจุ ดีซี (C_{dc}) และค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) โดยแสดงรายละเอียดในแต่ละหัวข้อดังนี้

4.4.1 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง

ในปี ค.ศ. 1997 Ingram, David ME, and Simon D. Round. [7] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยอาศัยการเลือกค่าที่มีขนาดไม่เกินค่าตัวเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f,max}$) ที่ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของกระแสชดเชยมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของกระแสชดเชยอ้างอิง และเนื่องจากโหลดรถไฟฟ้าในเฟส T และเฟส M มีขนาดที่เท่ากัน ดังนั้น การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองของทั้ง

สองเฟสจึงกำหนดให้มีค่าเท่ากัน ($L_{JT} = L_{JM}$) โดยการออกแบบสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน อธิบายได้ดังนี้

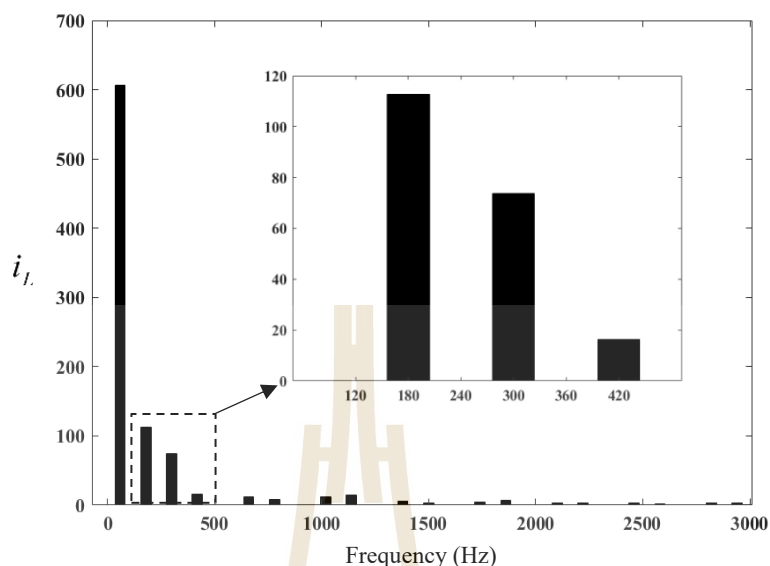
ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชยอ้างอิงสูงสุดเทียบกับเวลา ($\max(di_c^*/dt)$) ซึ่งสามารถประมาณโดยใช้องค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกได้ดังสมการที่ (4.1)

$$\max(di_c^*/dt) = A2\pi f \quad (4.1)$$

โดยที่ A คือ ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้า
 f คือ ความถี่ฮาร์มอนิกที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุดของกระแสฮาร์มอนิก

การพิจารณาหาค่า A และ f เพื่อประกอบการคำนวณหาค่า $\max(di_c^*/dt)$ ตามสมการที่ (4.1) จะอาศัยการวิเคราะห์กราฟสเปกตรัมขนาดกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ในสถานะกระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาออกแบบซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 จากรูปดังกล่าวพบว่าความถี่ฮาร์มอนิกที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุดของกระแสฮาร์มอนิก คือ 180 Hz ($f = 180$ Hz) โดยมีค่าแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ 112.86 A อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ามีการใช้หม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส (T_T, T_M) เพื่อลดระดับแรงดันของจุดพิจารณากำจัดฮาร์มอนิกดังปรากฏในรูปที่ 4.2 ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองมีขนาดสูงขึ้น 26 เท่าของกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก ทำให้เมื่อพิจารณาถึงการใช้หม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟสค่าแอมพลิจูดสูงสุดของกระแสฮาร์มอนิกจะมีขนาดสูงขึ้น 26 เท่า โดยมีค่าเท่ากับ 2934 A ($A = 26 \times 112.86 = 2934$ A) ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่า $\max(di_c^*/dt)$ ได้เท่ากับ 3318276 A/s แสดงได้ดังนี้

$$\max(di_c^*/dt) = 2934 \times 2\pi \times 180 = 3318276 \text{ A/s}$$



รูปที่ 4.3 กราฟสเปกตรัมขนาดกระแสฮาร์โมนิกอันดับต่าง ๆ ในสภาวะกระแสโหลดของระบบ
รางไฟฟ้าที่พิจารณาออกแบบ

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่า $L_{f,\max}$ ด้วยสมการที่ (4.2)

$$L_{f,\max} = \frac{V_{dc} - V_L}{\max(di_c^*/dt)} \quad (4.2)$$

โดยที่ V_L คือ ค่ายอดแรงดันที่จุดพิจารณากำจัดฮาร์โมนิกทางด้านฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1414 V ส่วน V_{dc} คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรง โดยต้องออกแบบให้มีความมากกว่าค่ายอดแรงดันของจุดพิจารณากำจัดฮาร์โมนิก (Jain, s. K. And Agarwal, p., 2003) [8] ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ออกแบบให้ค่าแรงดันบัสไฟตรงเท่ากับ 1700 V

จากค่าพารามิเตอร์ในข้างต้นจะสามารถคำนวณค่า $L_{f,\max}$ ตามสมการที่ (4.2) ได้เท่ากับ 0.026 mH แสดงได้ดังนี้

$$L_{f,\max} = \frac{1700 - 1414}{3318276} = 0.086 \text{ mH}$$

ขั้นตอนที่ 3 เลือกค่า L_f ที่อยู่ในขอบเขตของค่า $L_{f,\max}$ (0.086 mH) โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ค่า L_f เท่ากับ 0.05 mH เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์โมนิกที่ดีโดยมีค่า %THD น้อยกว่า 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

4.4.2 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี

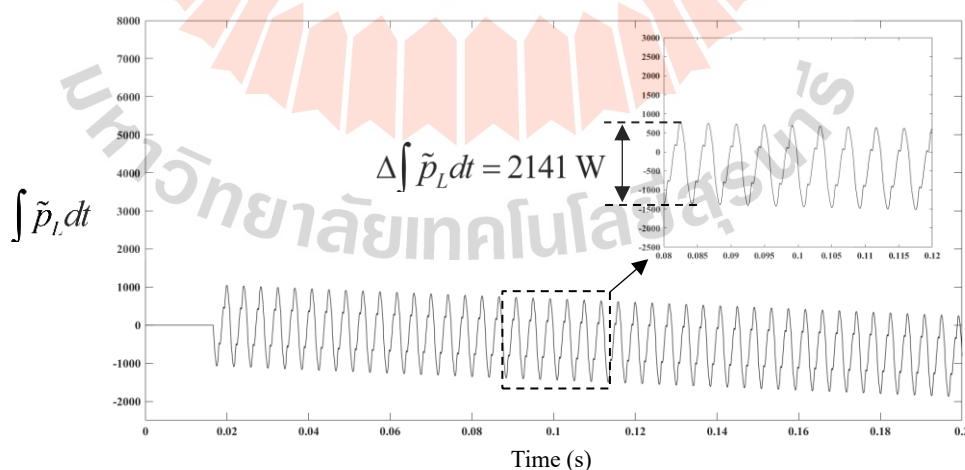
ในปี ค.ศ. 1998 Thomas, et al. [9] ได้นำเสนอการออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยอาศัยการเลือกค่าที่มากกว่าค่าตัวเก็บประจุดีซีต่ำสุด ($C_{dc,min}$) ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (4.3) และสามารถอธิบายการออกแบบโดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

$$C_{dc,min} = \frac{\Delta \int \tilde{p}_L dt}{\Delta V_{dc} \times V_{dc}} \quad (4.3)$$

โดยที่ $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ คือ ค่าการกระเพื่อมของผลรวมปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟที่โหลดและ ΔV_{dc} คือ ค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่าการกระเพื่อมของผลรวมปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟที่โหลด ($\Delta \int \tilde{p}_L dt$) ในสภาวะกระแสโหลดที่พิจารณาออกแบบ โดยพิจารณาเทอมปริพันธ์ผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันที่จุดพิจารณากำจัดฮาร์มอนิกทางด้านฝั่งแรงสูงของหม้อแปลง (V_H) และกระแสฮาร์มอนิกหรือกระแสอ้างอิง (i_C^*) ของเฟส T และเฟส M ดังแสดงในสมการที่ (4.4) โดยสามารถแสดงผลการคำนวณได้ดังรูปที่ 4.4 จากรูปดังกล่าว สามารถวัดค่า $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ ได้เท่ากับ 2141 W

$$\Delta \int [\tilde{p}_L] dt = \Delta \int [(V_{HT} \times i_{C,T}^*) + (V_{HM} \times i_{C,M}^*)] dt \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.4 ผลรวมปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟที่โหลด

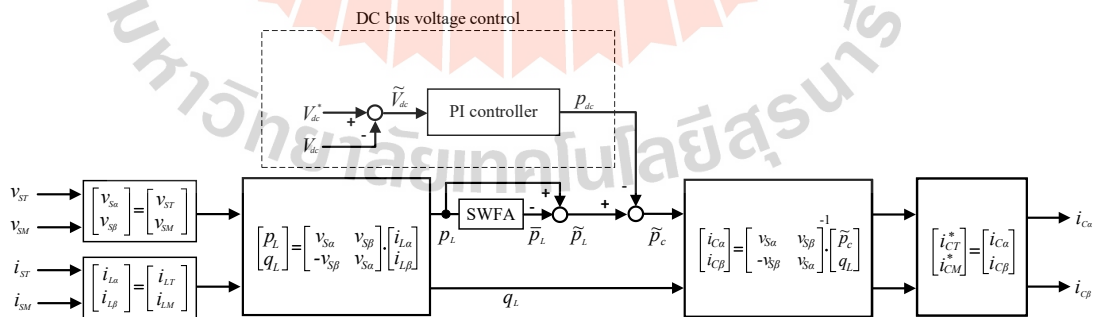
ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่า $C_{dc,min}$ จากสมการที่ (4.3) โดยแทนค่า V_{dc} เท่ากับ 1700 V และกำหนดให้ค่า ΔV_{dc} เท่ากับ 34 V ซึ่งมีค่าไม่เกินขอบเขต 2% ของค่า V_{dc} ดังนั้น จะสามารถคำนวณค่า $C_{dc,min}$ ได้เท่ากับ 37 mF แสดงดังนี้

$$C_{dc,min} = \frac{2141}{34 \times 1700} = 37 \text{ mF}$$

ขั้นตอนที่ 3 เลือกค่า C_{dc} ที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า $C_{dc,min}$ (37 mF) เพื่อสมรรถนะที่ดีในการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยที่ค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงจะต้องมีค่าอยู่ภายในขอบเขต 34 V ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกค่า C_{dc} เท่ากับ 45 mF

4.5 การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงร่วมกับส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF โดยเลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) ที่มีอินพุต คือ ค่าความผิดพลาดของแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ระหว่างแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (V_{dc}^*) และแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ที่วัดได้จากแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุซีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และกำหนดให้เอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ คือ กำลังไฟฟ้าดีซี (p_{dc}) ซึ่งจะถูกนำไปหักลบกับปริมาณฮาร์มอนิกของกำลังแอกทีฟ ($\tilde{p}_L$) เพื่อให้ได้มาซึ่งปริมาณของกำลังแอกทีฟที่ต้องการชดเชย ($\tilde{p}_c$) สำหรับใช้คำนวณหากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกต่อไป โดยสามารถแสดงแผนภาพการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (DC bus voltage control) ร่วมกับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพแสดงการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงร่วมกับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF

สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสามารถแบ่งได้ 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาสมการพลังงานที่ตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) ซึ่งเป็นแหล่งสะสมพลังงาน และจ่ายแรงดันบัลไฟตรงให้กับวงจรรอกกำลังแอทพี โดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.5) โดยที่ p_{dc} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าดีซีของตัวเก็บประจุดีซี

$$E_{dc} = \int p_{dc} dt = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \quad (4.5)$$

จากสมการที่ (4.5) ทำการจัดรูปสมการใหม่เพื่อหาค่า V_{dc} แสดงได้ดังสมการที่ (4.6)

$$V_{dc} = \sqrt{\frac{2}{C_{dc}} \int p_{dc} dt} \quad (4.6)$$

ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาสมการตัวควบคุมพีโอบนโดเมนเอส (s-domain) ดังสมการที่ (4.7) โดยกำหนดให้อินพุต คือ ค่า V_{dc} และเอาต์พุต คือ ค่า p_{dc}

$$p_{dc} = K_P V_{dc} + \frac{K_I}{s} V_{dc} \quad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.7) ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของตัวควบคุมพีโอได้ดังสมการที่ (4.8)

$$\frac{p_{dc}}{V_{dc}} = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (4.8)$$

ขั้นตอนที่ 3 สร้างบล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอทพี โดยใช้สมการที่ (4.6) และ (4.8) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 จากรูปดังกล่าว พบว่า บล็อกการหารากที่สองของค่า x ทำให้ระบบควบคุมดังกล่าวเป็นระบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นเพื่อทำให้ระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นจึงอาศัยการประมาณการหาค่ารากที่สองของค่า x โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.9) ถึง (4.11)

$$\sqrt{x} \approx \sqrt{x}|_{x=x_0} + \frac{d\sqrt{x}}{dt}|_{x=x_0} \cdot (x - x_0) \quad (4.9)$$

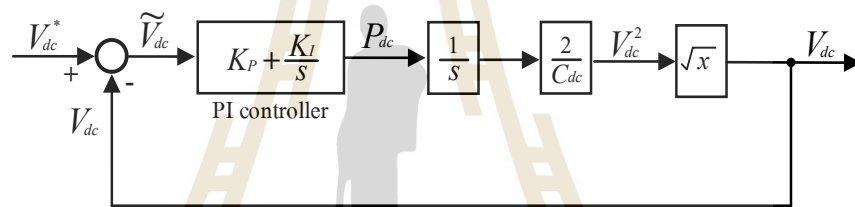
$$\sqrt{x} \approx \sqrt{x_0} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} \cdot (x - x_0) \quad (4.10)$$

$$\sqrt{x} \approx \frac{\sqrt{x_0}}{2} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} \cdot x \quad (4.11)$$

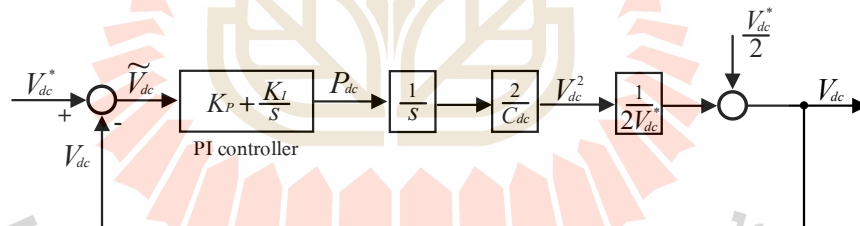
จากสมการที่ (4.11) แทนค่า $x_0 = (V_{dc}^*)^2$ และค่า $x = V_{dc}^2$ แสดงได้ดังสมการที่ (4.12)

$$\sqrt{V_{dc}^2} \approx \frac{V_{dc}^*}{2} + \frac{1}{2V_{dc}^*} \cdot V_{dc}^2 \quad (4.12)$$

จากสมการที่ (4.12) ผลลัพธ์การประมาณการหาค่ารากที่สองของค่า x ซึ่งสามารถนำไปสร้างบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่เป็นระบบเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 4.7 โดยจากระบบควบคุมดังกล่าวสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน ($T(s)$) ของระบบแสดงได้ดังสมการที่ (4.13)



รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 4.7 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่เป็นระบบเชิงเส้น

ขั้นตอนที่ 4 ออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมพีไอ โดยใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะ (Characteristic polynomial) ของฟังก์ชันถ่ายโอน ($T(s)$) ดังสมการที่ (4.13) และฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับสองมาตรฐานดังแสดงในสมการที่ (4.14) โดยผลการเทียบสัมประสิทธิ์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.15) ถึง (4.17)

$$T(s) = \frac{s^2 + 2BK_p s + 2BK_i/2}{s^2 + BK_p s + BK_i} \quad (4.13)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \quad (4.14)$$

$$s^2 + BK_p s + BK_I = s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2 \quad (4.15)$$

$$K_p = \frac{2\zeta\omega}{B} \quad (4.16)$$

$$K_I = \frac{\omega^2}{B} \quad (4.17)$$

โดยที่ ω คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\frac{4}{T_s\zeta}$
 สำหรับพิจารณาค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (e_{ss}) มีค่าเท่ากับ $\pm 2\%$

T_s คือ เวลาเข้าที่ (Settling time)

ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio)

B มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{C_{dc}V_{dc}^*}$

จากสมการที่ (4.16) และ (4.17) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_I ในงานวิจัย วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ค่า T_s เท่ากับ 0.05 วินาที และค่า ζ เท่ากับ 0.707 เนื่องจากต้องการการควบคุมที่รวดเร็วโดยไม่เกิดการพุ่งเกิน (Overshoot) ที่มากเกินไป โดยผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_I ได้ค่าเท่ากับ 12213 และ 977322 ตามลำดับ แสดงการคำนวณดังนี้

$$A = \frac{1}{45 \times 10^{-3} \times 1700} = 0.0131$$

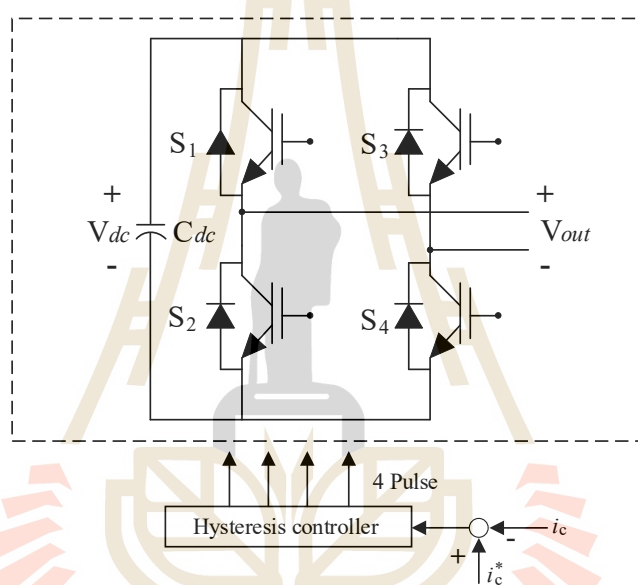
$$\omega = \frac{4}{0.05 \times 0.707} = 113.15 \text{ Hz}$$

$$K_p = \frac{2 \times 0.707 \times 113.15}{0.0131} = 12213$$

$$K_I = \frac{113.15^2}{0.0131} = 977322$$

4.6 การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรร่งกำลังแอทฟ

การกำจัฮารมอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมด้วยวงจรร่งกำลังแอทฟที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตช์กำลังไอจีบีที (IGBT) จำนวน 4 ตัว (S_1 ถึง S_4) ซึ่งใช้สำหรับฉีดกระแสชดเชยที่มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจัฮารมอนิก ซึ่งการดำเนินการดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้ตัวควบคุมกระแสชดเชย (Current controller) สร้างสัญญาณพัลส์ส่งไปยังอุปกรณ์สวิตช์กำลังไอจีบีทีเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 วงจรร่งกำลังแอทฟที่มีการควบคุมกระแสชดเชย

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis controller) เนื่องจากสามารถให้สมรรถนะการควบคุมกระแสที่ดี โครงสร้างของตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อน ออกแบบได้ง่าย ให้ผลตอบสนองต่อการควบคุมที่รวดเร็ว และเหมาะสำหรับการนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบดั้งเดิมหนึ่งแถบ (Single Band Hysteresis Current Controller : SBHCC) มีข้อเสียหลัก คือ มีจำนวนครั้งการสวิตช์ที่สูงทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่ตัวอุปกรณ์สวิตช์กำลังภายในวงจรร่งกำลังแอทฟสูงตามไปด้วย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวในปี ค.ศ. 2015 Hasan Komurcugil [1] จึงได้นำเสนอการออกแบบใช้ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบสองแถบ (Double Band Hysteresis Current Controller : DBHCC) ซึ่งพบว่าช่วยลดจำนวนครั้งการสวิตช์ได้ถึงสองเท่าเมื่อเทียบกับการควบคุม

ด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบหนึ่งแถบ โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอรายละเอียดการควบคุมกระแสชดเชยโดยแบ่งเป็นหัวข้อย่อย คือ การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบหนึ่งแถบ และการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบสองแถบ ดังนี้

4.6.1 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบหนึ่งแถบ

ลักษณะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบหนึ่งแถบ (Single Band Hysteresis Current Controller : SBHCC) [10] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 โดยมีแถบฮิสเตอร์ซิส (Hysteresis Band : HB) คือ ขอบเขตการสวิงของกระแสชดเชย ประกอบด้วย 2 ขอบเขต คือ ขอบเขตฮิสเตอร์ซิสบน (Upper hysteresis band) และขอบเขตฮิสเตอร์ซิสล่าง (Lower hysteresis band) ซึ่งกระแสชดเชยจะเพิ่มขึ้นและลดลงภายใน HB ตามหลักการควบคุมแบบฮิสเตอร์ซิส

การอธิบายรายละเอียดการควบคุมจะเริ่มต้นจากการพิจารณาแรงดันทางด้านเอาต์พุตของวงจรกรองกำลังแอกทีฟดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (4.18) ถึง (4.20)

$$-V_{ac} + V_{L_f} + V_L = 0 \quad (4.18)$$

$$V_{L_f} = V_{ac} - V_L \quad (4.19)$$

$$\frac{di_C}{dt} = \frac{V_{ac} - V_L}{L_f} \quad (4.20)$$

โดยที่ V_L คือ แรงดันที่จุดพิจารณากำจัดฮาร์มอนิกทางด้านฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลง มีค่าอยู่ระหว่าง -1414 V ถึง 1414 V

หลักการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC สามารถแบ่งเป็น 2 กรณีอธิบายได้ดังนี้

กรณีที่ 1 ถ้ากระแสชดเชยมีค่าน้อยกว่าเท่ากับขอบเขตฮิสเตอร์ซิสล่าง ($i_C \leq i_C^* - HB/2$) ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสจะสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมให้สวิตช์ S_1 และ S_4 นำกระแส (on) และ S_2 และ S_3 หยุดนำกระแส (off) ทำให้ได้แรงดันกระแสสลับเอาต์พุตของวงจรกรองกำลัง

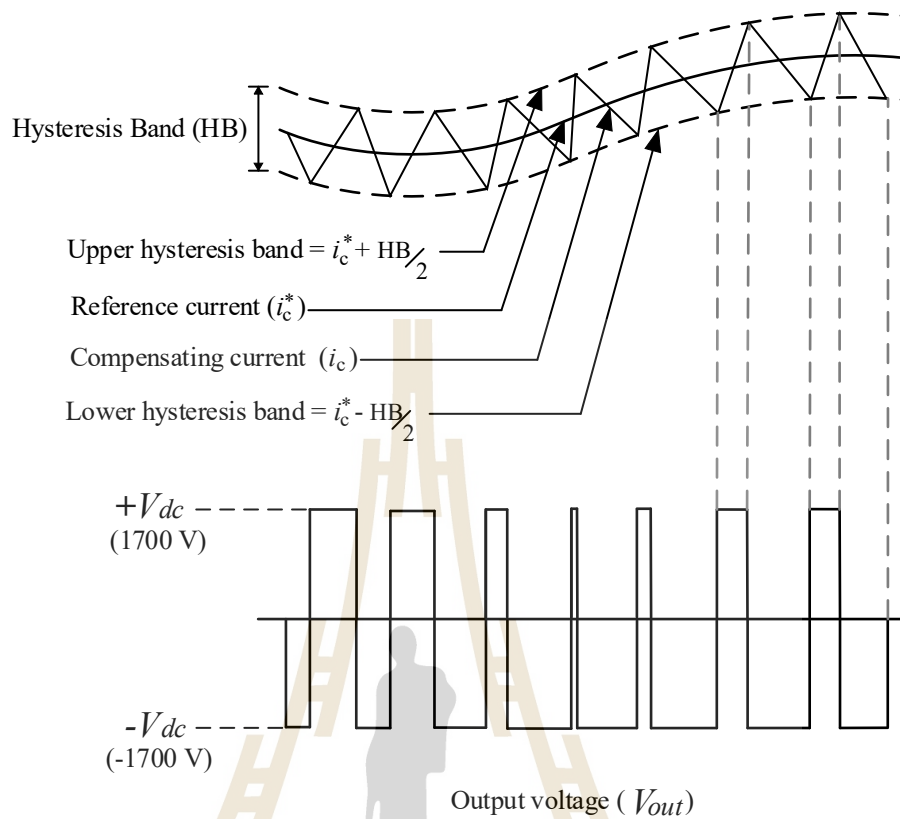
แอกทีฟ (V_{ac}) เท่ากับ $+V_{dc}$ (1700 V) และจากสมการที่ (4.20) จะได้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชยเทียบกับเวลามีค่าเป็นบวก ($+di_c/dt$) ส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้น

กรณีที่ 2 ถ้ากระแสชดเชยมีค่ามากกว่าเท่ากับขอบเขตฮิสเตอร์ซีสบน ($i_c \geq i_c^* + HB/2$) ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซีสจะสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมให้สวิตช์ S_2 และ S_3 นำกระแส (on) และ S_1 และ S_4 หยุดนำกระแส (off) ทำให้ได้แรงดันกระแสกลับเอาต์พุต V_{ac} เท่ากับ $-V_{dc}$ (-1700 V) และจากสมการที่ (4.20) จะได้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชยเทียบกับเวลามีค่าเป็นลบ ($-di_c/dt$) ส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าลดลง

การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC จะสลับการทำงานกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ไปตลอดช่วงการฉีดกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ผลจากการควบคุมดังกล่าวทำให้กระแสชดเชยมีค่าสลับอยู่ภายใน HB ที่มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก โดยสามารถแสดงตารางสรุปการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC

เงื่อนไขการควบคุม	สถานะของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง	การเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชย
กรณีที่ 1 $i_c \leq i_c^* - HB/2$	S_1 (on) S_3 (off) S_2 (off) S_4 (on)	เพิ่มขึ้น
กรณีที่ 2 $i_c \geq i_c^* + HB/2$	S_1 (off) S_3 (on) S_2 (on) S_4 (off)	ลดลง



รูปที่ 4.9 การควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุม SBHCC

การออกแบบค่า HB ของตัวควบคุม SBHCC สามารถทำได้โดยพิจารณาสมการที่ (4.20) แบบประมาณจุดต่อจุด ทำให้ได้สมการการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชยเทียบกับเวลาตั้งสมการที่ (4.21)

$$\frac{\Delta i_C}{\Delta t} = \frac{V_{ac} - V_L}{L_f} \quad (4.21)$$

พิจารณารอบการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง S_1 และ S_4 ในช่วงนำกระแส (t_{on}) ซึ่งจะมีแรงดันกระแสสลับ (V_{ac}) เท่ากับ $+V_{dc}$ ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชย (Δi_C) มีขนาดเท่ากับ HB และในช่วงหยุดนำกระแส (t_{off}) จะมีแรงดันกระแสสลับ (V_{ac}) เท่ากับ $-V_{dc}$ ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชย (Δi_C) มีขนาดเท่ากับ -HB ดังนั้น จากสมการที่ (4.21) สามารถแสดงเวลาช่วงนำกระแส (t_{on}) และช่วงหยุดเวลานำกระแส (t_{off}) ของอุปกรณ์สวิตช์กำลัง S_1 และ S_4 ได้ตั้งสมการที่ (4.22) และ (4.23) ตามลำดับ

$$t_{on} = \frac{HB \cdot L_f}{V_{dc} - V_L} \quad (4.22)$$

$$t_{off} = \frac{-HB \cdot L_f}{-V_{dc} - V_L} \quad (4.23)$$

จากสมการที่ (4.22) และ (4.23) สามารถหาความถี่สวิตช์ (f_{sw}) ได้ดังสมการที่ (4.24)

$$f_{sw} = \frac{1}{T_{sw}} = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} = \frac{V_{dc}^2 - V_L^2}{2HB \cdot L_f \cdot V_{dc}} \quad (4.24)$$

จากสมการที่ (4.24) จะได้สมการการออกแบบค่า HB ดังสมการที่ (4.25)

$$HB = \frac{V_{dc}^2 - V_L^2}{2f_{sw} \cdot L_f \cdot V_{dc}} \quad (4.25)$$

จากสมการที่ (4.25) เมื่อพิจารณาให้ค่า V_L เท่ากับศูนย์จะได้ค่า HB สูงสุด (HB_{max}) ดังสมการที่ (4.26)

$$HB_{max} = \frac{V_{dc}^2}{2f_{sw} \cdot L_f \cdot V_{dc}} \quad (4.26)$$

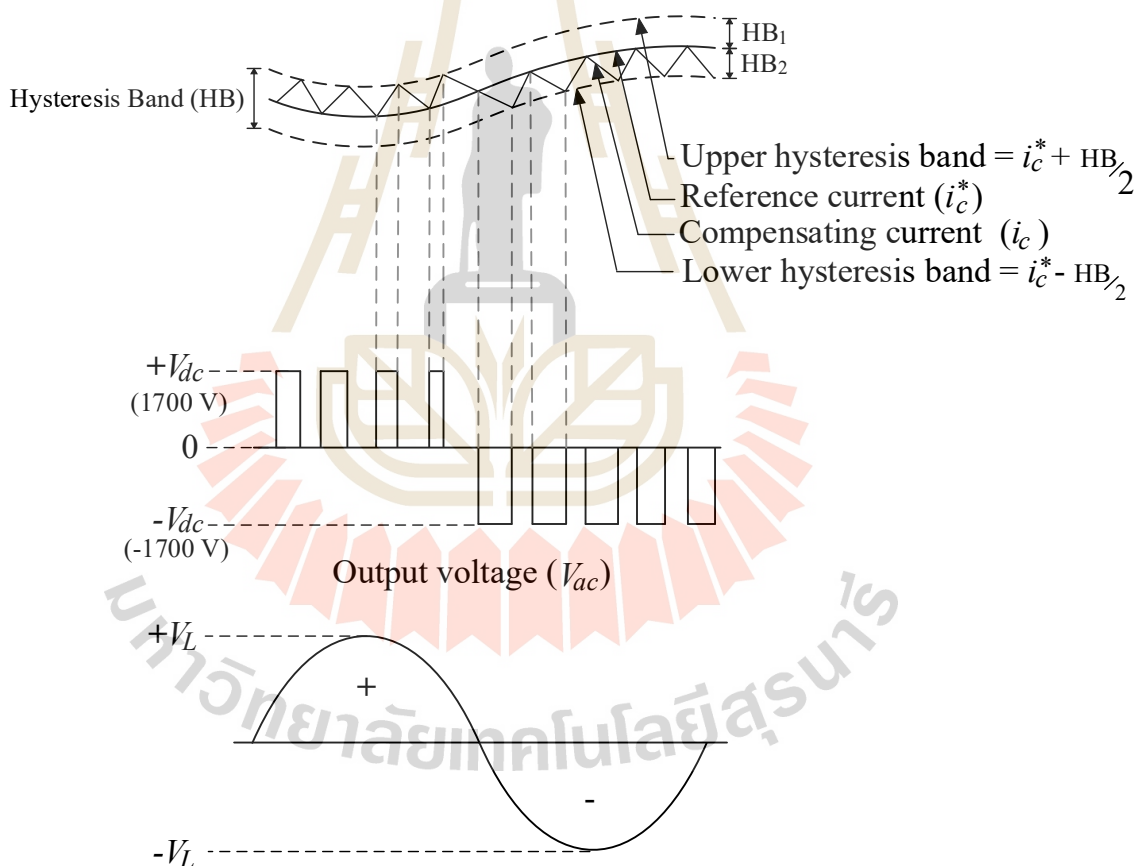
จากสมการที่ (4.26) กำหนดให้ค่า f_{sw} เท่ากับ 100 kHz ดังนั้น ค่า HB_{max} สามารถคำนวณได้เท่ากับ 170 A แสดงดังนี้

$$HB_{max} = \frac{(1700)^2}{2(100 \times 10^3) \times (0.05 \times 10^{-3}) \times 1700} = 170 \text{ A}$$

การออกแบบค่า HB จะอาศัยการเลือกค่าที่มีขนาดไม่เกินค่า HB_{max} โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ค่า HB เท่ากับ 20 A เนื่องจากผลการจำลองสถานการณ์ให้จำนวนครั้งการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีทีที่ไม่สูงมาก และประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีโดยมีค่า %THD ไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

4.6.2 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบสองแถบ

ลักษณะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบสองแถบ (Double Band Hysteresis Current Controller : DBHCC) [1] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 โดยประกอบด้วย 2 แถบฮิสเตอร์ซิส คือ แถบฮิสเตอร์ซิสที่หนึ่ง (HB_1) และแถบฮิสเตอร์ซิสที่สอง (HB_2) ซึ่งทั้งสองแถบจะมีขนาดเท่ากัน และมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของ HB ของตัวควบคุม SBHCC โดยกระแสชดเชยจะสวิตช์ภายในแถบฮิสเตอร์ซิสแถบที่หนึ่งและแถบที่สองตามช่วงรูปสัญญาณซิกบวกและซิกลบของแรงดันที่จุดพิจารณาการจัดฮาร์โมนิกทางด้านฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลง (V_L) โดยกรณีที่แรงดันเป็นซิกบวกระแสชดเชยจะสวิตช์ภายในขอบเขตของแถบฮิสเตอร์ซิสที่หนึ่ง และในส่วนกรณีที่แรงดันเป็นซิกลบกระแสชดเชยจะสวิตช์ภายในขอบเขตของแถบฮิสเตอร์ซิสที่สอง

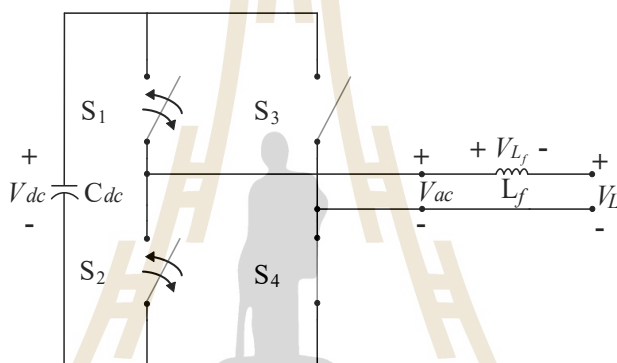


Voltage on the low-voltage side of transformer (V_L)

รูปที่ 4.10 ลักษณะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC

การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ประกอบด้วยแถบฮีสเทอรีซิสที่หนึ่ง (HB_1) และแถบฮีสเทอรีซิสที่สอง (HB_2) โดยสามารถอธิบายหลักการควบคุมกระแสชดเชยภายในแถบฮีสเทอรีซิสทั้งสองแถบได้ดังนี้

การควบคุมกระแสของแถบฮีสเทอรีซิสที่หนึ่ง (HB_1) : กระแสชดเชยภายใน HB_1 มีขอบเขตการสวิงอยู่ระหว่างขอบเขตฮีสเทอรีซิสบนและกระแสอ้างอิง และมีสถานะการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที (S_1 ถึง S_4) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากรูปดังกล่าวกำหนดให้สวิตช์ S_3 หยุดนำกระแส (off) และ S_4 นำกระแส (on) ตลอดช่วงการสวิงของกระแสชดเชยภายใน HB_1 ในขณะที่สวิตช์ S_1 และ S_2 จะนำกระแส (on) และหยุดนำกระแส (off) ตามหลักการควบคุม ซึ่งสามารถอธิบายได้ต่อไป



รูปที่ 4.11 ลักษณะการทำงานของสวิตช์ไอจีบีทีในช่วงแถบฮีสเทอรีซิสที่หนึ่ง

การอธิบายรายละเอียดหลักการควบคุมจะพิจารณาทางด้านเอาต์พุตของวงจรกรองกำลังแอกทีฟดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.27) ถึง (4.29) และสามารถแบ่งเงื่อนไขการควบคุมเป็น 2 กรณี ดังนี้

$$-V_{ac} + V_{L_f} + V_L^+ = 0 \quad (4.27)$$

$$V_{L_f} = V_{ac} - V_L^+ \quad (4.28)$$

$$\frac{di_C}{dt} = \frac{V_{ac} - V_L^+}{L_f} \quad (4.29)$$

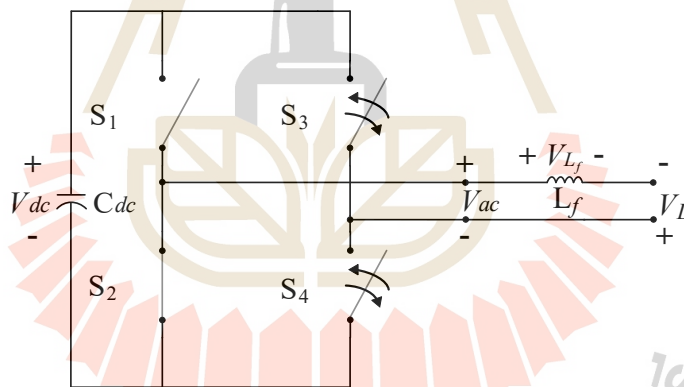
โดยที่ V_L^+ คือ แรงดันที่จุดพิจารณากำจัดฮาร์โมนิกทางด้านฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลง ชีกบวกที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1414 V

กรณีที่ 1 ถ้ากระแสชดเชยมีค่าน้อยกว่าเท่ากับกระแสอ้างอิง ($i_c \leq i_c^*$) ตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสจะสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมให้สวิตช์ S_1 นำกระแส (on) และ S_2 หยุดนำกระแส (off)

ส่งผลให้ได้แรงดันเอาต์พุต V_{ac} เท่ากับ $+V_{dc}$ (1700 V) และจากสมการที่ (4.29) จะได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชยเทียบกับเวลามีค่าเป็นบวก ($+di_C/dt$) จึงส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้น

กรณีที่ 2 ถ้ากระแสชดเชยมีค่ามากกว่าเท่ากับขอบเขตฮิสเตอร์ซีสบน ($i_C \geq i_C^* + HB/2$) ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซีสจะสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมให้สวิตช์ S_1 หยุดนำกระแส (off) และ S_2 นำกระแส (on) ส่งผลให้ได้แรงดันเอาต์พุต V_{ac} เท่ากับ 0 และจากสมการที่ (4.29) จะได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชยเทียบกับเวลามีค่าเป็นลบ ($-di_C/dt$) จึงส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าลดลง

การควบคุมกระแสของแถบฮิสเตอร์ซีสที่สอง (HB_2) : กระแสชดเชยภายใน HB_2 มีขอบเขตการสวิงอยู่ระหว่างกระแสอ้างอิงและขอบเขตฮิสเตอร์ซีสล่าง และมีสถานะการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที (S_1 ถึง S_4) ดังแสดงในรูปที่ 4.12 จากรูปดังกล่าวกำหนดให้สวิตช์ S_1 หยุดนำกระแส (off) และ S_2 นำกระแส (on) ตลอดช่วงการสวิงของกระแสชดเชยภายใน HB_2 และสวิตช์ S_3 และ S_4 จะนำกระแส (on) และหยุดนำกระแส (off) ตามหลักการควบคุมต่อไปนี้



รูปที่ 4.12 ลักษณะการทำงานของสวิตช์ไอจีบีทีในช่วงแถบฮิสเตอร์ซีสที่สอง

การอธิบายรายละเอียดหลักการควบคุมจะมีลักษณะเช่นเดียวกับช่วงของแถบฮิสเตอร์ซีสที่หนึ่ง เมื่อพิจารณาทางด้านเอาต์พุตของวงจรรองกำลังแอกทีฟดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.30) ถึง (4.32) ซึ่งสามารถแบ่งเงื่อนไขการควบคุมเป็น 2 กรณี ดังนี้

$$-V_{ac} + V_{L_f} - V_L^- = 0 \quad (4.30)$$

$$V_{L_f} = V_{ac} + V_L^- \quad (4.31)$$

$$\frac{di_C}{dt} = \frac{V_{ac} + V_L^-}{L_f} \quad (4.32)$$

โดยที่ V_L^- คือ แรงดันที่จุดพิจารณากำจัดฮาร์มอนิกทางด้านฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงชีกลบที่มีค่าอยู่ระหว่าง -1414 ถึง 0 V

กรณีที่ 1 ถ้ากระแสชดเชยมีค่าน้อยกว่าเท่ากับขอบเขตฮีสเตอร์ซีส์ล่าง ($i_C \leq i_C^* - HB/2$) ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีส์จะสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมให้สวิตช์ S_3 หยุดนำกระแส (off) และ S_4 นำกระแส (on) ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุต V_{ac} เท่ากับ 0 และจากสมการที่ (4.32) จะได้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชยเทียบกับเวลาที่มีค่าเป็นบวก ($+di_C/dt$) ส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้น

กรณีที่ 2 ถ้ากระแสชดเชยมีค่ามากกว่าเท่ากับกระแสอ้างอิง ($i_C \geq i_C^*$) ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซีส์จะสร้างสัญญาณพัลส์ควบคุมให้สวิตช์ S_3 นำกระแส (on) และ S_4 หยุดนำกระแส (off) ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุต V_{ac} เท่ากับ $-V_{dc}$ (-1700 V) และจากสมการที่ (4.32) จะได้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชยเทียบกับเวลาที่มีค่าเป็นลบ ($-di_C/dt$) จึงส่งผลให้กระแสชดเชยมีค่าลดลง

การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC จะสลับการทำงานภายใน HB_1 และ HB_2 ไปตลอดช่วงการฉีดกระแสชดเชย ผลการควบคุมดังกล่าว ทำให้กระแสชดเชยมีการสวิตช์อยู่ภายใน HB ที่มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF และยังสามารถช่วยลดจำนวนครั้งการสวิตช์ได้ถึงสองเท่าเมื่อเทียบกับการควบคุมด้วยตัวควบคุม SBHCC โดยสามารถแสดงตารางสรุปการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC

ขอบเขตการสวิงของ กระแสชดเชย	เงื่อนไขการควบคุม	สถานะของอุปกรณ์สวิตช์ ไอจีบีที		การเปลี่ยนแปลง ของกระแสชดเชย
ภายในแถบฮีสเตอร์ ซิสต์ที่หนึ่ง (HB_1)	กรณีที่ 1 $i_C \leq i_C^*$	S_1 (on) S_2 (off)	S_3 (on) S_4 (off)	เพิ่มขึ้น
	กรณีที่ 2 $i_C \geq i_C^* + HB/2$	S_1 (off) S_2 (on)		ลดลง
ภายในแถบฮีสเตอร์ ซิสต์ที่สอง (HB_2)	กรณีที่ 1 $i_C \leq i_C^* - HB/2$	S_3 (off) S_4 (on)	S_1 (off) S_2 (on)	เพิ่มขึ้น
	กรณีที่ 2 $i_C \geq i_C^*$	S_3 (on) S_4 (off)		ลดลง

การออกแบบค่าแถบฮีสเตอร์ซิสต์ที่หนึ่ง (HB_1) และค่าแถบฮีสเตอร์ซิสต์ที่สอง (HB_2) ของตัวควบคุม DBHCC จะกำหนดให้ทั้งสองแถบมีขนาดเท่ากันเพื่อความสมมาตรของกระแสชดเชยที่สวิงอยู่ภายใน HB ดังนั้นการออกแบบจึงสามารถพิจารณาการทำงานเฉพาะสวิตช์ S_1 ภายในแถบฮีสเตอร์ซิสต์ที่หนึ่ง (HB_1) ได้ โดยในช่วงนำกระแส (t_{on}) ค่าแรงดันเอาต์พุต V_{ac} เท่ากับ $+V_{dc}$ และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชย (Δi_C) มีขนาดเท่ากับ $+HB_1$ และในช่วงหยุดนำกระแส (t_{off}) ค่าแรงดันเอาต์พุต V_{ac} เท่ากับ 0 และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชย (Δi_C) มีขนาดเท่ากับ $-HB_1$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.21) สามารถแสดงช่วงเวลานำกระแส (t_{on}) และช่วงเวลาหยุดนำกระแส (t_{off}) ได้ดังสมการที่ (4.33) และ (4.34) ตามลำดับ

$$t_{on} = \frac{(HB_1) \cdot L_f}{V_{dc} - V_L} \quad (4.33)$$

$$t_{off} = \frac{(HB_1) \cdot L_f}{V_L} \quad (4.34)$$

จากสมการที่ (4.33) และ (4.34) สามารถหาความถี่สวิตช์ (f_{sw}) ได้ดังสมการที่ (4.35)

$$f_{sw} = \frac{1}{T_{sw}} = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} = \frac{V_L (V_{dc} - V_L)}{HB_1 \cdot L_f \cdot V_{dc}} \quad (4.35)$$

จากสมการที่ (4.35) จะได้สมการการออกแบบค่า HB_1 ดังสมการที่ (4.36)

$$HB_1 = \frac{V_L (V_{dc} - V_L)}{f_{sw} \cdot L_f \cdot V_{dc}} \quad (4.36)$$

จากสมการที่ (4.36) เมื่อค่า V_L มีค่ามากที่สุด ($V_{L,max} = 1414 \text{ V}$) จะได้ค่าแถบฮีสเตอร์ซิสที่หนึ่งสูงสุด ($HB_{1,max}$) ดังสมการที่ (4.37)

$$HB_{1,max} = \frac{V_{L,max} (V_{dc} - V_{L,max})}{f_{sw} \cdot L_f \cdot V_{dc}} \quad (4.37)$$

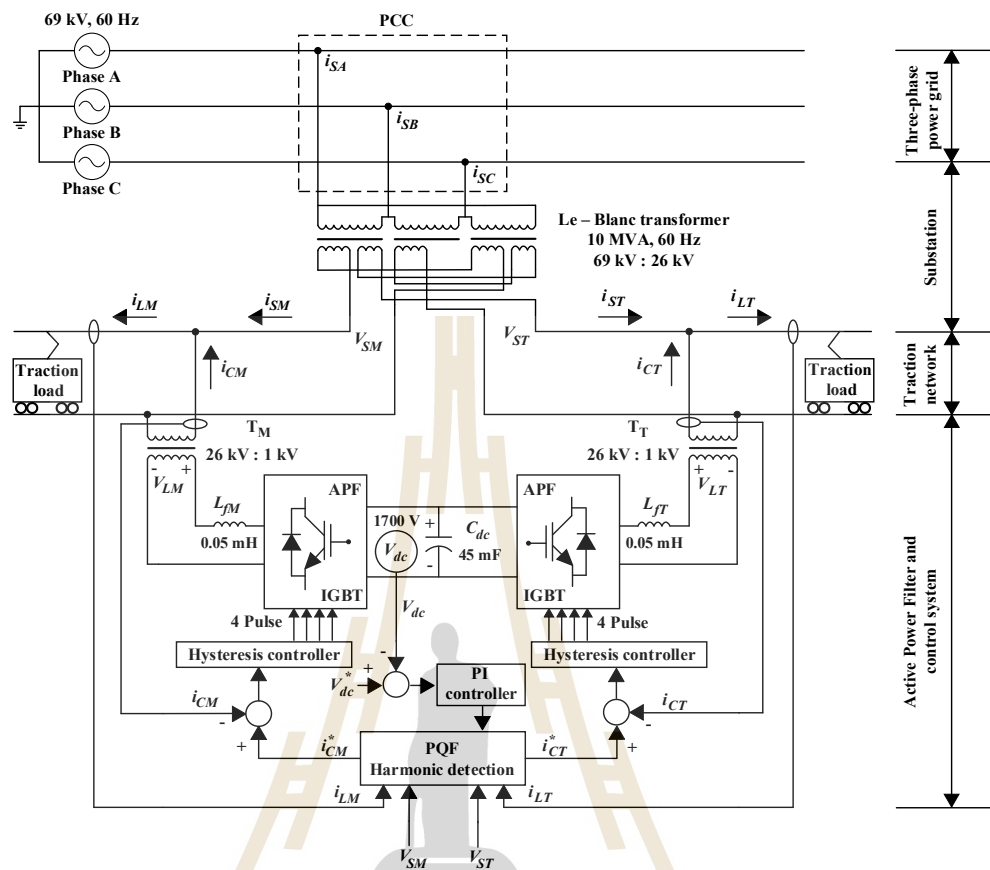
จากสมการที่ (4.37) กำหนดให้ค่า f_{sw} เท่ากับ 100 kHz ดังนั้น ค่า $HB_{1,max}$ ซึ่งกำหนดให้เท่ากับค่าแถบฮีสเตอร์ซิสที่สองสูงสุด ($HB_{2,max}$) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$HB_{1,max} = HB_{2,max} = \frac{1414 \times (1700 - 1414)}{(100 \times 10^3) \times (0.05 \times 10^{-3}) \times 1700} = 95 \text{ A}$$

โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ค่า HB_1 และ HB_2 มีค่าเท่ากันเท่ากับ 10 A ซึ่งมีค่าไม่เกินค่า $HB_{1,max}$ และค่า $HB_{2,max}$ ซึ่งเป็นค่าที่ให้จำนวนครั้งการสวิตช์ไม่สูงมาก และมีค่า %THD ไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

4.7 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB เพื่อทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ได้ออกแบบ และทดสอบสมรรถนะระบบควบคุมของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งประกอบด้วยการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีโอ โดยระบบสำหรับจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 จากระบบดังกล่าว ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก การทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC และตัวควบคุม DBHCC และการทดสอบสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีโอสามารถดูได้จากหัวข้อต่อไป



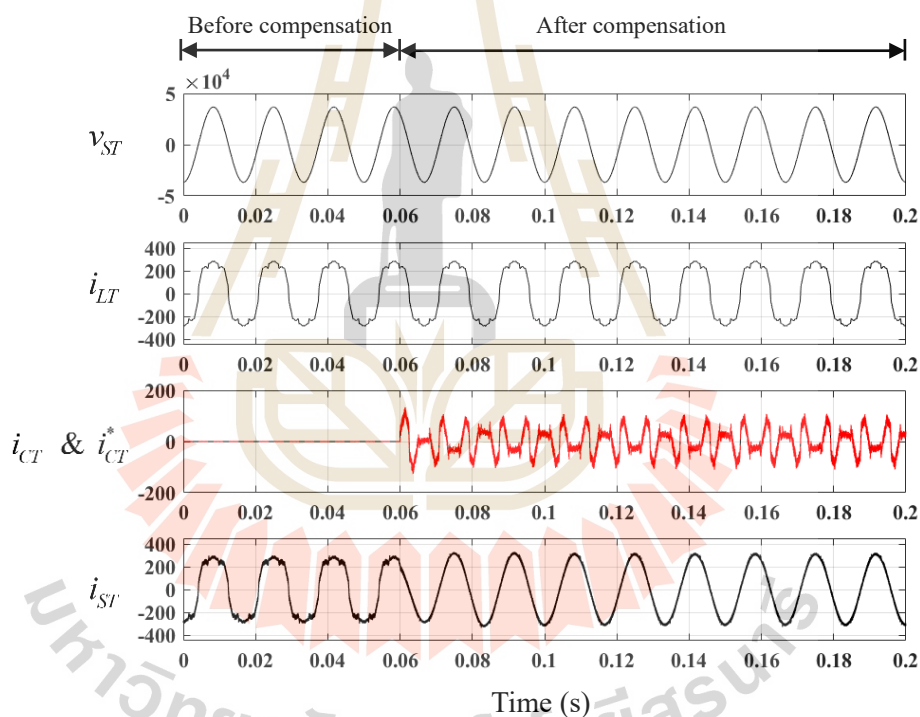
รูปที่ 4.13 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

4.7.1 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

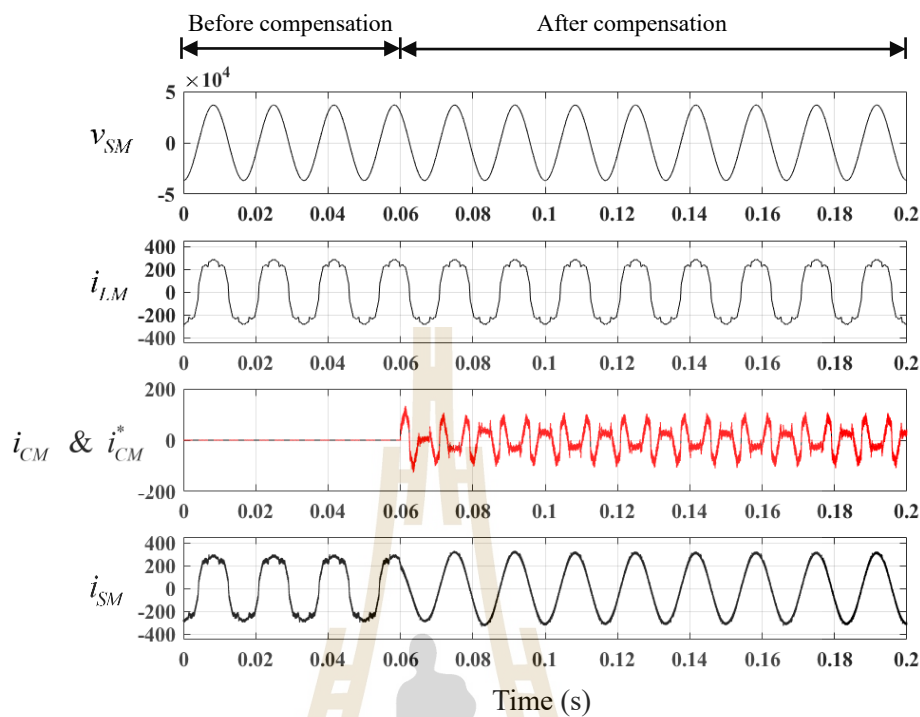
การจำลองสถานการณ์ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมดังรูปที่ 4.13 โดยมีค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและตัวควบคุมแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งในหัวข้อนี้จะมุ่งเน้นการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกระหว่างการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC และตัวควบคุม DBHCC โดยผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยตัวควบคุมกระแสชดเชยทั้งสองรูปแบบที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 ถึง 4.17 ในขณะที่ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 ถึง 4.19 โดยกำหนดระยะเวลาในการจำลองสถานการณ์ทั้งหมด 0.2 วินาที และกำหนดให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟเริ่มฉีดกระแสชดเชย (i_{CT} และ i_{CM}) เข้าสู่ระบบรางไฟฟ้าตั้งแต่วันที่ 0.06 วินาที เป็นต้นไป

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบก่าจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

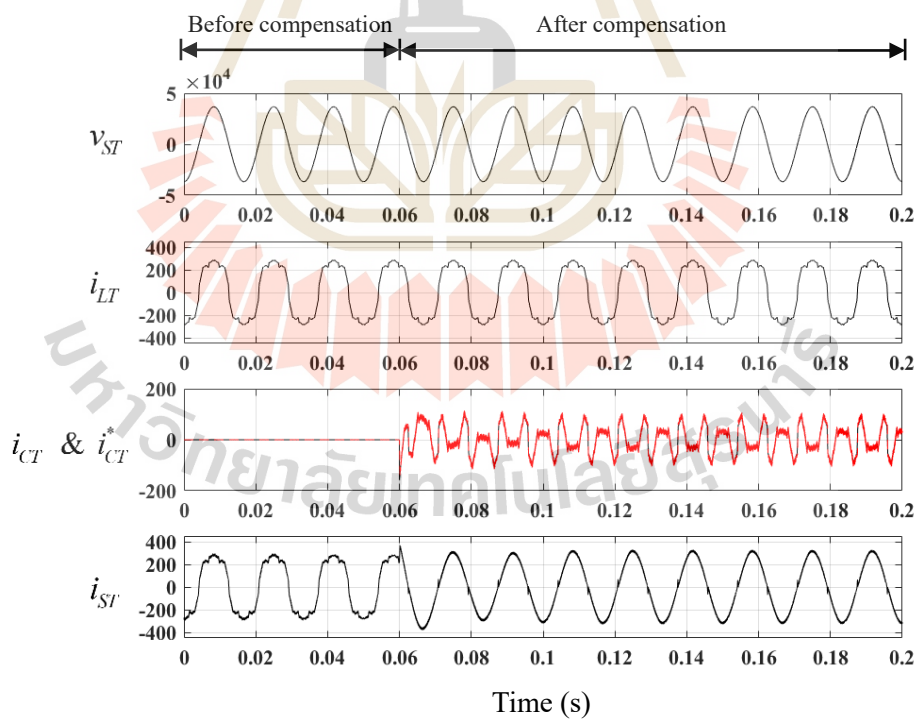
วงจรรอกกำลังแอกทีฟ	ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรอก (L_f)	0.05 mH
	ตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc})	45 mF
	แรงดันบัสไฟตรง (V_{dc})	1700 V
ตัวควบคุมพีไอ	ค่าพารามิเตอร์ K_p	12213
	ค่าพารามิเตอร์ K_i	977322
ค่า HB	ตัวควบคุม SBHCC	20 A
	ตัวควบคุม DBHCC	



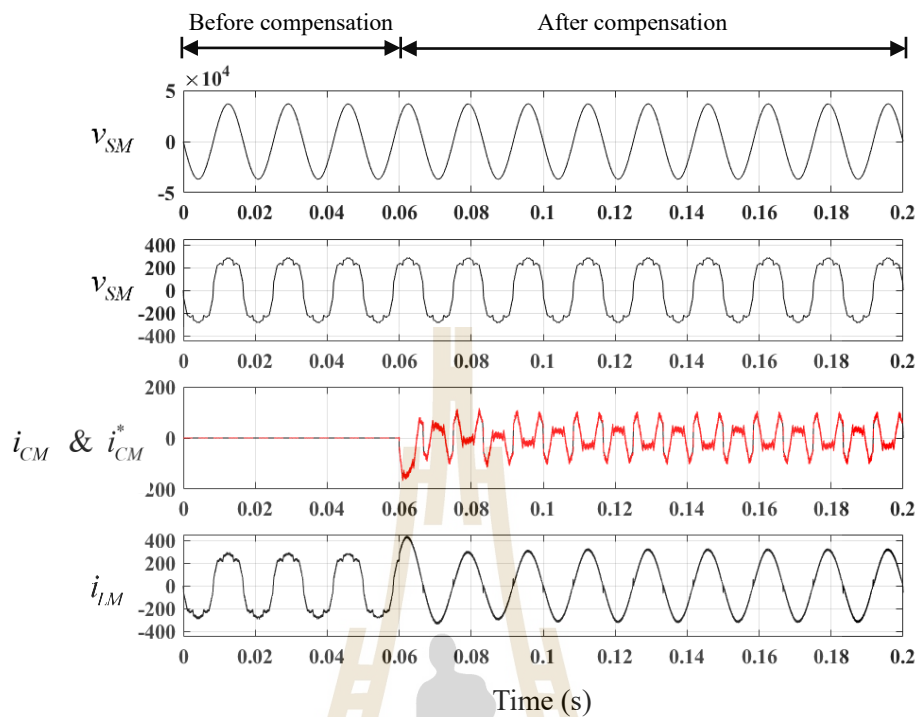
รูปที่ 4.14 ผลการก่าจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในกรณีใช้ตัวควบคุม SBHCC สำหรับเฟส T



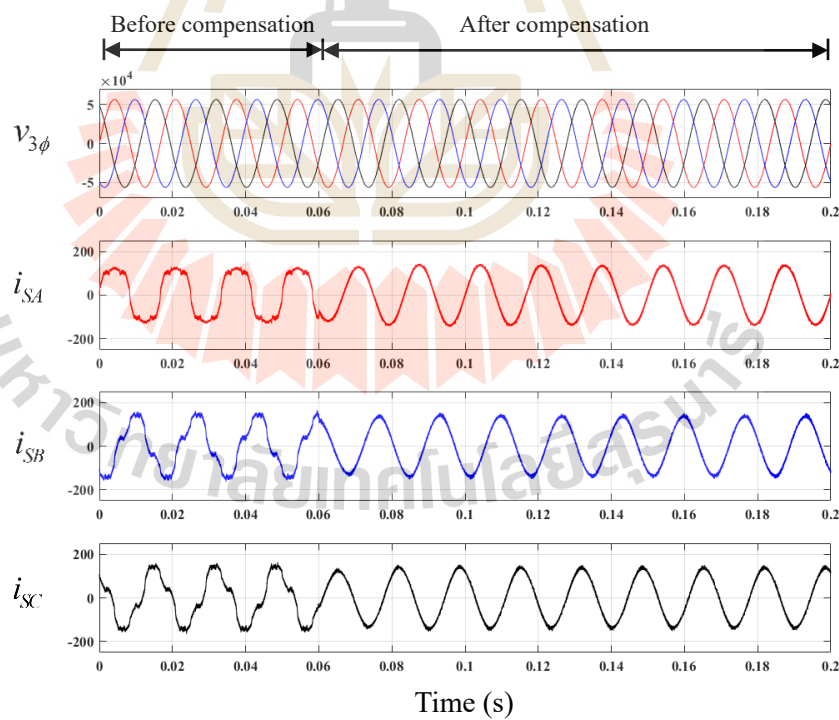
รูปที่ 4.15 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในกรณีใช้ตัวควบคุม SBHCC สำหรับเฟส M



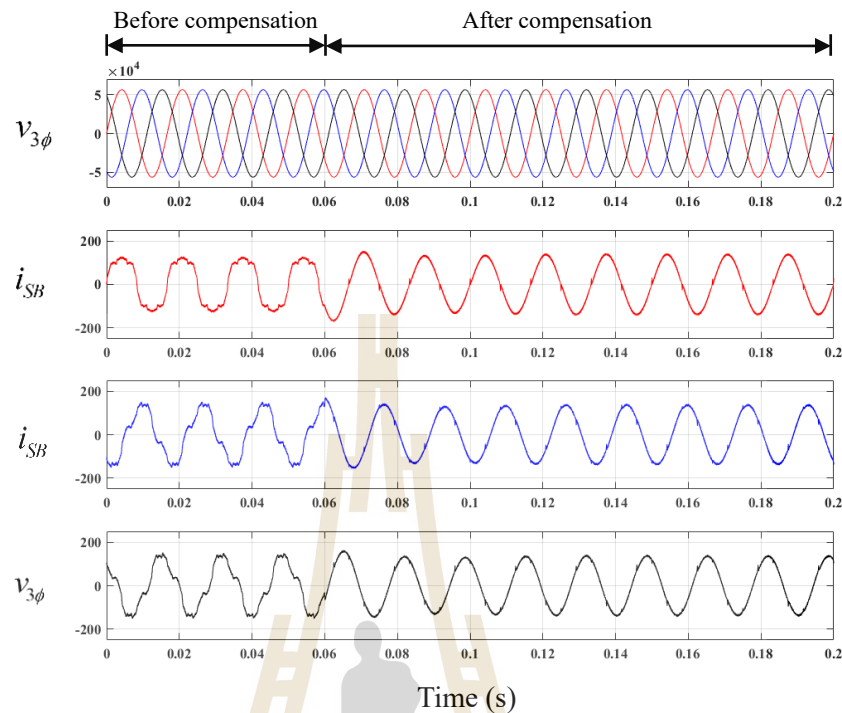
รูปที่ 4.16 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC สำหรับเฟส T



รูปที่ 4.17 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมในกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC สำหรับเฟส M



รูปที่ 4.18 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสในกรณีใช้ตัวควบคุม SBHCC

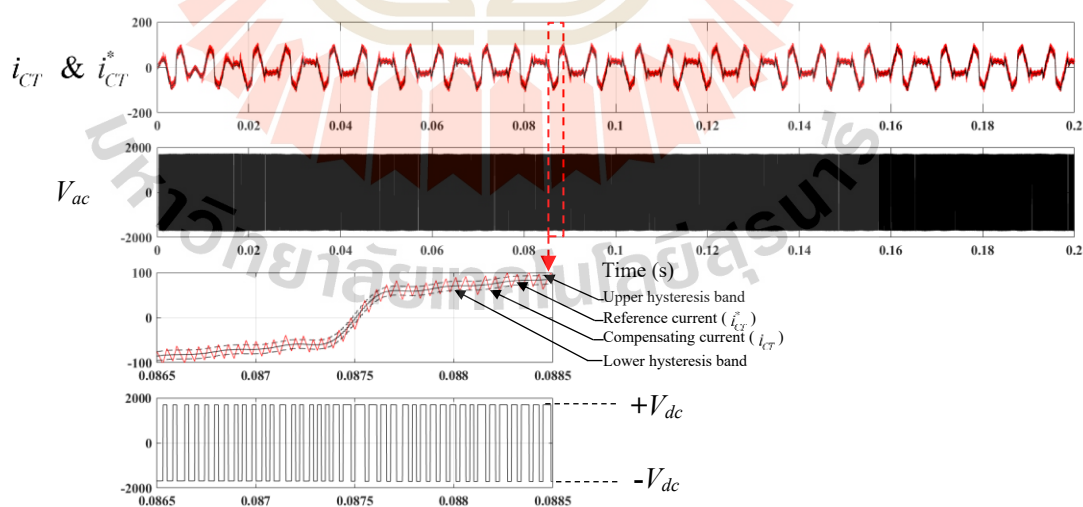


รูปที่ 4.19 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสในกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC

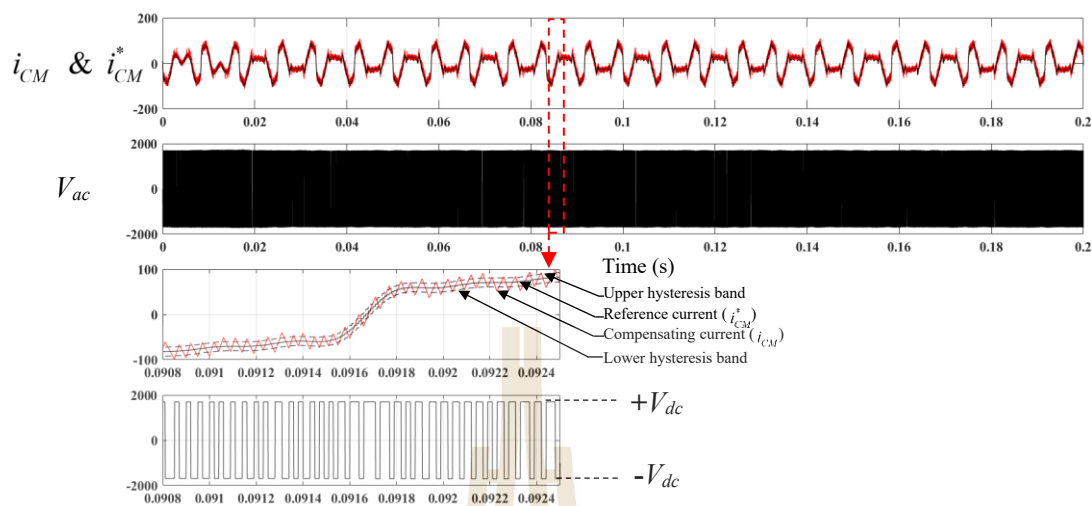
จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมนดังรูปที่ 4.14 ถึง 4.17 สังเกตได้ว่า ก่อนฉีดกระแสชดเชยตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.06 วินาที กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) มีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์เช่นเดียวกับกระแสโหลด (i_{LT} , i_{LM}) โดยวัดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายก่อนการชดเชยได้เท่ากับ 22.16% จากนั้นตั้งแต่เวลา 0.04 วินาที เป็นต้นไป เมื่อวงจรรอกำลังแยกที่ฉีดกระแสชดเชย (i_{CT} , i_{CM}) ที่มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง (i_{CT}^* , i_{CM}^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF เข้าสู่ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาพบว่า กระแสที่แหล่งจ่ายกลับมาเป็นรูปไซน์ภายหลังการชดเชย โดยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายในเฟส T และเฟส M ลดลงเหลือเท่ากับ 4.7% และ 4.6% ตามลำดับ สำหรับกรณีใช้ตัวควบคุม SBHCC และลดลงเหลือเท่ากับ 4.0% และ 3.9% ตามลำดับเฟส สำหรับกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC นอกจากนี้ จากผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมนดังกล่าว ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) ภายหลังการชดเชยกลับมาเป็นรูปไซน์ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ถึง 4.19 และมีค่า %THD ภายหลังการชดเชยในกรณีใช้ตัวควบคุม SBHCC เท่ากับ 4.8% 4.8% และ 4.6% ตามลำดับเฟส และสำหรับในกรณีตัวควบคุม DBHCC มีค่า %THD เท่ากับ 3.9% 4.0% และ 4.0% ตามลำดับเฟส โดยสามารถแสดงสรุปค่า %THD ได้ดังตารางที่ 4.4

4.7.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC และตัวควบคุม DBHCC

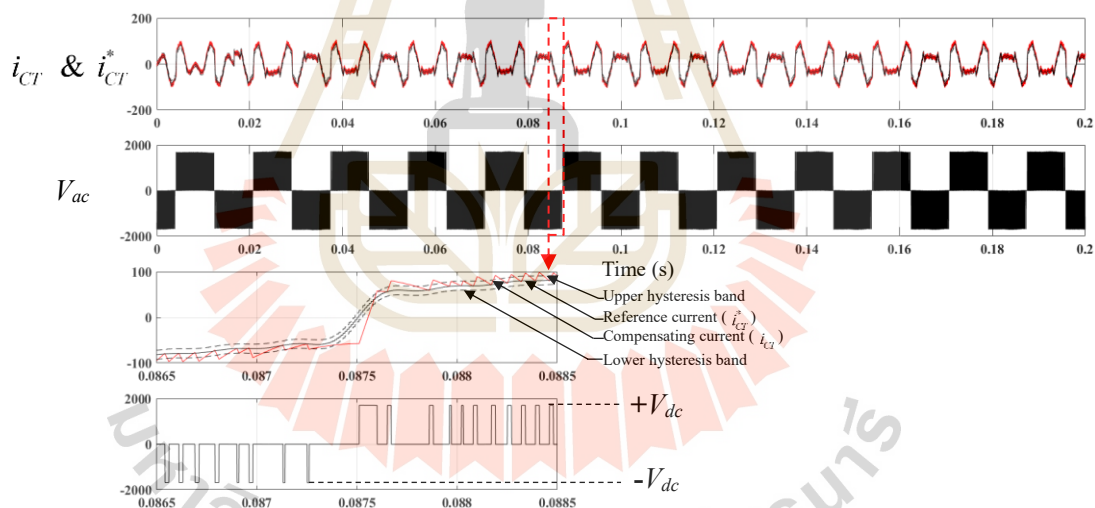
การจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC และตัวควบคุม DBHCC ที่ได้จากการออกแบบในหัวข้อที่ผ่านมา สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.20 ถึง 4.23 จากรูปดังกล่าว พบว่า ทั้งตัวควบคุม SBHCC และตัวควบคุม DBHCC สามารถควบคุมกระแสชดเชย (i_C) ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง (i_C^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF และ สังเกตได้ว่าในช่วงกระแสอ้างอิงมีความชันสูง กรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC จะมีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีกว่ากรณีใช้ตัวควบคุม SBHCC แต่อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมกระแสชดเชยทั้งสองรูปแบบจะให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก โดยสามารถดูผลการกำจัดฮาร์มอนิกได้ในหัวข้อที่ 4.7.1 ซึ่งกระแสชดเชยที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม DBHCC จะสวิงอยู่ภายในแถบฮิสเตอร์ซิสที่หนึ่ง (HB_1) และแถบฮิสเตอร์ซิสที่สอง (HB_2) ที่มีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของ HB ในตัวควบคุม SBHCC นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าแรงดันเอาต์พุต V_{ac} ของวงจรรอกกำลังแยกที่ภายใต้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC พบว่า มีสองระดับ คือ $+V_{dc}$ และ $-V_{dc}$ ซึ่งแตกต่างกับตัวควบคุม DBHCC ที่มีแรงดันสามระดับ คือ $+V_{dc}$ 0 และ $-V_{dc}$ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการควบคุมโดยตัวควบคุม DBHCC ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนครั้งการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ ไอจีบีทีในวงจรรอกกำลังแยกที่



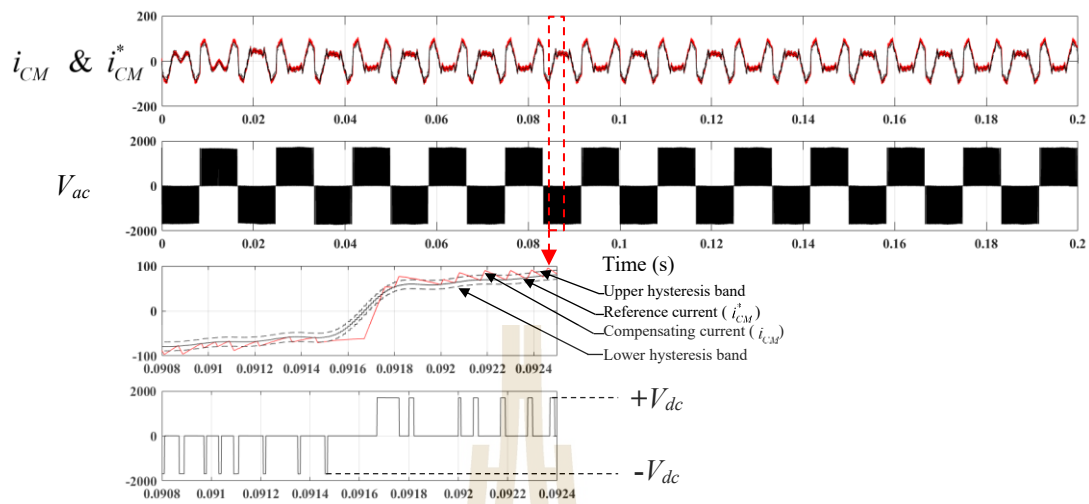
รูปที่ 4.20 ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC ในเฟส T



รูปที่ 4.21 ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC ในเฟส M



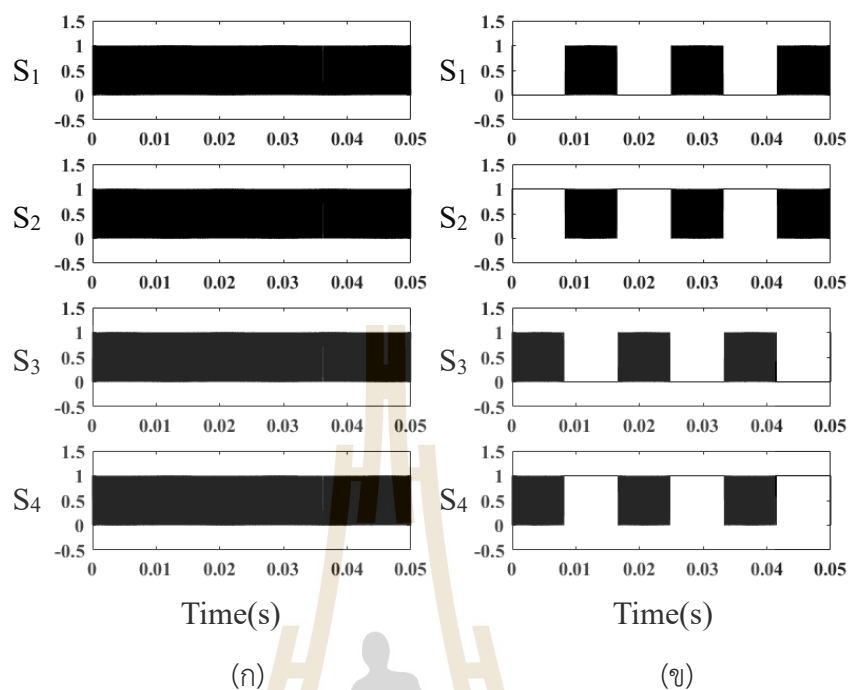
รูปที่ 4.22 ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ในเฟส T



รูปที่ 4.23 ผลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ในเฟส M

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกและจำนวนครั้งการสวิตช์ของอุปกรณ์ไอจีบีทีระหว่างกรณีใช้ตัวควบคุม SBHCC และตัวควบคุม DBHCC ดังตารางที่ 4.4 จากตารางพบว่า การควบคุมกระแสชดเชยทั้งสองรูปแบบให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม โดยมีค่า %THD ต่ำกว่า 5% ภายหลังจากชดเชยซึ่งเป็นไปตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 นอกจากนี้ตัวควบคุม DBHCC ยังสามารถลดจำนวนครั้งการสวิตช์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถลดลงได้มากกว่า 50% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม SBHCC ซึ่งจำนวนครั้งการสวิตช์ ได้จากการตรวจวัดจากสัญญาณพัลส์ที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที S_1 ถึง S_4 ในช่วงเวลา 0.05 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.24

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.24 สัญญาณพัลส์จากตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส

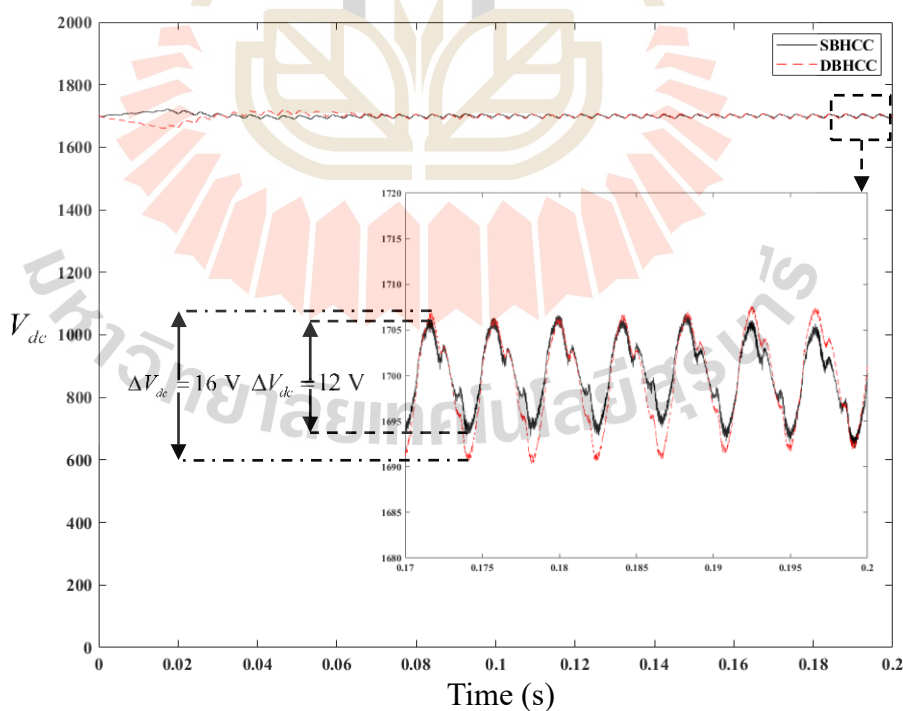
(ก) ตัวควบคุม SBHCC (ข) ตัวควบคุม DBHCC

ตารางที่ 4.4 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

ตัวควบคุม กระแส ชดเชย	ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม		ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส			จำนวนครั้ง การสวิตซ์ (ครั้ง)
	เฟส T	เฟส M	เฟส A	เฟส B	เฟส C	
	ก่อนการชดเชย					
	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	
	ภายหลังการชดเชย					
ตัวควบคุม SBHCC	4.7%	4.6%	4.8%	4.8%	4.6%	1318
ตัวควบคุม DBHCC	4.0%	3.9%	3.9%	4.0%	4.0%	688

4.7.3 ผลการทดสอบสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

การทดสอบสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบในหัวข้อที่ผ่านมา ได้ดำเนินการจำลองสถานการณ์โดยแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC และกรณีการใช้ตัวควบคุมด้วยตัวควบคุม DBHCC โดยสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.25 จากรูปดังกล่าว พบว่า ตัวควบคุมพีไอภายใต้การควบคุมกระแสชดเชยทั้งสองกรณีสามารถควบคุมแรงดันบัลไฟตรง (V_{dc}) ให้มีค่าเท่ากับแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง (1700 V) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในช่วงเริ่มต้น พบว่า มีการพุ่งเกิน (Overshoot) ที่ 1722 V และ 1718 V ตามลำดับ จากนั้นในช่วงสภาวะคงตัวมีการกระเพื่อมของแรงดันบัลไฟตรง (ΔV_{dc}) เท่ากับ 12 V สำหรับกรณีการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม SBHCC และมีค่า ΔV_{dc} เท่ากับ 16 V สำหรับกรณีการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC โดยความแตกต่างของระดับการพุ่งเกินและค่าการกระเพื่อมของแรงดันดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากรูปแบบการสวิตช์ของอุปกรณ์ไอจีบีทีที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการคายและเก็บประจุของตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) อย่างไรก็ตาม ค่า ΔV_{dc} ในทั้งสองกรณีของการควบคุมกระแสชดเชยยังคงอยู่ภายในขอบเขต 34 V ตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 4.25 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

4.8 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ และการออกแบบระบบควบคุมของวงจรรองกำลังแอกทีฟซึ่งประกอบด้วยการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ และการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส ซึ่งแบ่งออกเป็นสองรูปแบบ ได้แก่ ตัวควบคุม SBHCC และตัวควบคุม DBHCC โดยจากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม พบว่า วงจรรองกำลังแอกทีฟที่ทำงานร่วมกับระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบสามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณา โดยมีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมและแหล่งจ่ายสามเฟสภายหลังการชดเชยต่ำกว่า 5% เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 อย่างไรก็ตาม วงจรรองกำลังแอกทีฟที่ทำงานร่วมกับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC มีจำนวนครั้งการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีทีที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวควบคุม SBHCC ซึ่งส่งผลให้ลดการสูญเสียจากการสวิตช์ (Switching losses) ในอุปกรณ์สวิตช์กำลังไอจีบีทีได้อย่างมีนัยสำคัญ [11] ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุม DBHCC สำหรับควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

บทที่ 5

การจัดหาร์มอิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสลับแบบเฟสรวมกรณีกระแส โหลดมีการเปลี่ยนแปลง

5.1 กล่าวนำ

ในระบบรางไฟฟ้ากระแสลับแบบเฟสรวมอาจเกิดกรณีที่กระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาเนื่องจากการเพิ่มขึ้นและลดลงของขบวนรถไฟฟ้า จึงมีความจำเป็นต้องทดสอบสมรรถนะของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่ทำงานร่วมกับระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI controller) และระบบควบคุมกระแสชดเชย (i_c) ด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซีสแบบสองแถบ (DBHCC) ซึ่งได้ออกแบบไว้ในบทที่ 4 ทั้งนี้เพื่อยืนยันประสิทธิภาพการจัดหาร์มอิกภายใต้สถานการณ์ที่กระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยผลการจำลองสถานการณ์การจัดหาร์มอิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสลับแบบเฟสรวมกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง สามารถดูได้จากหัวข้อต่อไป

5.2 การจำลองสถานการณ์การจัดหาร์มอิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสลับแบบเฟสรวมกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

ระบบรางไฟฟ้ากระแสลับแบบเฟสรวมกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 จากรูปดังกล่าว โหลดรถไฟฟ้า (Traction load) ทั้งเฟส T และเฟส M ในสภาวะปกติจะกำหนดตามข้อมูลกระแสโหลดที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าได้หวั่น ส่วนวงจรรอกกำลังแอกทีฟและตัวควบคุมกำหนดใช้ค่าพารามิเตอร์ตามที่ได้ออกแบบไว้จากบทที่ 4 แสดงดังตารางที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดในหัวข้อนี้จะพิจารณาทั้งหมด 2 กรณี โดยพิจารณาจากขนาดของกระแสโหลดที่เปลี่ยนแปลงไปจากกระแสโหลดในสภาวะปกติ รายละเอียดของแต่ละกรณีสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

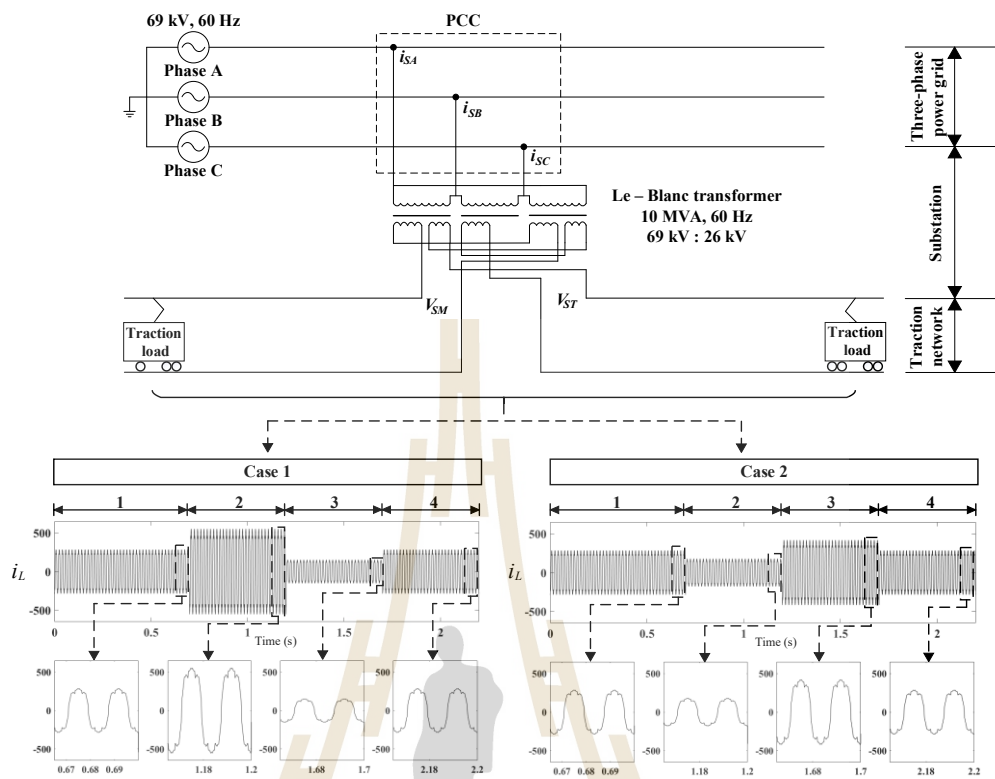
กรณีที่ 1 คือ ช่วงที่ 1 โหลดรถไฟฟ้ายู่ในสภาวะปกติ ช่วงที่ 2 โหลดรถไฟฟ้ายเพิ่มขึ้น (กระแสโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของกระแสโหลดในสภาวะปกติ) ช่วงที่ 3 โหลดรถไฟฟ้ายลดลง (กระแสโหลดลดลงเป็น 0.5 เท่าของกระแสโหลดในสภาวะปกติ) และในช่วงที่ 4 โหลดรถไฟฟ้ายกลับเข้าสู่สภาวะปกติ โดยกระแสโหลดกลับมาเท่ากับกระแสโหลดในช่วงที่ 1

กรณีที่ 2 คือ ช่วงที่ 1 โหลดรถไฟฟ้ายู่ในสภาวะปกติ ช่วงที่ 2 โหลดรถไฟฟ้ายลดลง (กระแสโหลดลดลงเป็น 0.6 เท่าของกระแสโหลดในสภาวะปกติ) ช่วงที่ 3 โหลดรถไฟฟ้ายเพิ่มขึ้น (กระแสโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่าของกระแสโหลดในสภาวะปกติ) และในช่วงที่ 4 โหลดรถไฟฟ้ายกลับเข้าสู่สภาวะปกติ โดยกระแสโหลดกลับมาเท่ากับกระแสโหลดในช่วงที่ 1

ทั้งนี้ โหลดรถไฟฟ้ายที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของโหลดในสภาวะปกติ หมายถึงการมีขบวนรถไฟฟ้ายเพิ่มขึ้นอีก 1 ขบวน ในขณะที่โหลดรถไฟฟ้ายในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 2 เท่าของโหลดในสภาวะปกติ หมายถึงการมีความแตกต่างของจำนวนผู้โดยสารในแต่ละขบวน โดยรูปร่างของกระแสโหลดในแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.1 ซึ่งแบ่งช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.7 วินาที ช่วงที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.7 ถึง 1.2 วินาที ช่วงที่ 3 ตั้งแต่เวลา 1.2 ถึง 1.7 วินาที และช่วงที่ 4 ตั้งแต่เวลา 1.7 ถึง 2.2 วินาที

หมายเหตุ : ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลด โดยปริมาณกระแสโหลดสูงสุดมีค่าเป็น 2 เท่าของกระแสโหลดในสภาวะปกติ และปริมาณกระแสโหลดต่ำสุดมีค่า 0.5 เท่าของกระแสโหลดในสภาวะปกติ ทั้งนี้ เป็นผลมาจากข้อจำกัดของค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 4 ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบกักเก็บฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

วงจรรอกกำลังแอกทีฟ	ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรรอก (L_f)	0.05 mH
	ตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc})	45 mF
	แรงดันบัสไฟตรง (V_{dc})	1700 V
ตัวควบคุมพีไอ	ค่าพารามิเตอร์ K_p	12213
	ค่าพารามิเตอร์ K_i	977322
ตัวควบคุม DBHCC	ค่าแถบฮีสเตอร์ซิส (HB)	20 A



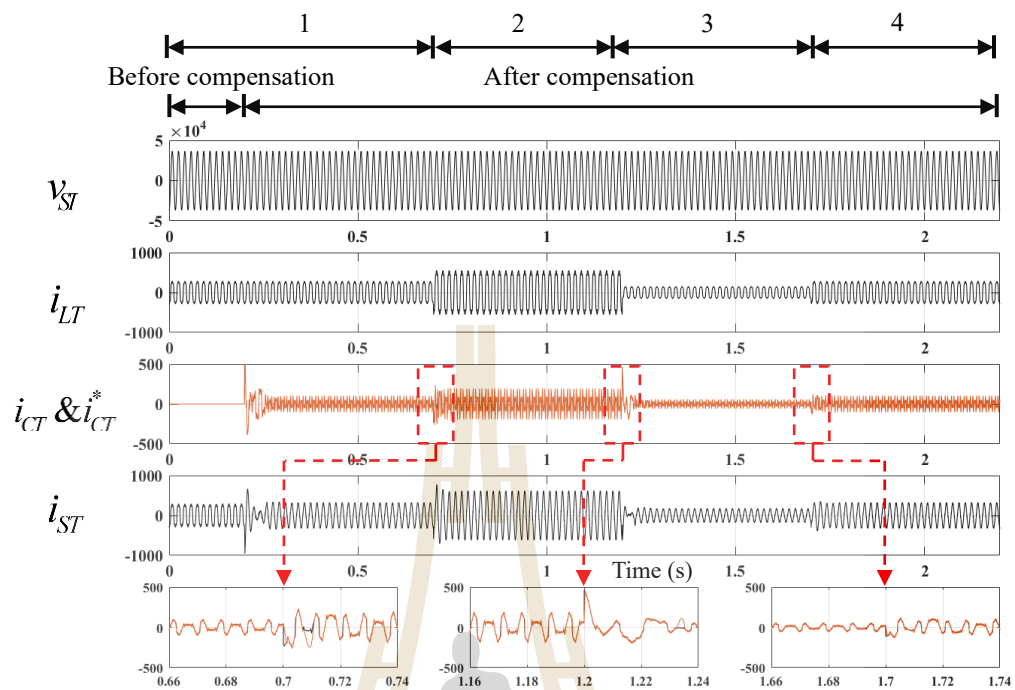
รูปที่ 5.1 ระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเฟสร่วมกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่ 1 และ 2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ ส่วนผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ โดยรายละเอียดของผลการกำจัดฮาร์มอนิกในแต่ละกรณีสามารถอธิบายได้ดังนี้

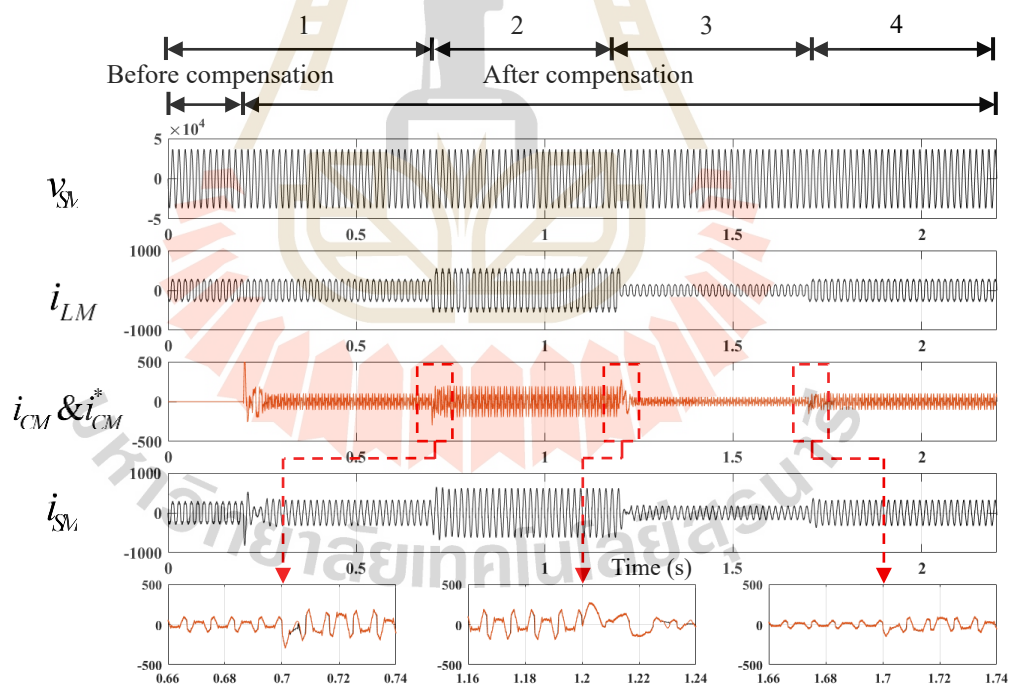
กรณีโหลดที่ 1 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเฟสร่วมแสดงไว้ในรูปที่ 5.2 โดยในช่วงที่ 1 (0 ถึง 0.7 วินาที) ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ก่อนการชดเชย (Before compensation) ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.2 วินาที กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสร่วม (i_{ST} , i_{SM}) มีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ โดยมีค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 22.16% และตั้งแต่ 0.2 วินาทีเป็นต้นไป หลังการชดเชย (After compensation) เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟร่วมกับระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ฉีดกระแสชดเชย (i_{CT} , i_{CM}) ตามลักษณะกระแสอ้างอิง (i_{CT}^* , i_{CM}^*) ที่ได้จากวิธี PQF เข้าสู่ระบบรางไฟฟ้า ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสร่วม (i_{ST} , i_{SM}) กลับมามีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้น โดยมีค่า %THD ลดลงเท่ากับ 3.95% และ 3.79% ในเฟส T และเฟส M ตามลำดับ จากนั้นในช่วงที่ 2 (0.7 ถึง 1.2 วินาที) ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 2 เท่า มีค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 22.83% พบว่า ตัวควบคุม DBHCC ยังคงสามารถควบคุม

กระแสชดเชย (i_{CT} , i_{CM}) ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง (i_{CT}^* , i_{CM}^*) ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) ยังคงเป็นรูปไซน์ โดยมีค่า %THD ภายหลังการชดเชยในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 3.92% และ 4.14% ตามลำดับ สำหรับในช่วงที่ 3 (1.2 ถึง 1.7 วินาที) ภายได้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเหลือ 0.5 เท้า และมีค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 20.93% พบว่า ตัวควบคุม DBHCC ยังคงมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชย และค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมภายหลังการชดเชยในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 5.93% และ 5.89% ตามลำดับ และในช่วงที่ 4 (1.7 ถึง 2.2 วินาที) ภายได้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงกลับมาเป็นสภาวะกระแสโหลดในสภาวะปกติอีกครั้ง พบว่า ตัวควบคุม DBHCC สามารถควบคุมกระแสชดเชยได้เช่นเดิม และมีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมภายหลังการชดเชยเท่ากับในช่วงที่ 1

กรณีโหลดที่ 2 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเฟสรวมแสดงไว้ในรูปที่ 5.3 โดยในช่วงที่ 1 (0 ถึง 0.7 วินาที) ภายได้กระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ก่อนการชดเชย (0 ถึง 0.2 วินาที) กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมมีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ ที่ค่า %THD เท่ากับ 22.16% จากนั้นภายหลังการชดเชยตั้งแต่วเวลา 0.2 วินาทีเป็นต้นไป สังเกตได้ว่ากระแสที่แหล่งจ่ายกลับมาเป็นรูปไซน์ โดยมีค่า %THD ลดลงเท่ากับ 3.95% และ 3.79% ในเฟส T และเฟส M ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 (0.7 ถึง 1.2 วินาที) ภายได้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเหลือ 0.6 เท้า มีค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 21.32% อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุม DBHCC สามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงได้ ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมยังคงเป็นรูปไซน์ มีค่า %THD ภายหลังการชดเชยในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 5.27% และ 5.23% ตามลำดับ ในช่วงที่ 3 (1.2 ถึง 1.7 วินาที) ภายได้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 1.5 เท้า โดยมีค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 22.60% ทั้งนี้ ตัวควบคุม DBHCC ยังคงสามารถควบคุมกระแสชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ค่า %THD ภายหลังการชดเชยลดลงเท่ากับ 3.84% และ 3.74% สำหรับเฟส T และเฟส M ตามลำดับ และในช่วงที่ 4 (1.7 ถึง 2.2 วินาที) ภายได้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงกลับมาเป็นสภาวะกระแสโหลดในสภาวะปกติอีกครั้ง พบว่า ตัวควบคุม DBHCC ยังคงมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยได้ดีเช่นเดิม โดยค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมภายหลังการชดเชยเท่ากับในช่วงที่ 1

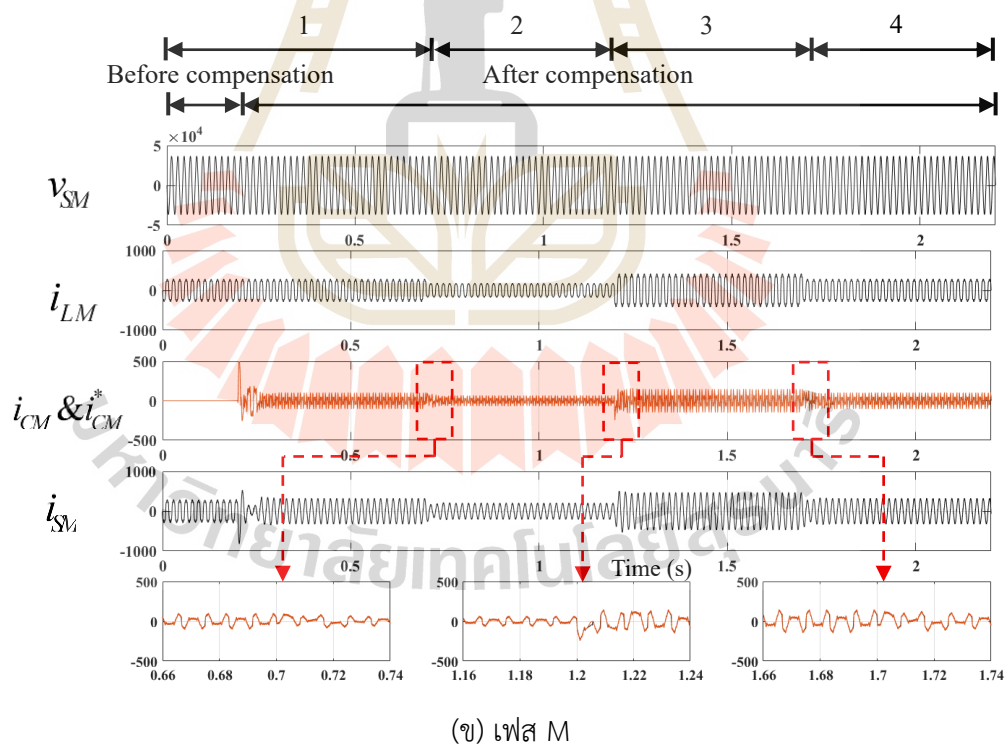
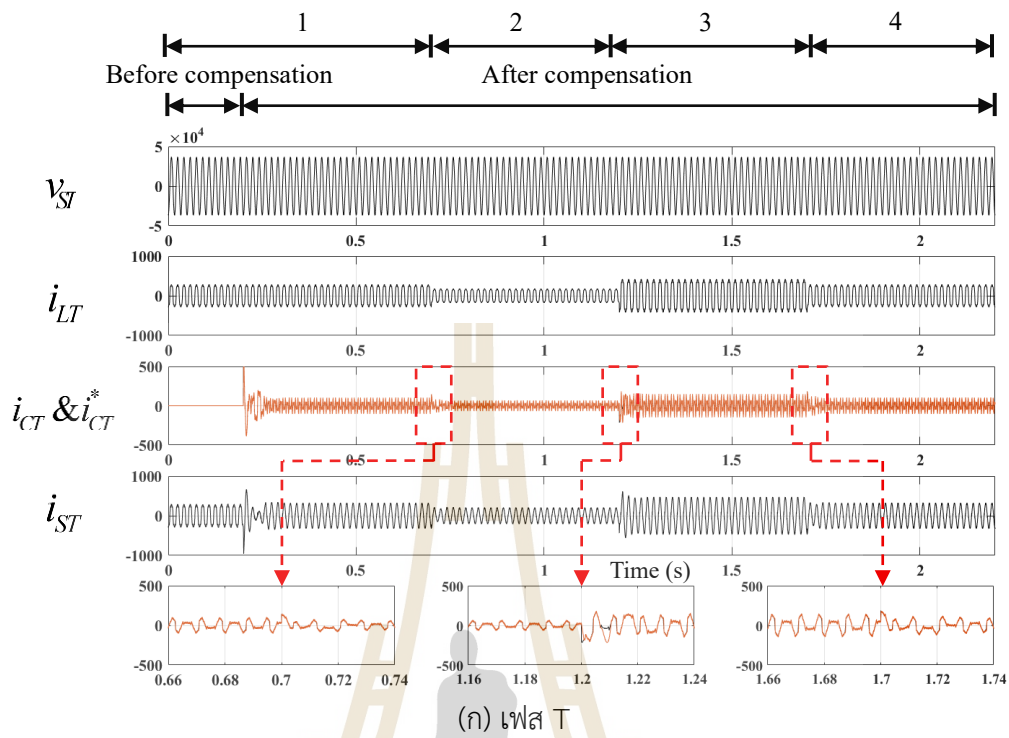


(ก) เฟส T



(ข) เฟส M

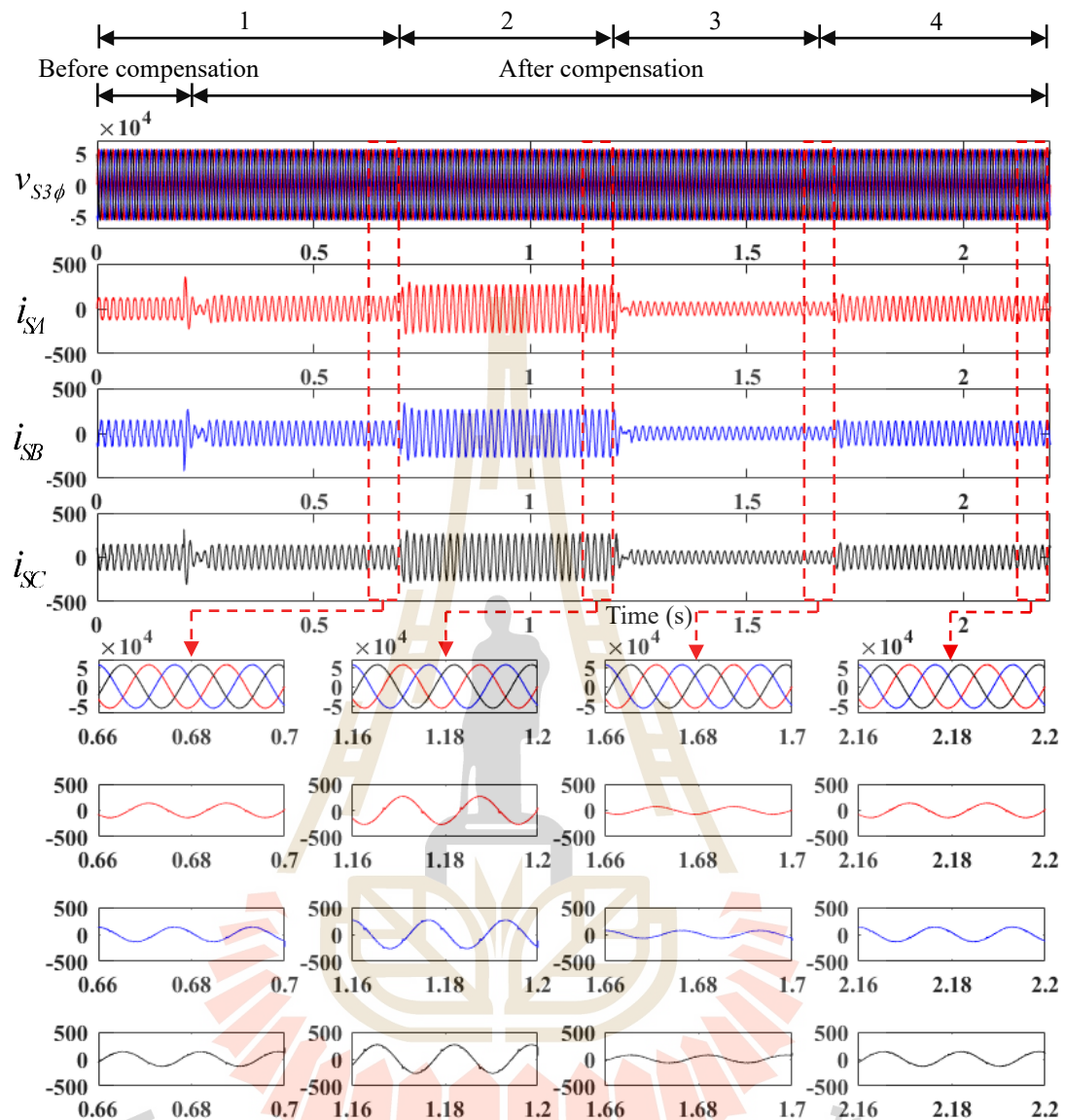
รูปที่ 5.2 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมภายใต้การเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดในกรณีที่ 1



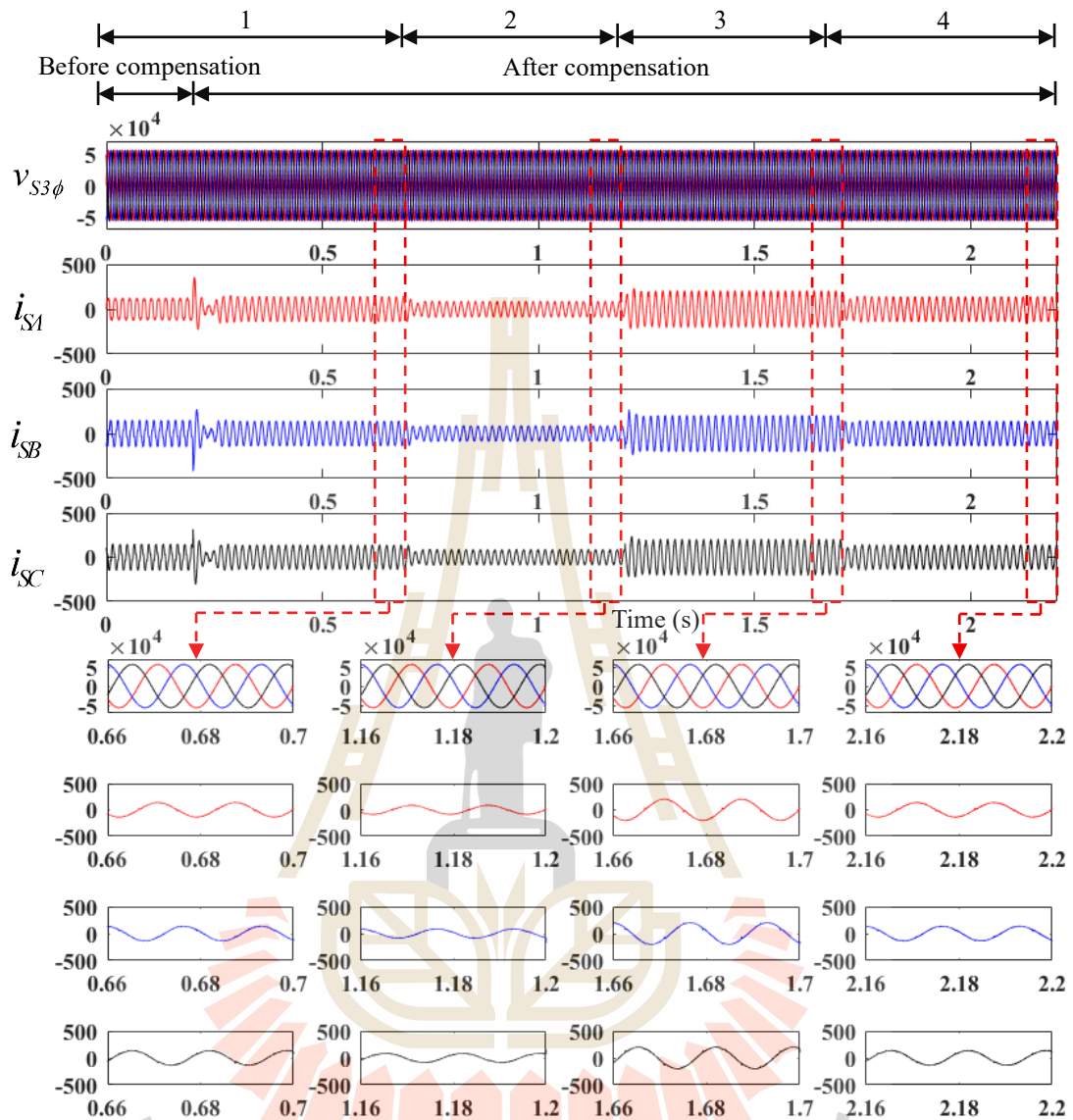
รูปที่ 5.3 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมภายใต้การเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดในกรณี 2

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสำหรับกรณี โหลดที่ 1 ดังรูปที่ 5.4 พบว่า กระแสที่แหล่งจ่าย (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) ภายหลังจากชดเชยมีลักษณะเป็น รูปไซน์ โดยในช่วงที่ 1 ภายใต้อะแดกโหลดในสภาวะปกติ มีค่า %THD เท่ากับ 3.95% 3.84% และ 3.82% ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 ภายใต้อะแดกโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น มีค่า %THD เท่ากับ 4.14% 3.96% และ 3.99% ตามลำดับ ในช่วงที่ 3 ภายใต้อะแดกโหลดเปลี่ยนแปลงลดลง มีค่า %THD เท่ากับ 5.89% 5.85% และ 6.00% ตามลำดับ และในช่วงที่ 4 ภายใต้อะแดกโหลดเปลี่ยนแปลง กลับมาเป็นสภาวะกระแสโหลดในสภาวะปกติ มีค่า %THD เท่ากับในช่วงที่ 1 ส่วนกรณีโหลดที่ 2 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกแสดงดังรูปที่ 5.5 โดยในช่วงที่ 1 ภายใต้อะแดกโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟสภายหลังจากชดเชยเท่ากับ 3.95% 3.84% และ 3.82% ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 ภายใต้อะแดกโหลดเปลี่ยนแปลงลดลง มีค่า %THD เท่ากับ 5.27% 5.26% และ 5.23% ตามลำดับ ในช่วงที่ 3 ภายใต้อะแดกโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น มีค่า %THD เท่ากับ 3.74% 3.79% และ 3.83% ตามลำดับ และในช่วงที่ 4 ภายใต้อะแดกโหลดเปลี่ยนแปลงกลับมาเป็น สภาวะกระแสโหลดในสภาวะปกติ มีค่า %THD เท่ากับในช่วงที่ 1 โดยสามารถแสดงสรุปค่า %THD ได้ดังตารางที่ 5.2

จากผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมและระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสภายใต้การ เปลี่ยนแปลงกระแสโหลดดังรูปที่ 5.2 ถึง 5.5 พบว่า กราฟของกระแสชดเชยและกระแสที่แหล่งจ่าย แสดงลักษณะการบิดเบี้ยวในช่วงสภาวะชั่วคราวก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงกระแส โหลด ทั้งนี้เนื่องจากการอาศัยช่วงเวลา 1 คาบรูปสัญญาณสำหรับการคำนวณค่าเริ่มต้น (Initialization) ตามวิธี SWFA ของการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี PQF ส่งผลให้ในช่วงเวลาดังกล่าว การคำนวณกระแสชดเชยสำหรับการกำจัดฮาร์โมนิกยังไม่สมบูรณ์



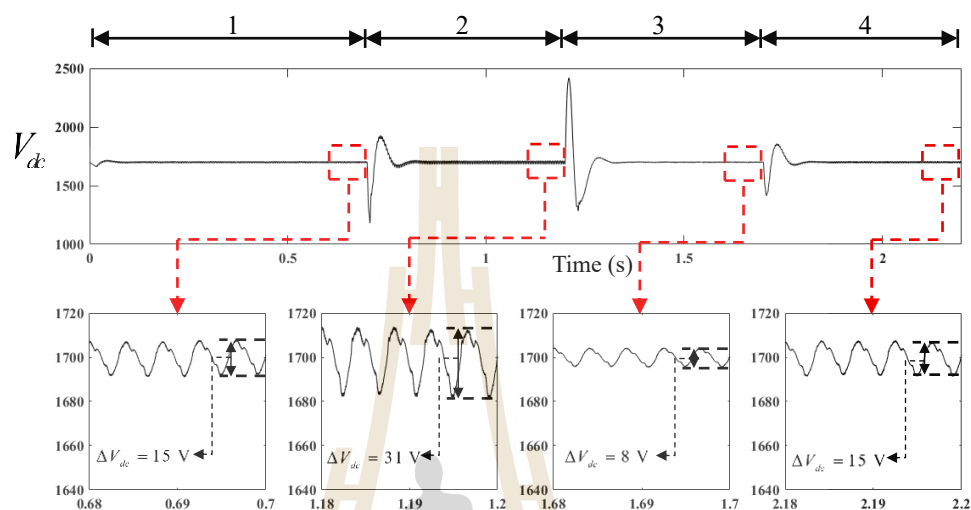
รูปที่ 5.4 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสภายใต้การเปลี่ยนแปลงกระแสโหลด
ในกรณีที่ 1



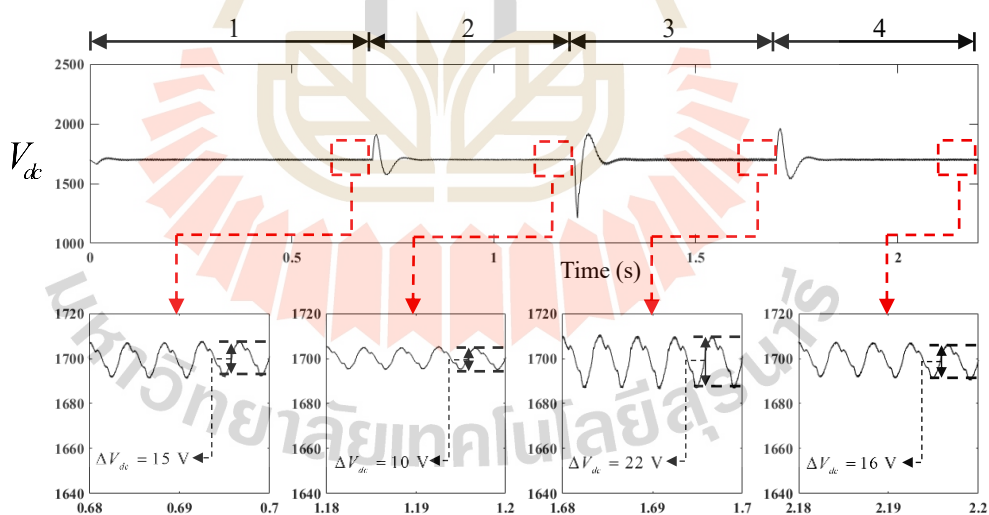
รูปที่ 5.5 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสภายใต้การเปลี่ยนแปลงกระแสโหลด
ในกรณีที่ 2

สำหรับผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลด (กรณีที่ 1 และ 2) แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ พบว่า ตัวควบคุมพีไอ ยังคงมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงแม้กระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยมีค่าเท่ากับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (1700 V) ในทุกกรณีโหลด และมีการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง (ΔV_{dc}) สำหรับกรณีที่ 1 ในช่วงที่ 1 2 3 และ 4 เท่ากับ 15 V 31 V 8 V และ 15 V ตามลำดับ ในขณะที่กรณีที่ 2 มีค่าการกระเพื่อมในช่วงที่ 1 2 3 และ 4 เท่ากับ 15 V 10 V 22 V และ 16 V ตามลำดับ

โดยทั้งสองกรณีโหนดมีค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงอยู่ในขอบเขต 34 V ตามที่ได้
ออกแบบไว้



รูปที่ 5.6 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงภายใต้การเปลี่ยนแปลงกระแสโหนดในกรณีที่ 1



รูปที่ 5.7 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงภายใต้การเปลี่ยนแปลงกระแสโหนดในกรณีที่ 2

ตารางที่ 5.2 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกในกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

กรณี โหลด	สภาวะกระแสโหลด	ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่าย เฟสรวม		ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส		
		เฟส T	เฟส M	เฟส A	เฟส B	เฟส C
กรณี โหลด	ก่อนการชดเชย					
	ปกติ (1 เท่า)	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%
	เพิ่มขึ้น (2 เท่า)	22.83%	22.83%	22.83%	22.83%	22.83%
	เพิ่มขึ้น (1.5 เท่า)	22.60%	22.60%	22.60%	22.60%	22.60%
	ลดลง (0.6 เท่า)	21.32%	21.32%	21.32%	21.32%	21.32%
	ลดลง (0.5 เท่า)	20.93%	20.93%	20.93%	20.93%	20.93%
ภายหลังการชดเชย						
กรณีที่ 1	ปกติ (1 เท่า)	3.95%	3.79%	3.95%	3.84%	3.82%
	เพิ่มขึ้น (2 เท่า)	3.92%	4.14%	4.14%	3.96%	3.99%
	ลดลง (0.5 เท่า)	5.93%	5.89%	5.89%	5.85%	6.00%
	ปกติ (1 เท่า)	3.95%	3.79%	3.95%	3.84%	3.82%
กรณีที่ 2	ปกติ (1 เท่า)	3.95%	3.79%	3.95%	3.84%	3.82%
	ลดลง (0.6 เท่า)	5.27%	5.23%	5.27%	5.26%	5.23%
	เพิ่มขึ้น (1.5 เท่า)	3.84%	3.74%	3.74%	3.79%	3.83%
	ปกติ (1 เท่า)	3.95%	3.79%	3.95%	3.84%	3.82%

จากผลการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 5.2 สังเกตได้ว่า การเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ฮาร์มอนิก โดยในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดลดลง 0.5 เท่า และ 0.6 เท่า พบว่า %THD มีค่าสูงขึ้นเกิน 5% ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 ส่งผลให้ระบบมีสมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ต่ำลง ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกในกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับสามองค์ประกอบหลัก ได้แก่ การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC อย่างไรก็ตาม การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF สามารถคำนวณกระแสอ้างอิงได้แม่นยำ

แม้ในสภาวะกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลง และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลัง แอ็กทิฟใหม่ให้มีความเหมาะสมกับทุกช่วงของการเปลี่ยนแปลงกระแสไหลดนั้นเป็นสิ่งที่ซับซ้อน ยากต่อการออกแบบ และยากต่อการเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ในทางปฏิบัติ ดังนั้น ประสิทธิภาพของการ กำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณากรณีกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลงจึงขึ้นอยู่กับ ตัวควบคุม DBHCC โดยตรง อย่างไรก็ตาม โดยปกติค่า HB ของตัวควบคุม DBHCC จะพิจารณา ออกแบบให้มีความเหมาะสมกับสภาวะกระแสไหลดที่พิจารณาที่กำหนดตามข้อมูลกระแสไหลด โดย ยังไม่คำนึงถึงกรณีกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า HB และ ประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์โมนิกโดยมีค่า %THD เป็นตัวชี้วัด จึงได้ดำเนินการยกตัวอย่างการ ทดสอบในกรณีที่กระแสไหลดเปลี่ยนแปลงลดลง 0.5 เทา ซึ่งให้ค่า %THD สูงเกิน 5% จากนั้นจึงทำ การทดสอบปรับลดขนาดของค่า HB เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์โมนิก โดยสามารถ แสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การทดลองปรับเปลี่ยนค่า HB ภายใต้การเปลี่ยนแปลงกระแสไหลดลดลง 0.5 เทา

สถานะการปรับ ค่า HB	ค่า HB (A)	ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่าย เฟสรวม		ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส		
		เฟส T	เฟส M	เฟส A	เฟส B	เฟส C
		ก่อนการกำจัดฮาร์โมนิก				
		20.93%	20.93%	20.93%	20.93%	20.93%
		ภายหลังการกำจัดฮาร์โมนิก				
ก่อนปรับค่า HB	20	5.93%	5.89%	5.89%	5.85%	6.00%
หลังปรับค่า HB	7	3.89%	3.86%	3.86%	3.82%	3.95%

จากตารางที่ 5.3 พบว่า ภายหลังการปรับค่า HB ให้มีขนาดลดลงเท่ากับ 7 A ส่งผลให้ ระบบ มีสมรรถนะในการกำจัดฮาร์โมนิกที่ดีขึ้น โดย %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) มี ค่าลดลงเท่ากับ 3.89% และ 3.86% สำหรับในเฟส T และเฟส M ตามลำดับ และส่งผลให้กระแสที่ แหล่งจ่ายสามเฟส (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) มีค่า %THD ลดลงเท่ากับ 3.86%, 3.82% และ 3.95% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 จากการทดสอบดังกล่าว

หมายความว่าประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์โมนิกจะขึ้นอยู่กับค่า HB ดังนั้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัด ฮาร์โมนิกจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องออกแบบตัวควบคุม DBHCC ให้สามารถปรับค่า HB ได้สำหรับรองรับการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าในกรณีกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลง

5.3 สรุป

ในบทนี้นำเสนอการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมกรณีกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลงด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่ทำงานร่วมกับระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ และระบบควบคุมกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุม DBHCC ที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 4 โดยผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิก พบว่า การเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลดส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์โมนิก โดยสถานะของกระแสไหลดในบางกรณีส่งผลให้สมรรถนะในการกำจัดฮาร์โมนิกต่ำลง โดยมีค่า %THD เกิน 5% ไม่เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการทดสอบปรับเปลี่ยนค่า HB ของตัวควบคุม DBHCC เพื่อศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์โมนิก ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า ค่า HB มีผลโดยตรงต่อการควบคุมกระแสชดเชยและประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์โมนิก ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องออกแบบกลไกในการปรับค่า HB ของตัวควบคุม DBHCC เพื่อรองรับกรณีกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งรายละเอียดการออกแบบดังกล่าวจะเสนอในบทถัดไป

บทที่ 6

การออกแบบตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสสองแถบแบบปรับตัวได้

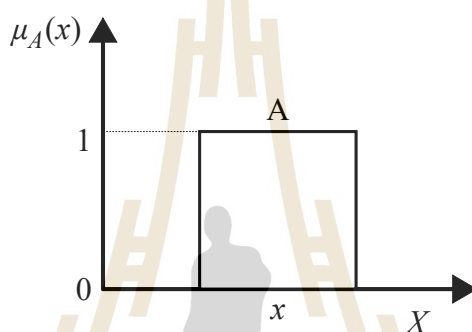
6.1 กล่าวนำ

จากบทที่ผ่านมาพบว่าประสิทธิภาพของการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมในกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสแบบสองแถบ (DBHCC) โดยตรง ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องออกแบบค่าแถบฮีสเทอรีซิส (HB) ของตัวควบคุม DBHCC ให้สามารถปรับตัวได้ เพื่อรองรับกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งงานวิจัยในอดีต [12] ได้นำเสนอการปรับตัวได้ของค่า HB โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อย่างไรก็ตาม แนวทางดังกล่าวมีความซับซ้อนในการนำไปปรับใช้งานจริง ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) สำหรับปรับเปลี่ยนค่า HB ของตัวควบคุม DBHCC โดยอาศัยการกำหนดกฎการควบคุมบนพื้นฐานของความรู้และประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญในระบบแทนการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะช่วยลดความยุ่งยากในการออกแบบ ดังนั้น ในบทนี้จึงนำเสนอกระบวนการออกแบบฟัซซีลอจิกสำหรับใช้งานร่วมกับตัวควบคุมกระแสชดเชย DBHCC โดยการนำเสนอจะแบ่งเป็นหัวข้อ ได้แก่ ฟัซซีเซต (Fuzzy set) การดำเนินการทางฟัซซีเซต (Fuzzy set operations) ฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) ตัวแปรภาษา (Linguistic variables) และค่าเชิงภาษา (Linguistic value) กฎฟัซซี (Fuzzy rules) และการอนุมานฟัซซี (Fuzzy inference) โดยในแต่ละหัวข้อจะอธิบายการออกแบบฟัซซีลอจิกสำหรับใช้ปรับค่า HB ของตัวควบคุม DBHCC ร่วมด้วย และนำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมเพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ร่วมกับการปรับค่า HB ด้วยฟัซซีลอจิกที่ได้จากการออกแบบ

6.2 ฟัซซีเซต

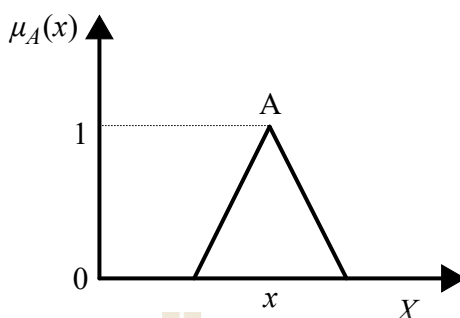
ฟัซซีเซต (Fuzzy set) เป็นรูปร่างของเซตที่คลุมเครือไม่ชัดเจน ซึ่งมีความแตกต่างจากเซตชัดเจน (Crisp set) ที่ใช้ในระบบตรรกศาสตร์ทั่ว ๆ ไป เพื่อให้เข้าใจถึงฟัซซีเซตในหัวข้อนี้นี้จะนำเสนอความหมายระหว่างฟัซซีเซตและเซตชัดเจนซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

เซตชัดเจน (Crisp set) เป็นรูปร่างของเซตที่มีค่าความเป็นสมาชิกชัดเจน โดยมีค่าความเป็นสมาชิก คือ 0 และ 1 ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างประกอบการอธิบายได้ดังนี้ ถ้ากำหนดให้ $\mu_A(x)$ คือ ค่าความเป็นสมาชิกของเซต A ที่ตัวแปร x ใด ๆ ในเอกภพสัมพัทธ์ X และแบ่งออกเป็น 2 กรณีของค่าความเป็นสมาชิกของเซต A ได้แก่ กรณีที่ 1 เมื่อตัวแปร x ใด ๆ มีค่า $\mu_A(x)=0$ หมายถึงตัวแปรนั้นไม่เป็นสมาชิกของเซต A และกรณีที่ 2 เมื่อตัวแปร x ใด ๆ มีค่า $\mu_A(x)=1$ หมายถึงตัวแปรนั้นเป็นสมาชิกของเซต A โดยสามารถแสดงรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของเซตชัดเจนได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของเซตชัดเจน

ฟัซซีเซตเป็นรูปร่างของเซตที่มีค่าความเป็นสมาชิกที่คลุมเครือไม่ชัดเจน โดยมีค่าความเป็นสมาชิกอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ขึ้นกับรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก เช่น สามเหลี่ยม สีเหลี่ยมคางหมู และเกาส์เซียน เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างประกอบการอธิบายในฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 6.2 ซึ่งกำหนดให้ $\mu_A(x)$ คือ ค่าความเป็นสมาชิกของเซต A ที่ตัวแปร x ใด ๆ ในเอกภพสัมพัทธ์ X และแบ่งออกเป็น 3 กรณีของค่าความเป็นสมาชิกของเซต A ได้แก่ กรณีที่ 1 เมื่อตัวแปร x ใด ๆ มีค่า $\mu_A(x)=0$ หมายถึงตัวแปรนั้นไม่เป็นสมาชิกของเซต A กรณีที่ 2 เมื่อตัวแปร x ใด ๆ มีค่า $0 < \mu_A(x) < 1$ หมายถึงตัวแปรนั้นเป็นสมาชิกของเซต A เพียงบางส่วน และกรณีที่ 3 เมื่อตัวแปร x ใด ๆ มีค่า $\mu_A(x)=1$ หมายถึงตัวแปรนั้นเป็นสมาชิกของเซต A โดยสมบูรณ์ และสามารถแสดงรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีเซตได้ดังรูปที่ 6.2



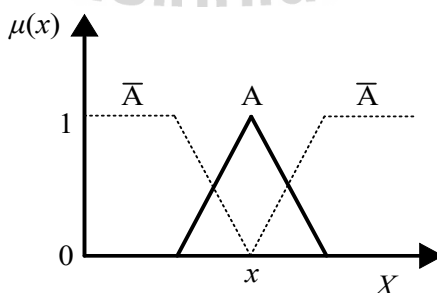
รูปที่ 6.2 รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีเซต

6.3 การดำเนินการทางฟัซซีเซต

การดำเนินการทางฟัซซีเซต (Fuzzy set operations) มีหลักการคล้ายกับเซตชัดเจน แต่ให้ผลลัพธ์ที่ต่างออกไป โดยที่เซตชัดเจนให้ผลลัพธ์ที่ค่าตัวแปรใด ๆ อยู่หรือไม่อยู่ในเซตชัดเจน ในส่วนฟัซซีเซตจะให้ผลลัพธ์ที่ค่าตัวแปรใด ๆ อยู่ในฟัซซีเซตมากน้อยเพียงใด ซึ่งการดำเนินการทางฟัซซีเซต ได้แก่ ส่วนเติมเต็ม (Complement) ยูเนียน (Union) และอินเตอร์เซกชัน (Intersection) สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ส่วนเติมเต็ม (Complement) คือ ส่วนกลับของฟัซซีเซต เมื่อกำหนดให้ A เป็นฟัซซีเซตที่กำหนดในเอกภพสัมพัทธ์ X ที่มีค่าความเป็นสมาชิกเป็น $\mu_A(x)$ สำหรับตัวแปร x ใด ๆ ในเอกภพสัมพัทธ์ X ส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A ($\bar{A}$) คือ ส่วนกลับของฟัซซีเซต A ซึ่งคือตัวแปร x ใด ๆ ที่อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ X แต่ไม่อยู่ในฟัซซีเซต A โดยสมบูรณ์ ซึ่งส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A มีค่าความเป็นสมาชิก ($\mu_{\bar{A}}(x)$) แสดงได้ดังสมการที่ (6.1) และสามารถแสดงรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A ได้ดังรูปที่ 6.3

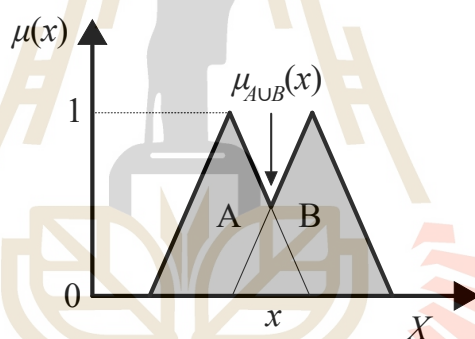
$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (6.1)$$



รูปที่ 6.3 รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกส่วนเติมเต็มของฟัซซีเซต A

ยูเนียน (Union) คือ การรวมกันของสองฟัซซีเซต เมื่อกำหนดให้ A และ B เป็นฟัซซีเซตที่กำหนดในเอกภพสัมพัทธ์ X ที่มีค่าความเป็นสมาชิกเป็น $\mu_A(x)$ และ $\mu_B(x)$ ตามลำดับ การยูเนียนของฟัซซีเซต A และ B คือ ผลรวมของตัวแปร x ใด ๆ ทั้งหมดที่อยู่ในฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B ซึ่งมีค่าความเป็นสมาชิก ($\mu_{A \cup B}(x)$) เป็นค่ามากที่สุดที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A ($\mu_A(x)$) และ ฟัซซีเซต B ($\mu_B(x)$) โดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 6.2 และรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกการยูเนียนของฟัซซีเซต A และ B แสดงได้ดังรูปที่ 6.4 จากรูปดังกล่าวส่วนที่แรเงาจะแสดงผลลัพธ์การยูเนียนของฟัซซีเซต A และ B

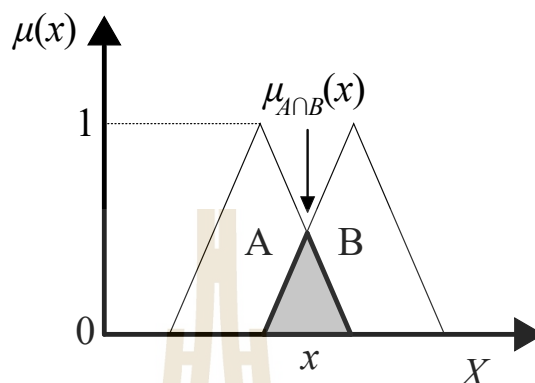
$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (6.2)$$



รูปที่ 6.4 รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกการยูเนียนของฟัซซีเซต A และ B

อินเตอร์เซกชัน (Intersection) คือ การหาค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรใด ๆ ที่อยู่ภายในพื้นที่ซ้อนทับของสองฟัซซีเซต เมื่อกำหนดให้ A และ B เป็นฟัซซีเซตที่กำหนดในเอกภพสัมพัทธ์ X ที่มีค่าความเป็นสมาชิกเป็น $\mu_A(x)$ และ $\mu_B(x)$ ตามลำดับ การอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B คือ ตัวแปร x ใด ๆ ที่อยู่ภายในฟัซซีเซต A และฟัซซีเซต B ซึ่งมีค่าความเป็นสมาชิก ($\mu_{A \cap B}(x)$) เป็นค่าน้อยสุดที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A ($\mu_A(x)$) และฟัซซีเซต B ($\mu_B(x)$) โดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 6.3 และรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกการอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และ B แสดงได้ดังรูปที่ 6.5 จากรูปดังกล่าว ส่วนที่แรเงาจะแสดงผลลัพธ์การอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และ B

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (6.3)$$



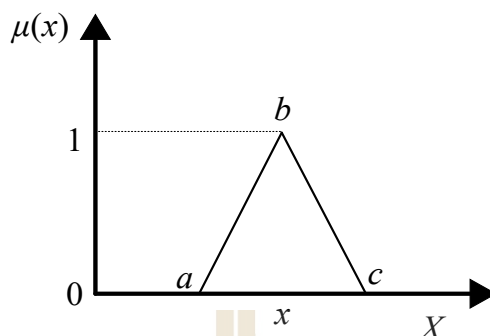
รูปที่ 6.5 รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกการอินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต A และ B

6.4 ฟังก์ชันสมาชิก

ฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) ถูกใช้เพื่อกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรใด ๆ ในฟัซซีเซต โดยรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกที่ได้รับความนิยมมีทั้งหมด 4 รูปร่าง ได้แก่ ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม (Triangular membership function: trimf) ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal membership function: trapmf) ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน (Gaussian membership function: gaussmf) และฟังก์ชันสมาชิกรูประฆังคว่ำ (Generalized bell membership function: gbellmf) การเลือกใช้ฟังก์ชันสมาชิกในแต่ละรูปร่างข้างต้นควรคำนึงถึงความเหมาะสมกับระบบที่พิจารณา และสามารถอธิบายรายละเอียดของแต่ละรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกได้ดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม (Triangular membership function: trimf) มีค่าพารามิเตอร์สำหรับกำหนดตำแหน่งสามค่า คือ a b และ c ที่อยู่ภายในเอกภพสัมพัทธ์ X ดังแสดงในรูปที่ 6.6 โดยค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร x ใด ๆ จะถูกแบ่งออกเป็น 5 ช่วงแสดงดังสมการที่ (6.4)

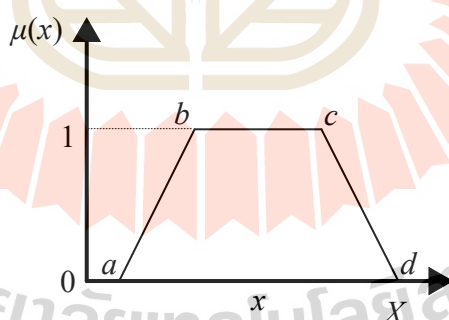
$$\mu(x) = \text{trimf}(x, [a \ b \ c]) = \begin{cases} 0 & ; x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & ; a < x < b \\ 1 & ; x = b \\ (c-x)/(c-b) & ; b < x < c \\ 0 & ; x \geq c \end{cases} \quad (6.4)$$



รูปที่ 6.6 ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม

ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal membership function: trapmf) มีค่าพารามิเตอร์สำหรับกำหนดตำแหน่งสี่ค่า คือ a b c และ d อยู่ภายในเอกภพสัมพัทธ์ X ดังแสดงในรูปที่ 6.7 โดยค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร x ใด ๆ จะถูกแบ่งออกเป็น 5 ช่วงแสดงได้ดังสมการที่ (6.5)

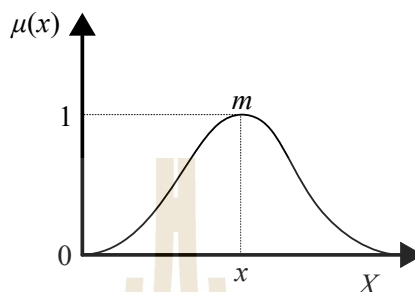
$$\mu(x) = \text{trapmf}(x, [a \ b \ c \ d]) = \begin{cases} 0 & ; x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & ; a < x < b \\ 1 & ; b \leq x \leq c \\ (d-x)/(d-c) & ; c < x < d \\ 0 & ; x \geq d \end{cases} \quad (6.5)$$



รูปที่ 6.7 ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน (Gaussian membership function: gaussmf) มีค่าพารามิเตอร์สำหรับกำหนดรูปร่าง คือ σ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ใช้กำหนดความกว้างรูปเกาส์เซียน และ m ค่าเฉลี่ย (Mean) แทนจุดศูนย์กลางของรูปเกาส์เซียน ดังแสดงในรูปที่ 6.8 และค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร x ใด ๆ แสดงได้ดังสมการที่ (6.6)

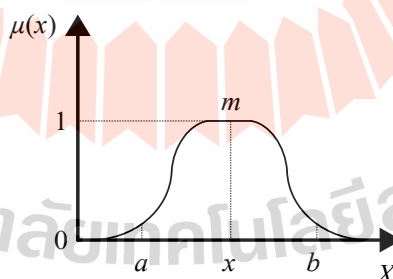
$$\mu(x) = \text{gussmf}(x, [\sigma \ m]) = e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (6.6)$$



รูปที่ 6.8 ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน

ฟังก์ชันสมาชิกรูปประฆังคว่ำ (Generalized bell membership function: gbellmf) มีค่าพารามิเตอร์สำหรับกำหนดรูปร่าง คือ a และ b ถูกใช้เพื่อกำหนดความกว้างรูปประฆังคว่ำ และ m แทนจุดศูนย์กลางของรูปประฆังคว่ำ ดังแสดงในรูปที่ 6.9 ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวถูกใช้เพื่อกำหนดความกว้าง ความชัน และจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันสมาชิกรูปประฆังคว่ำ ส่งผลให้มีความยืดหยุ่นสูงกว่าฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน และค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร x ใด ๆ แสดงได้ดังสมการที่ (6.7)

$$\mu(x) = \text{gbellmf}(x, [a \ b \ m]) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-m}{a} \right|^{2b}} \quad (6.7)$$

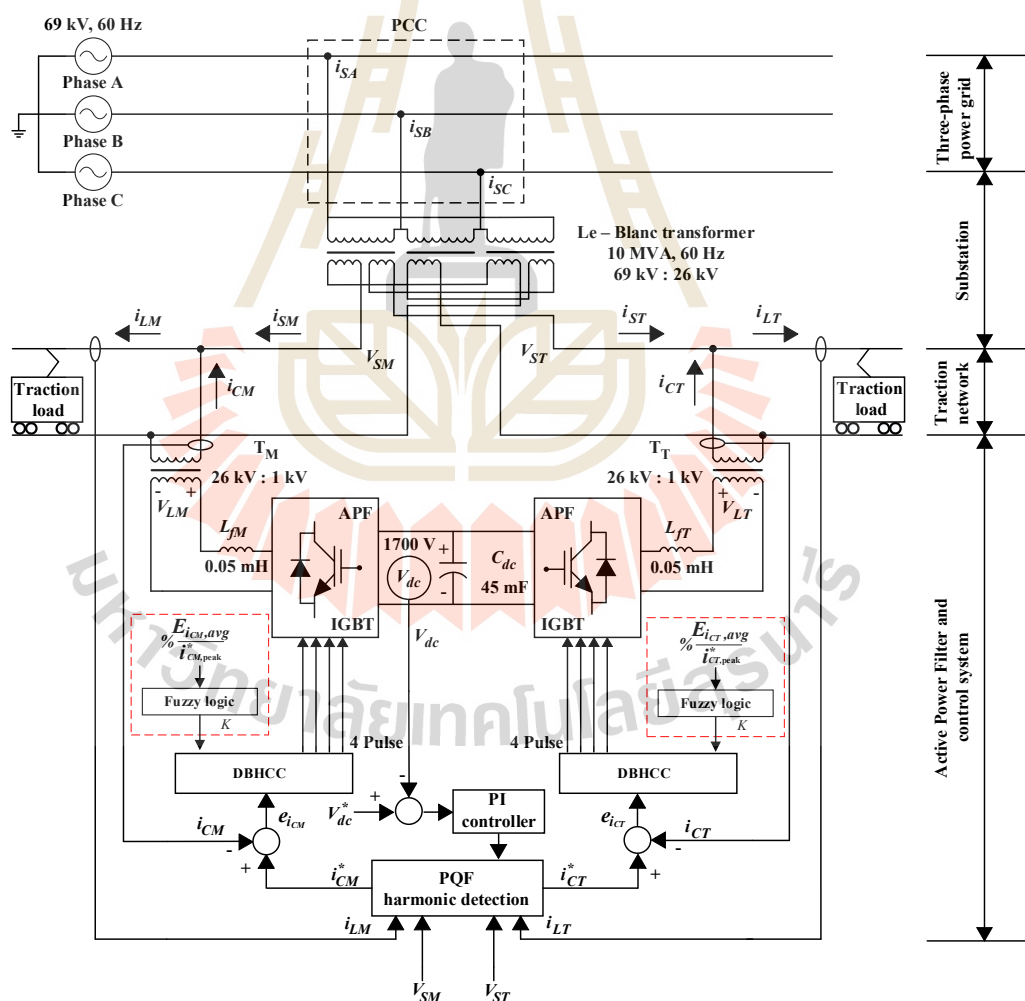


รูปที่ 6.9 ฟังก์ชันสมาชิกรูปประฆังคว่ำ

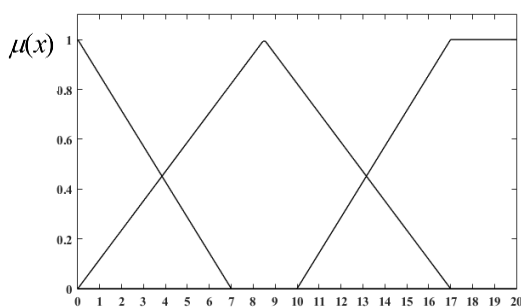
6.4.1 การทดสอบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซีลอจิก

การออกแบบโครงสร้างของฟัซซีลอจิกสำหรับใช้ปรับค่า HB ของตัวควบคุม DBHCC ในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟดังรูปที่ 6.10 กำหนดให้โหลดรถไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติตามข้อมูลกระแสโหลดที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าได้วัน โดยเริ่มต้นจากการออกแบบ

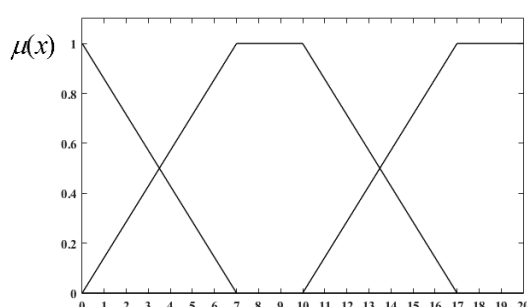
รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซีลอจิกด้วยวิธีการทดสอบเปรียบเทียบการใช้งานรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกทั้งหมด 4 รูปร่าง ได้แก่ ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน และฟังก์ชันสมาชิกรูปประฆังคว่ำ โดยกำหนดใช้รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตเหมือนกัน และกำหนดขอบเขตตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตเท่ากันทั้งหมด 4 รูปร่าง ดังแสดงในรูปที่ 6.11 และเพื่อพิจารณาเพียงผลของรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก จึงกำหนดโครงสร้างส่วนอื่น ๆ ของฟัซซีลอจิกให้เหมือนกัน ได้แก่ กำหนดใช้จำนวนฟังก์ชันสมาชิกเท่ากับ 3 ฟังก์ชันสมาชิก กำหนดตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของอินพุตและเอาต์พุตตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.5 ใช้กฎฟัซซีตามการอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.6 และกำหนดวิธีการอนุมานฟัซซีแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุดที่มีการทำดีฟัซซีแบบ COG ของ Mamdani



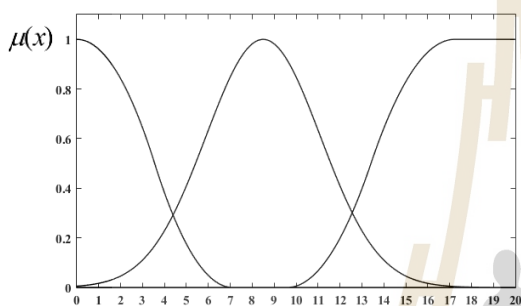
รูปที่ 6.10 ระบบกำจัดฮาร์โมนิกที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ร่วมกับฟัซซีลอจิก



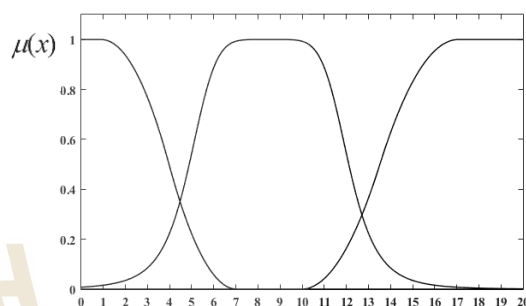
(ก) ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยม



(ข) ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



(ค) ฟังก์ชันสมาชิกรูปเกาส์เซียน



(ง) ฟังก์ชันสมาชิกรูปประฆังคว่ำ

รูปที่ 6.11 รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของฟuzzyลอจิก

ผลการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์โมนิกของรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.1 จากตารางดังกล่าว พบว่า ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมูให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์โมนิก โดยมีแนวโน้มของค่า %THD น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจำนวนครั้งการสวิตช์พบว่า มีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อจำนวนครั้งการสวิตช์ อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมูเป็นรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตของฟuzzyลอจิกสำหรับทำงานร่วมกับตัวควบคุม DBHCC ต่อไป

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซี่ลอจิก

รูปร่างฟังก์ชันสมาชิก	ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่าย เฟสรวม		ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส			จำนวน ครั้งการ สวิตช์ (ครั้ง)
	เฟส T	เฟส M	เฟส A	เฟส B	เฟส C	
	ก่อนการชดเชย					
	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	
	ภายหลังการชดเชย					
ฟังก์ชันสมาชิกรูป สามเหลี่ยม	4.18%	4.26%	4.18%	4.24%	4.24%	6420
ฟังก์ชันสมาชิกรูป สี่เหลี่ยมคางหมู	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
ฟังก์ชันสมาชิกรูป เกาส์เซียน	4.31%	4.23%	4.31%	4.25%	4.25%	6452
ฟังก์ชันสมาชิกรูป ระฆังคว่ำ	4.26%	4.16%	4.26%	4.22%	4.16%	6446

6.5 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา

ฟัซซี่ลอจิกประกอบด้วยฟังก์ชันสมาชิกสำหรับอินพุตและเอาต์พุต และเพื่อตอบสนองกลไกการคิดและความเข้าใจของมนุษย์จึงกำหนดฟังก์ชันสมาชิกดังกล่าวในรูปของตัวแปรภาษา (Linguistic variables) ซึ่งเป็นภาษาที่มนุษย์สามารถเข้าใจได้ โดยค่าของตัวแปรภาษาไม่ได้เป็นค่าเชิงจำนวนจริง แต่เป็นชุดของค่าเชิงภาษา (Linguistic values) ที่ระบุระดับของตัวแปรภาษาดังกล่าว

6.5.1 การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา

ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ร่วมกับฟัซซี่ลอจิก แสดงได้ดังรูปที่ 6.12 จากรูปดังกล่าว อินพุตของฟัซซี่ลอจิก คือ ร้อยละของอัตราส่วนระหว่างขนาดค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของกระแสชดเชย ($E_{ic,avg}$) ต่อค่าสูงสุดของกระแสอ้างอิง ($I_{C,peak}^*$) ส่วนเอาต์พุตของ

ฟิชซีลอจิกจะกำหนดเป็นค่าเกณฑ์ K สำหรับปรับค่า HB ทั้งนี้ สามารถอธิบายรายละเอียดถึงที่มาและเหตุผลของการกำหนดอินพุตและเอาต์พุตของฟิชซีลอจิกดังกล่าว ได้ดังนี้

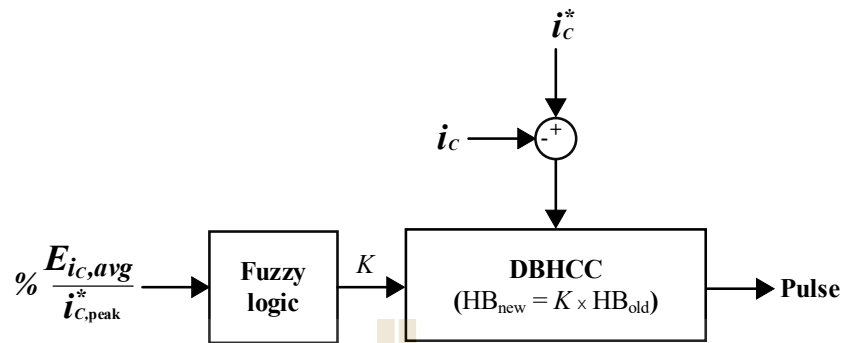
การกำหนดอินพุตของฟิชซีลอจิก โดยทั่วไปการออกแบบฟิชซีลอจิกสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยมีเป้าหมายเพื่อลดค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่าย แต่ไม่สามารถนำค่า %THD มาใช้เป็นอินพุตได้โดยตรง เนื่องจากกระบวนการคำนวณมีความซับซ้อนและไม่เหมาะสมต่อการประมวลผลแบบเวลาจริง จึงจำเป็นต้องเลือกตัวแปรอื่นที่สามารถสะท้อนแนวโน้มของค่า %THD ได้แทน การใช้อินพุตเป็นค่าความผิดพลาดของกระแสชดเชย (e_{ic}) ซึ่งคำนวณจากผลต่างระหว่างกระแสอ้างอิง (i_C^*) และกระแสชดเชย (i_C) พบว่า ไม่เพียงพอที่จะสะท้อนแนวโน้มของค่า %THD ได้ในการณีกระแสโหลดเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการพิจารณาเฉพาะค่า e_{ic} ไม่สามารถบ่งบอกระดับความมากน้อยของความผิดพลาดเมื่อสถานะของกระแสโหลดแตกต่างกันได้ ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้อินพุตเป็น ร้อยละของอัตราส่วนระหว่างขนาดค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของกระแสชดเชย ($E_{ic,avg}$) ตามสมการที่ (6.8) ต่อค่าสูงสุดของกระแสอ้างอิง ($i_{C,peak}^*$) วิธีการนี้ช่วยให้ฟิชซีลอจิกสามารถประเมินระดับของค่า e_{ic} ได้อย่างแม่นยำ โดยอ้างอิงตามสถานะกระแสโหลดในขณะนั้น ส่งผลให้กระบวนการควบคุมมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

การกำหนดเอาต์พุตของฟิชซีลอจิก เนื่องจากฟิชซีลอจิกถูกใช้เพื่อปรับเปลี่ยนค่า HB ของตัวควบคุม DBHCC ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงออกแบบการปรับค่า HB ผ่านค่าเกณฑ์ K ซึ่งจะถูกนำไปคูณกับค่าแถบฮิสเตอร์ซิสค่าเก่า (HB_{old}) เพื่ออัปเดตเป็นค่าแถบฮิสเตอร์ซิสค่าใหม่ (HB_{new}) แสดงได้ดังสมการ (6.9) ซึ่งค่าแถบฮิสเตอร์ซิสค่าใหม่ (HB_{new}) จะถูกกำหนดเป็นค่า HB ของตัวควบคุม DBHCC ต่อไป

$$E_{ic,avg} = \frac{\sum_{n=1}^N |e_{ic,n}|}{N} \quad (6.8)$$

โดยที่ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดของค่า e_{ic}
 $e_{ic,n}$ คือ ค่า e_{ic} ตำแหน่งข้อมูลที่ n

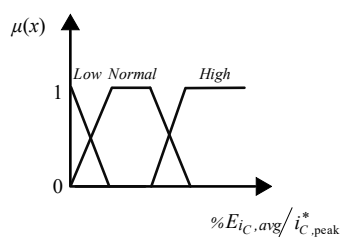
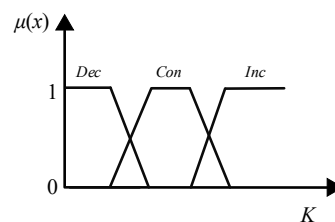
$$HB_{new} = K \times HB_{old} \quad (6.9)$$



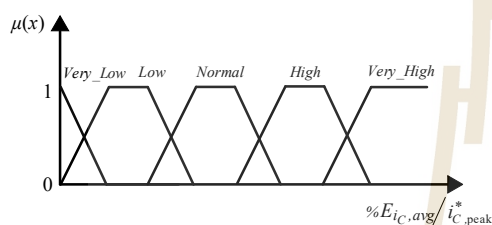
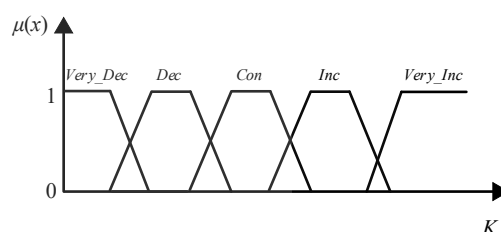
รูปที่ 6.12 ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ร่วมกับฟัซซี่ลอจิก

การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงทางภาษาของฟัซซี่ลอจิก จะนำเสนอเปรียบเทียบกรณีใช้จำนวนฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมูจำนวน 3 และ 5 ฟังก์ชันสมาชิก ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ในตารางที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ

จากตารางที่ 6.2 กรณีใช้ 3 ฟังก์ชันสมาชิก กำหนดอินพุต $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ และ เอาต์พุต K เป็นตัวแปรภาษา โดยที่อินพุต $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ ประกอบด้วยค่าเชิงภาษา 3 ระดับ ได้แก่ “Zero” “Normal” และ “High” ซึ่งสามารถแสดงฟังก์ชันสมาชิกได้ดังรูปที่ 6.13(ก) ส่วน เอาต์พุต K จะประกอบด้วยค่าเชิงภาษา 3 ระดับ เช่นเดียวกับอินพุต ได้แก่ “Dec” “Con” และ “Inc” แสดงได้ดังรูปที่ 6.13(ข) โดยความหมายของค่าเชิงภาษาในแต่ละระดับดังกล่าวอธิบายไว้ในตารางที่ 6.2 นอกจากนี้ ฟัซซี่ลอจิกสามารถเพิ่มจำนวนฟังก์ชันสมาชิกเพื่อความละเอียดและความแม่นยำของระบบควบคุมที่พิจารณา โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเพิ่มจำนวนฟังก์ชันสมาชิกเท่ากับ 5 ฟังก์ชันสมาชิก ซึ่งมีรายละเอียดการออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาแสดงได้ดังตารางที่ 6.3 โดยที่อินพุต $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ จะประกอบด้วยค่าเชิงภาษาทั้งหมด 5 ระดับ ได้แก่ “Zero” “Low” “Normal” “High” และ “Very_High” และฟังก์ชันสมาชิกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.14(ก) ส่งผลให้อาต์พุต K มีจำนวนค่าเชิงภาษา 5 ระดับที่สอดคล้องกับอินพุต $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ ได้แก่ “Very_Dec” “Dec” “Con” “Inc” และ “Very_Inc” ซึ่งแสดงฟังก์ชันสมาชิกได้ดังรูปที่ 6.14(ข)

(ก) ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต $\%E_{i_C, avg} / i_{C, peak}^*$ (ข) ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต K

รูปที่ 6.13 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุต กรณี 3 ฟังก์ชันสมาชิก

(ก) ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต $\%E_{i_C, avg} / i_{C, peak}^*$ (ข) ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต K

รูปที่ 6.14 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุต กรณี 5 ฟังก์ชันสมาชิก

ตารางที่ 6.2 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาสำหรับฟัซซีลอจิก ในกรณี 3 ฟังก์ชันสมาชิก

ค่าของระบบ	ตัวแปรภาษาและความหมาย		ค่าเชิงภาษาและความหมาย	
	ตัวแปรภาษา	ความหมาย	ค่าเชิงภาษา	ความหมาย
อินพุต	$\% \frac{E_{i_C, avg}}{i_{C, peak}^*}$	ร้อยละของอัตราส่วน	Low	ระดับของความผิดพลาดอยู่ในระดับต่ำ
		ระหว่างขนาดค่าความผิดพลาดเฉลี่ยต่อค่าสูงสุด	Normal	ระดับของความผิดพลาดอยู่ในระดับปกติ
		ของกระแสอ้างอิง	High	ระดับของค่าความผิดพลาดอยู่ในระดับสูง
เอาต์พุต	K	ค่าเกนคูณปรับแถบฮิสเตอร์ซิส	Dec (Decrease)	ลดลง
			Con (Constant)	คงที่
			Inc (Increase)	เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 6.3 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาสำหรับฟัซซีลอจิก ในกรณี 5 ฟังก์ชันสมาชิก

ค่าของระบบ	ตัวแปรภาษาและความหมาย		ค่าเชิงภาษาและความหมาย	
	ตัวแปรภาษา	ความหมาย	ค่าเชิงภาษา	ความหมาย
อินพุต	$\% \frac{E_{i_c, avg}}{i_{C, peak}^*}$	ร้อยละของอัตราส่วนระหว่างขนาดค่าความผิดพลาดเฉลี่ยต่อค่าสูงสุดของกระแสอ้างอิง	Very_Low	ระดับของความผิดพลาดอยู่ในระดับต่ำมาก
			Low	ระดับของความผิดพลาดอยู่ในระดับต่ำ
			Normal	ระดับของความผิดพลาดอยู่ในระดับปกติ
			High	ระดับของความผิดพลาดอยู่ในระดับสูง
			Very_High	ระดับของความผิดพลาดอยู่ในระดับสูงมาก
เอาต์พุต	K	ค่าเกณฑ์ปรับแก้ฮิสเตอรีซิส	Very_Dec (Very decrease)	ลดลงมาก
			Dec (Decrease)	ลดลง
			Con (Constant)	คงที่
			Inc (Increase)	เพิ่มขึ้น
			Very_Inc (Very increase)	เพิ่มขึ้นมาก

การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างจำนวนฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมูในกรณีใช้จำนวน 3 และ 5 ฟังก์ชันสมาชิก โดยกำหนดกฎของฟัซซีตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.6 และวิธีการอนุมานฟัซซีแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุดที่มีการทำดีฟัซซีแบบ COG ของ Mamdani เหมือนกันทั้งสองกรณี เพื่อพิจารณาเพียงผลกระทบเนื่องจากจำนวนฟังก์ชันสมาชิกที่มีต่อระบบควบคุมเท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบจำนวนฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซีลอจิก

จำนวนฟังก์ชันสมาชิก	ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่าย เฟสรวม		ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส			จำนวน ครั้งการ สวิตช์ (ครั้ง)
	เฟส T	เฟส M	เฟส A	เฟส B	เฟส C	
	ก่อนการชดเชย					
	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	
	ภายหลังการชดเชย					
3 ฟังก์ชันสมาชิก	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
5 ฟังก์ชันสมาชิก	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908

จากตารางที่ 6.4 พบว่า ในกรณีใช้จำนวน 3 และ 5 ฟังก์ชันสมาชิก ให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์โมนิกที่มีค่า %THD และจำนวนครั้งการสวิตช์เท่ากัน ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้จำนวนฟังก์ชันสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมูจำนวน 3 ฟังก์ชันสมาชิกสำหรับอินพุตและเอาต์พุตของฟัซซีลอจิกที่ทำงานร่วมกับตัวควบคุม DBHCC เนื่องจากมีความซับซ้อนน้อยกว่าในกระบวนการคำนวณของฟัซซีลอจิก

6.6 กฎฟัซซี

กฎฟัซซี (Fuzzy rules) คือ เงื่อนไขการควบคุมของฟัซซีลอจิก ใช้สำหรับตรวจสอบอินพุตและกำหนดเอาต์พุตของการควบคุม ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเงื่อนไข และส่วนข้อปฏิบัติ สามารถแสดงได้ดังนี้

IF x is A (เงื่อนไข)

THEN y is B (ข้อปฏิบัติ)

โดยที่ x y คือ ตัวแปรภาษา และ A B คือ ค่าเชิงภาษา

ในกรณีที่กฎฟuzzyมีเงื่อนไขมากกว่าหนึ่งข้อลักษณะของกฎฟuzzyจะใช้ตัวดำเนินการทางฟuzzyเซต เช่น ยูเนียน (OR) และอินเตอร์เซกชัน (AND) โดยแสดงตัวอย่างกฎฟuzzyได้ดังนี้

IF x is A AND y is B OR z is C

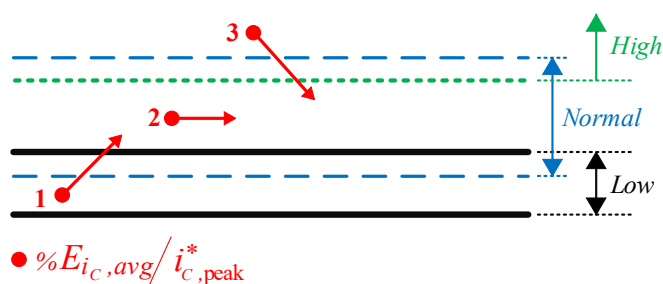
THEN d is D

โดยที่ x y z d คือ ตัวแปรภาษา และ A B C D คือ ค่าเชิงภาษา

6.6.1 การออกแบบกฎฟuzzy

ฟuzzyลอจิกถูกนำมาใช้ปรับค่า HB ของตัวควบคุม DBHCC โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF เพื่อประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกภายใต้การเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลด และในหัวข้อนี้จะนำเสนอการออกแบบกฎฟuzzyในกรณีใช้จำนวนฟังก์ชันสมาชิกเท่ากับ 3 และ 5 ฟังก์ชันสมาชิก ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดในแต่ละกรณีได้ดังนี้

กรณีจำนวนฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ และเอาต์พุต K เท่ากับ 3 ฟังก์ชันสมาชิก ลักษณะการปรับค่า K สำหรับใช้คูณปรับเพิ่มลดค่า HB สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.15 โดยรูปดังกล่าวแสดงขอบเขตของอินพุต $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ ที่กำหนดเป็นค่าเชิงภาษา 3 ระดับ ได้แก่ “Low” “Normal” และ “High” และสามารถออกแบบกฎฟuzzyได้จำนวน 3 ข้อดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.15 ลักษณะของกระแสชดเชยสำหรับออกแบบกฎฟuzzy ในกรณีใช้ 3 ฟังก์ชันสมาชิก

1. IF $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ = Low THEN K = Inc
2. IF $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ = Normal THEN K = Con
3. IF $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ = High THEN K = Dec

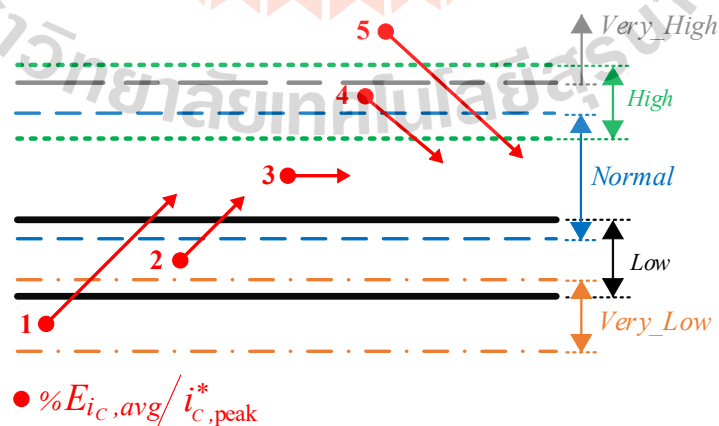
จากการออกแบบกฎฟuzzyในกรณีใช้จำนวนฟังก์ชันสมาชิกเท่ากับ 3 ฟังก์ชันสมาชิกสามารถอธิบายความหมายของกฎในแต่ละข้อ ดังนี้

กฎข้อที่ 1 เมื่ออินพุต $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ มีค่าน้อย เท่ากับ “Low” ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดให้เอาต์พุต K มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ “Inc” ทั้งนี้ เพื่อใช้รับเพิ่ม HB ตามสมการที่ (6.9)

กฎข้อที่ 2 เมื่ออินพุต $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ มีค่าปกติ เท่ากับ “Normal” ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดให้เอาต์พุต K มีค่าเท่ากับ “Con” เพื่อคงค่า HB ตามสมการที่ (6.9)

กฎข้อที่ 3 เมื่ออินพุต $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ มีค่าอยู่ในระดับสูง เท่ากับ “High” ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดให้เอาต์พุต K มีค่าน้อยลง เท่ากับ “Dec” เพื่อปรับลดค่า HB ตามสมการที่ (6.9)

กรณีจำนวนฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ และเอาต์พุต K เท่ากับ 5 ฟังก์ชันสมาชิก ลักษณะของกระแสดเซยที่ใช้ในการออกแบบกฎฟuzzyสำหรับกรณีดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 6.16 โดยรูปดังกล่าวแสดงขอบเขตของอินพุต $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ ที่กำหนดเป็นค่าเชิงภาษา 5 ระดับ ได้แก่ “Zero” “Low” “Normal” “High” และ “Very_High” และสามารถแสดงกฎฟuzzyจำนวน 5 ข้อดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.16 ลักษณะของกระแสดเซยสำหรับออกแบบกฎฟuzzy ในกรณีใช้ 5 ฟังก์ชันสมาชิก

1. IF $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^* = \text{Very_Low}$ THEN $K = \text{Very_Inc}$

2. IF $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^* = \text{Low}$ THEN $K = \text{Inc}$

3. IF $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^* = \text{Normal}$ THEN $K = \text{Con}$

4. IF $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^* = \text{High}$ THEN $K = \text{Dec}$

5. IF $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^* = \text{Very_High}$ THEN $K = \text{Very_Dec}$

จากการออกแบบกฎฟัซซีในกรณีใช้จำนวนฟังก์ชันสมาชิกเท่ากับ 5 ฟังก์ชันสมาชิกสามารถอธิบายความหมายของกฎในแต่ละข้อ ดังนี้

กฎข้อที่ 1 เมื่ออินพุต $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ มีค่าน้อยมาก เท่ากับ “Very_Low” ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้มาก กำหนดให้เอาต์พุต K มีค่าเพิ่มขึ้นมาก เท่ากับ “Very_Inc” เพื่อปรับเพิ่มค่า HB ตามสมการที่ (6.9)

กฎข้อที่ 2 เมื่ออินพุต $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ มีค่าน้อย เท่ากับ “Low” ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดให้เอาต์พุต K มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ “Inc” เพื่อปรับเพิ่มค่า HB ตามสมการที่ (6.9)

กฎข้อที่ 3 เมื่ออินพุต $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ มีค่าปกติ เท่ากับ “Normal” ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดให้เอาต์พุต K มีค่าเท่ากับ “Con” เพื่อคงค่า HB ตามสมการที่ (6.9)

กฎข้อที่ 4 เมื่ออินพุต $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ มีค่าสูง เท่ากับ “High” ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ กำหนดให้เอาต์พุต K มีค่าน้อยลง เท่ากับ “Dec” เพื่อปรับลดค่า HB ตามสมการที่ (6.9)

กฎข้อที่ 5 เมื่ออินพุต $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ มีค่าสูงมาก เท่ากับ “Very_High” ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้มาก กำหนดให้เอาต์พุต K มีค่าน้อยลงมาก เท่ากับ “Very_Dec” เพื่อปรับลดค่า HB ตามสมการที่ (6.9)

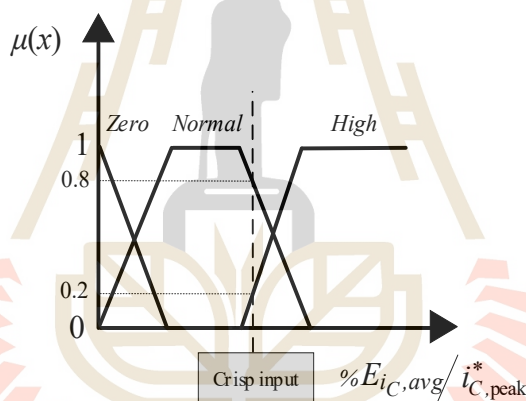
6.7 การอนุมานฟัซซี

การอนุมานฟัซซี (Fuzzy inference) คือ กระบวนการส่งผ่านอินพุตจากระบบไปสู่ค่าเอาต์พุตตามการประเมินกฎของฟัซซีที่ได้ออกแบบไว้ โดยการอนุมานฟัซซีที่นิยมใช้มี 2 วิธี คือ

การอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani (Mamdani inference) และการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno (Takagi-Sugeno inference) ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดของการอนุมานฟัซซีทั้ง 2 วิธีได้ดังนี้

การอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani (Mamdani inference) ถูกนำเสนอในปี ค.ศ. 1974 โดย E.H. Mamdani [13] โดยประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การทำฟัซซี (Fuzzification) การประเมินกฎฟัซซี (Fuzzy rule evaluation) การรวมกฎ (Aggregation) และการทำให้ฟัซซี (Defuzzification) ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การทำฟัซซี (Fuzzification) คือ กระบวนการแปลงค่าอินพุตชัดเจน (Crisp input) จากระบบที่พิจารณา เป็นค่าอินพุตของฟัซซีในรูปค่าเชิงภาษาและค่าความเป็นสมาชิกที่สอดคล้องกับรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกที่เลือกใช้ โดยสามารถแสดงตัวอย่างการทำฟัซซีได้ดังรูปที่ 6.17 จากรูปดังกล่าวค่าอินพุตชัดเจน $\%E_{iC,avg} / i_{C,peak}^*$ อยู่ภายในฟัซซีเซตที่มีค่าเชิงภาษา คือ ระดับปกติ (Normal) และระดับสูง (High) ด้วยค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.8 และ 0.2 ตามลำดับ

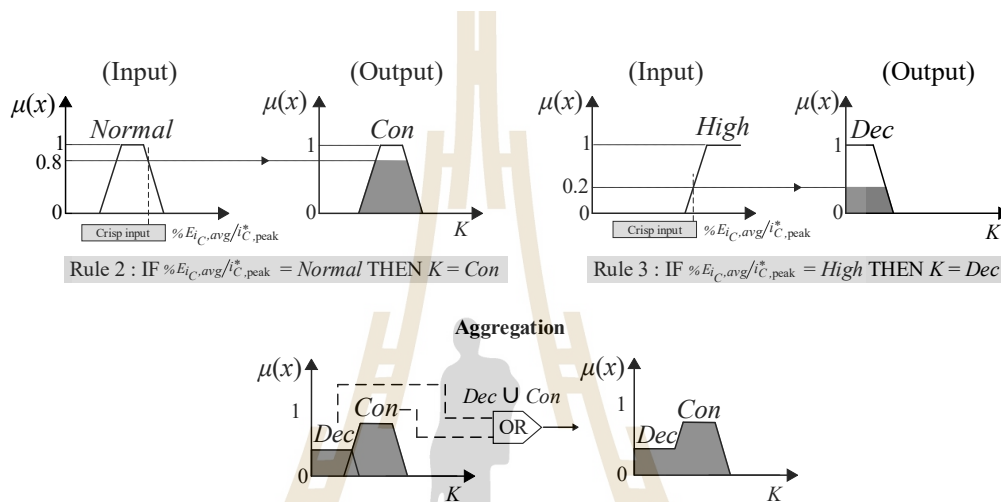


รูปที่ 6.17 การทำฟัซซี

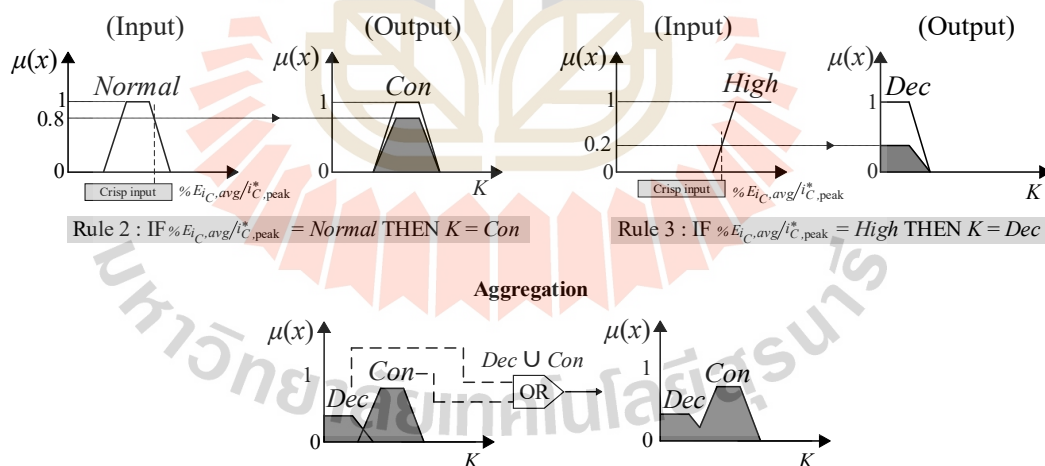
ขั้นตอนที่ 2 การประเมินกฎฟัซซี (Fuzzy rule evaluation) คือ การประเมินค่าอินพุตของฟัซซี (ค่าเชิงภาษาและค่าความเป็นสมาชิก) จากขั้นตอนที่ 1 ตามกฎฟัซซีที่ได้ออกแบบไว้ โดยพิจารณาค่าอินพุตของฟัซซีที่มีความสอดคล้องกับส่วนเงื่อนไขของ IF เพื่อกำหนดเป็นค่าเชิงภาษาและค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรภาษาเอาต์พุตที่สอดคล้องกับข้อปฏิบัติของ THEN ในกฎฟัซซีข้อนั้น ๆ โดยการประเมินกฎฟัซซีมี 2 วิธี คือ การตัดค่ายอด (Clipped) และการปรับขนาด (Scaled)

ขั้นตอนที่ 3 การรวมกฎ (Aggregation) คือ การรวมฟัซซีเซตค่าเชิงภาษาเอาต์พุตจากการประเมินกฎฟัซซีที่เป็นจริงในทุกข้อ เนื่องจากค่าอินพุตของฟัซซีอาจทำให้กฎฟัซซีเป็นจริงหลายกฎพร้อมกัน ผลลัพธ์นี้จะอยู่ในรูปฟัซซีเซตค่าเชิงภาษาเอาต์พุตที่มากกว่าหนึ่งชุด การรวมฟัซซีเซตค่าเชิงภาษาเอาต์พุตดังกล่าวผ่านการดำเนินการแบบยูเนียน (OR) เรียกว่า การรวมกฎฟัซซี

การอนุมานฟัซซีที่อาศัยการรวมกฎจากการประเมินกฎที่แตกต่างกันมี 2 วิธี ได้แก่ การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด (Maximum-minimum) คือ การอนุมานฟัซซีที่อาศัยการรวมกฎจากการประเมินกฎแบบการตัดค่ายอด และการอนุมานแบบค่าสูงสุด-ผลคูณ (Maximum-product) คือ การอนุมานฟัซซีที่อาศัยการรวมกฎจากการประเมินกฎแบบการปรับขนาด โดยสามารถแสดงตัวอย่างการอนุมานฟัซซีด้วยวิธีการดังกล่าวได้ดังรูปที่ 6.18 และ 6.19 ตามลำดับ



รูปที่ 6.18 การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด (Maximum-minimum)



รูปที่ 6.19 การอนุมานแบบค่าสูงสุด-ผลคูณ (Maximum-product)

ขั้นตอนที่ 4 การทำดีฟัซซี (Defuzzification) คือ กระบวนการแปลงฟัซซีเซตเอาต์พุตเป็นค่าเอาต์พุตชัดเจน (Crisp output) เพื่อนำไปใช้ควบคุมระบบที่พิจารณา โดยมีวิธีที่นิยมใช้ในการทำดีฟัซซี ได้แก่ วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity: COG) วิธีไบเซกเตอร์ (Bisector of Area: BOA) วิธีหาค่าน้อยสุดของค่าสูงสุด (Smallest of Maximum: SOM) วิธีหาค่ามากที่สุดของค่าสูงสุด

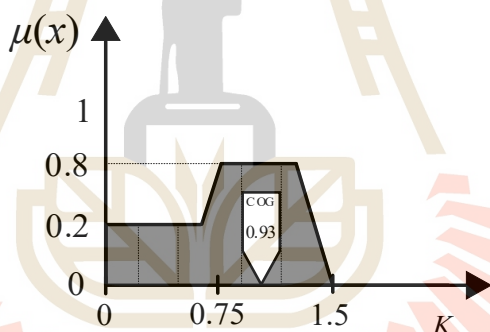
(Largest of Maximum: LOM) และ วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (Mean of Maximum: MOM) ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดในแต่ละวิธีได้ดังนี้

วิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity: COG) : สมการคำนวณหาเอาต์พุตชัดเจนแสดงได้ดังสมการที่ (6.10) โดยในทางปฏิบัติจะทำการชักตัวอย่างค่าตัวแปร x ใด ๆ ดังสมการที่ (6.11) และเมื่อพิจารณาฟัซซีเซตเอาต์พุตที่ได้จากการอนุมานแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุดดังรูปที่ 6.20 สามารถแสดงการทำดีฟัซซีแบบ COG ได้ดังนี้

$$COG = \frac{\int_a^b \mu(x)xdx}{\int_a^b \mu(x)dx} \quad (6.10)$$

$$COG = \frac{\sum_{x=a}^b \mu(x)x}{\sum_{x=a}^b \mu(x)} \quad (6.11)$$

โดยที่ $\mu(x)$ คือ ค่าความเป็นสมาชิกสำหรับตัวแปร x ใด ๆ ในฟัซซีเซตเอาต์พุต



รูปที่ 6.20 การทำดีฟัซซีแบบ COG

$$COG = \frac{0 \times 0 + (0.3 + 0.6) \times 0.2 + (0.9 + 1.2) \times 0.8 + 1.5 \times 0}{0 + 0.2 + 0.2 + 0.8 + 0.8 + 0} = 0.93$$

ค่าเอาต์พุตชัดเจน K จากการทำดีฟัซซีแบบ COG มีค่าเท่ากับ 0.93 ซึ่งจะถูกนำไปคูณปรับค่า HB ต่อไป อย่างไรก็ตาม การทำดีฟัซซีแบบ COG จะมีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อกำหนดช่วงการชักตัวอย่างน้อยลง (จำนวนข้อมูลจากการชักตัวอย่างมากขึ้น)

วิธีไบเซกเตอร์ (Bisector of Area: BOA) : การทำดีฟัซซีแบบ BOA จะกำหนดเงื่อนไขค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตเอาต์พุต ($\mu(x)^*$) ดังสมการที่ (6.12)

$$\mu(x)^* \geq \frac{\sum \mu(x)}{2} \quad (6.12)$$

โดยที่ $\sum \mu(x)$ คือ ผลรวมค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร x ใด ๆ ในฟัซซีเซตเอาต์พุต

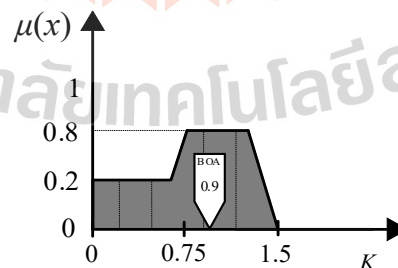
ค่า $\mu(x)^*$ จะถูกใช้เป็นเงื่อนไขในการตรวจสอบเพื่อหาค่าเอาต์พุตชัดเจน โดยตรวจสอบร่วมกับค่าความเป็นสมาชิก ($\mu(x)_n^*$) ที่คำนวณจากสมการที่ (6.13) ผ่านเงื่อนไข $\mu(x)_n^* \geq \mu(x)^*$

$$\mu(x)_n^* = \mu(x)_{n-1}^* + \mu(x)_n \quad (6.13)$$

โดยที่ n คือ จำนวนรอบในการตรวจสอบ 0, 1, 2, 3, ... , n

จากสมการที่ (6.13) ค่าความเป็นสมาชิกสำหรับรอบการตรวจสอบที่ 0 จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 ($\mu(x)_0^* = 0$) และในรอบการตรวจสอบถัดไปจะเริ่มตรวจสอบค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร x ค่าที่ 1 โดยตรวจสอบผ่านเงื่อนไข $\mu(x)_n^* \geq \mu(x)^*$ ถ้าไม่เป็นจริงตามเงื่อนไขดังกล่าว จำนวนรอบการตรวจสอบจะถูกเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเงื่อนไขดังกล่าวเป็นจริง โดยค่าตัวแปร x ตำแหน่งที่ทำให้เงื่อนไขเป็นจริงจะถูกกำหนดเป็นค่าเอาต์พุตชัดเจนของระบบ โดยสามารถแสดงตัวอย่างการทำได้ฟัซซีแบบ BOA ซึ่งพิจารณาฟัซซีเซตเอาต์พุตดังรูปที่ 6.21 และข้อมูลค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร x ใด ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 6.5 จากตารางดังกล่าวสามารถคำนวณค่า $\mu(x)^*$ จากสมการที่ (6.12) ได้ดังนี้

$$\mu(x)^* \geq \frac{0.2 + 0.2 + 0.8 + 0.8}{2} = 1$$



รูปที่ 6.21 การทำได้ฟัซซีแบบ BOA

ตารางที่ 6.5 ข้อมูลค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร x ใด ๆ สำหรับการทำดีฟัซซี่แบบ BOA

$\mu(x)_n$	0	0.2	0.2	0.8	0.8	0
x	0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
n	0	1	2	3	4	5

จากค่า $\mu(x)^*$ มากกว่าเท่ากับ 1 จะถูกใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับการคำนวณค่า $\mu(x)_n^*$ ตามสมการที่ (6.13) โดยสามารถแสดงการคำนวณได้ดังตารางที่ 6.6 และจากตารางพบว่าจำนวนรอบในการตรวจสอบ (n) ที่ 3 มีค่า $\mu(x)_3^* = 1.2$ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไข $\mu(x)_3^* \geq \mu(x)^*$ ($1.2 \geq 1$) โดยมีค่าตัวแปร x เท่ากับ 0.9 ดังนั้น ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซี่แบบ BOA จะเท่ากับ 0.9 นั่นคือ ค่าเกณฑ์ K สำหรับนำไปคูณปรับกับค่า HB เท่ากับ 0.9

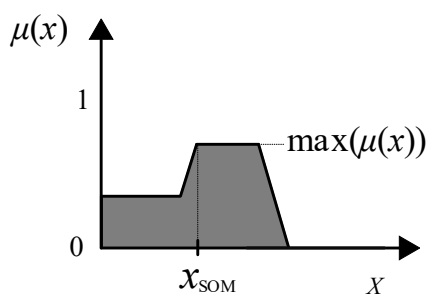
ตารางที่ 6.6 การตรวจสอบค่าความเป็นสมาชิก

n	$\mu(x)_n^* = \mu(x)_{n-1}^* + \mu(x)_n$
0	$\mu(x)_0^* = 0$
1	$\mu(x)_1^* = \mu(x)_0^* + \mu(x)_1 = 0 + 0.2 = 0.2$
2	$\mu(x)_2^* = \mu(x)_1^* + \mu(x)_2 = 0.2 + 0.2 = 0.4$
3	$\mu(x)_3^* = \mu(x)_2^* + \mu(x)_3 = 0.4 + 0.8 = 1.2$

วิธีหาค่าน้อยสุดของค่าสูงสุด (Smallest of Maximum: SOM) : เอาต์พุตชัดเจนจากการทำดีฟัซซี่แบบ SOM จะอาศัยฟังก์ชันการคำนวณสมการที่ (6.14) ซึ่งได้จากตำแหน่งตัวแปร x ค่าน้อยที่สุดที่มีค่าความเป็นสมาชิกมากที่สุด โดยสามารถแสดงตำแหน่งตัวแปร x ดังกล่าวได้ดังรูปที่ 6.22 และตัวอย่างการทำดีฟัซซี่แบบ SOM สามารถดูได้จากรูปที่ 6.23

$$SOM = \min \{x | \mu(x) = \max(\mu(x))\} \quad (6.14)$$

โดยที่ $\max(\mu(x))$ คือ ค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดของฟัซซี่เซตเอาต์พุต

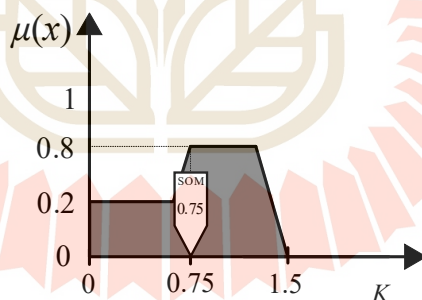


รูปที่ 6.22 การทำดีฟัซซีแบบ SOM

จากรูปที่ 6.23 ค่าความเป็นสมาชิกสูงสุด ($\max(\mu(x))$) มีค่าเท่ากับ 0.8 และค่าเอาต์พุตชัดเจนจากการทำดีฟัซซีแบบ SOM แสดงได้ดังนี้

$$\text{SOM} = \min \{x | \mu(x) = 0.8\} = 0.75$$

จากการทำดีฟัซซีแบบ SOM ดังกล่าว ค่าเอาต์พุตชัดเจนมีค่าเท่ากับ 0.75 หรือค่า K สำหรับนำไปคูณปรับกับค่า HB เท่ากับ 0.75



รูปที่ 6.23 ผลลัพธ์เอาต์พุตชัดเจนจากการทำดีฟัซซีแบบ SOM

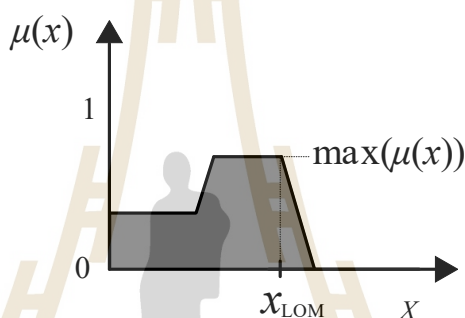
วิธีหาค่ามากที่สุดของค่าสูงสุด (Largest of Maximum: LOM) : การคำนวณค่าเอาต์พุตชัดเจนจากการทำดีฟัซซีแบบ LOM จะใช้ฟังก์ชันการคำนวณตามสมการที่ (6.15) ซึ่งได้จากตำแหน่งตัวแปร x ค่ามากที่สุดที่มีค่าความเป็นสมาชิกมากที่สุด สามารถแสดงตำแหน่งตัวแปร x ดังกล่าวได้ดังรูปที่ 6.24 โดยตัวอย่างการทำดีฟัซซีแบบ LOM จะพิจารณาดังรูปที่ 6.25 และสามารถแสดงตัวอย่างการทำดีฟัซซีแบบ LOM ได้ดังนี้

$$\text{LOM} = \max \{x | \mu(x) = \max(\mu(x))\} \quad (6.15)$$

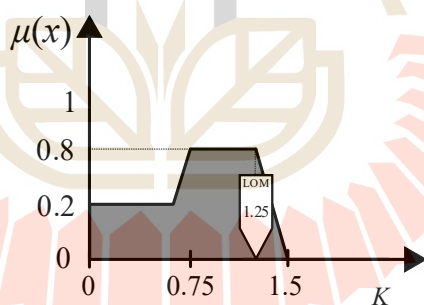
$$\max(\mu(x)) = 0.8$$

$$\text{LOM} = \max \{x | \mu(x) = 0.8\} = 1.25$$

จากการทำดีฟัซซีแบบ LOM ดังกล่าว ค่าเอาต์พุตชัดเจนมีค่าเท่ากับ 1.25 หรือค่า $K = 1.25$ สำหรับนำไปคูณปรับค่า HB



รูปที่ 6.24 การทำดีฟัซซีแบบ LOM



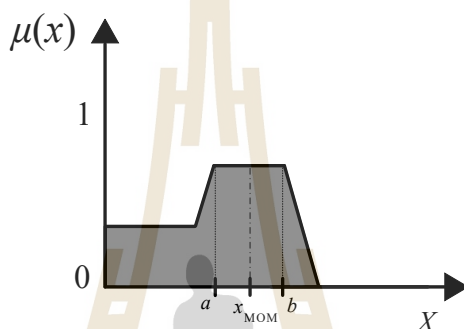
รูปที่ 6.25 ผลลัพธ์เอาต์พุตชัดเจนจากการทำดีฟัซซีแบบ LOM

วิธีหาค่าเฉลี่ยของค่าสูงสุด (Mean of Maximum: MOM) : การทำดีฟัซซีแบบ MOM สามารถหาค่าเอาต์พุตชัดเจนตามสมการที่ (6.16) ซึ่งเป็นการคำนวณค่าเฉลี่ยของตัวแปร x ที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดเท่ากัน โดยสามารถแสดงตำแหน่งตัวแปร x ดังกล่าวได้ดังรูปที่ 6.26 จากรูปกำหนด a คือ ตำแหน่งตัวแปร x ค่าน้อยที่สุดที่มีค่าความเป็นสมาชิกมากที่สุด และ b คือ ตำแหน่งตัวแปร x ค่ามากที่สุดที่มีค่าความเป็นสมาชิกมากที่สุด โดยตัวอย่างการทำดีฟัซซีแบบ MOM จะพิจารณาดังรูปที่ 6.27 จากรูปดังกล่าวค่า a และ b มีค่าเท่ากับ 0.75 และ 1.25 ตามลำดับ ดังนั้น เอาต์พุตชัดเจนจากการทำดีฟัซซีแบบ MOM สามารถแสดงได้ดังนี้

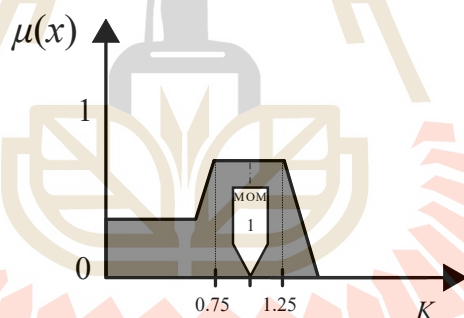
$$\text{MOM} = \frac{a+b}{2} \quad (6.16)$$

$$\text{MOM} = \frac{0.75+1.25}{2} = 1$$

จากการทำดีฟัซซี่แบบ MOM ดังกล่าวค่าเอาต์พุตชัดเจนมีค่าเท่ากับ 1 หรือค่า $K = 1$ สำหรับนำไปคูณปรับค่า HB



รูปที่ 6.26 การทำดีฟัซซี่แบบ MOM



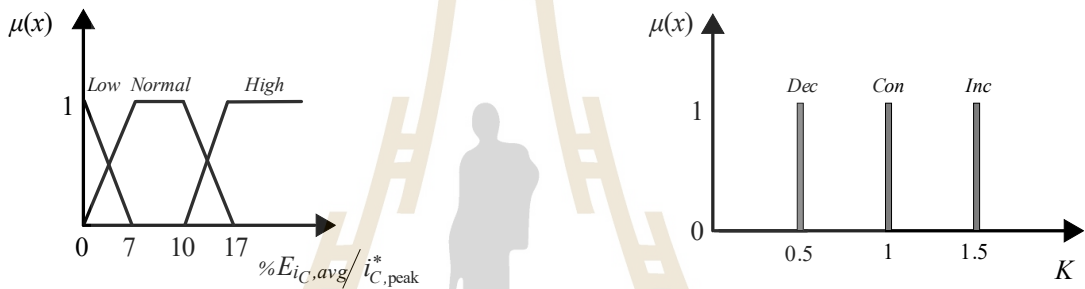
รูปที่ 6.27 ผลลัพธ์เอาต์พุตชัดเจนจากการทำดีฟัซซี่แบบ MOM

การอนุมานฟัซซี่แบบ Takagi-Sugeno (Takagi-Sugeno inference) ถูกนำเสนอในปี ค.ศ. 1985 โดย Takagi และ Sugeno [14] โดยมีลักษณะการอนุมานฟัซซี่ที่แตกต่างจากการอนุมานฟัซซี่แบบ Mamdani ในส่วนรูปร่างของฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต โดยการอนุมานฟัซซี่แบบ Takagi-Sugeno ได้ใช้ฟังก์ชันเส้นตรงแทนการใช้ฟังก์ชันสมาชิกในรูปร่างต่าง ๆ (รูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยม คางหมู ฯลฯ) สำหรับฟังก์ชันเส้นตรงที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือ ฟังก์ชันแบบจำลองฟัซซี่ของ Takagi-Sugeno อันดับศูนย์ (Zero order Takagi-Sugeno fuzzy model) ซึ่งเป็นค่าคงที่เส้นตรงโทน (k) แสดงดังรูปที่ 6.28 จึงมีความสะดวกและลดความซับซ้อนในขั้นตอนของการรวมกฎฟัซซี่

สำหรับการทำดีฟัซซีของวิธีการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno เรียกว่า คำนวณน้ำหนักเฉลี่ย (Weighted Average : WA) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (6.17) โดยที่ m คือ จำนวนจริง 1, 2, 3, ..., m

$$WA = \frac{\sum_{m=1}^m \mu(k_m) \times k_m}{\sum_{m=1}^m \mu(k_m)} \quad (6.17)$$

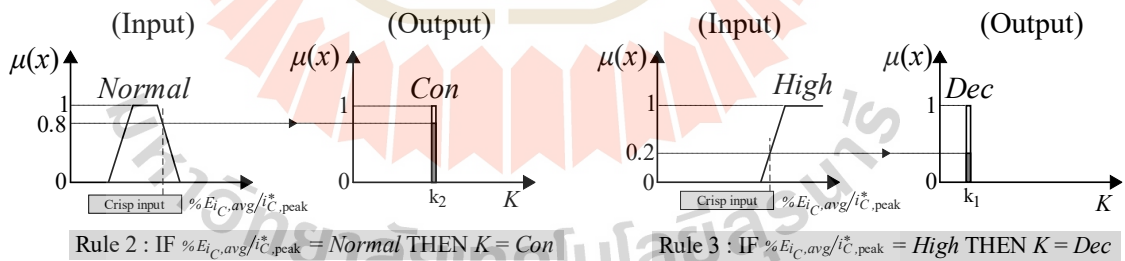
ตัวอย่างวิธีการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno กับระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ร่วมกับฟัซซีลอจิกสามารถแสดงฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ และฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต K ได้ดังรูปที่ 6.28(ก) และ 6.28(ข) ตามลำดับ ในส่วนการประเมินกฎฟัซซีและการรวมกฎสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.29



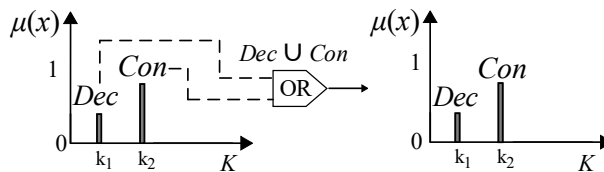
(ก) ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$

(ข) ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต K

รูปที่ 6.28 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุต



Aggregation

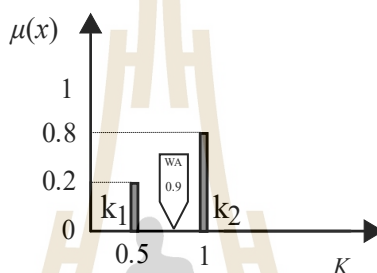


รูปที่ 6.29 วิธีการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno

การทำดีฟัซซีแบบ WA สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.30 โดยมีการคำนวณค่าเอาต์พุตชัดเจนเมื่อ k_1 และ k_2 เท่ากับ 0.5 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$WA = \frac{(\mu(k_1) \times k_1) + (\mu(k_2) \times k_2)}{\mu(k_1) + \mu(k_2)} = \frac{(0.2 \times 0.5) + (0.8 \times 1)}{0.2 + 0.8} = 0.9$$

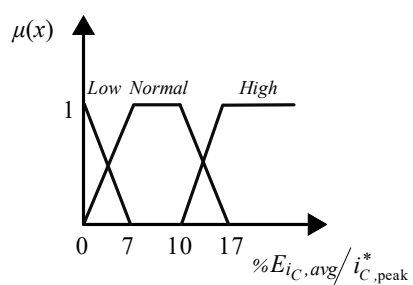
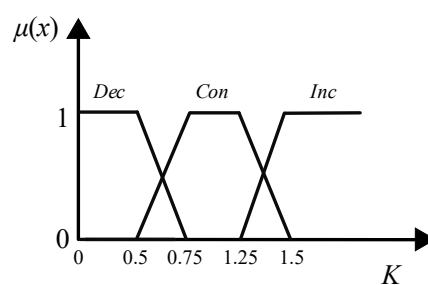
จากการดีฟัซซีแบบ WA ข้างต้น มีค่าผลลัพธ์เอาต์พุตชัดเจนเท่ากับ 0.9 ซึ่งคือค่าเกน K สำหรับนำไปใช้ในการปรับค่า HB



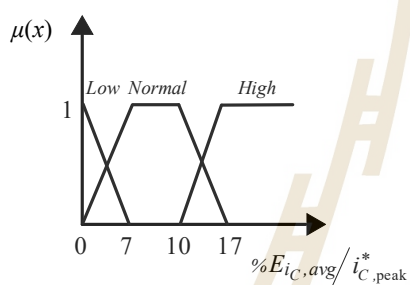
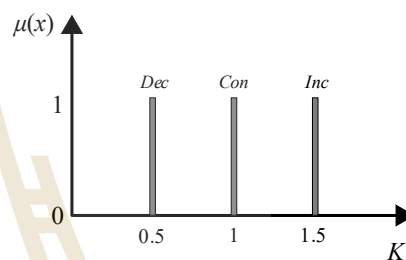
รูปที่ 6.30 ผลลัพธ์เอาต์พุตชัดเจนจากการทำดีฟัซซีแบบ WA

6.7.1 การทดสอบการอนุมานฟัซซี

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani และการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno ที่ประกอบด้วยการทำดีฟัซซีด้วยวิธีต่าง ๆ ดังที่นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา เพื่อทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานร่วมกับตัวควบคุม DBHCC โดยสามารถแสดงฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต $\%E_{iC,avg}/i_{C,peak}^*$ และฟังก์ชันสมาชิกของ เอาต์พุต K สำหรับการอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani และการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno ได้ดังรูปที่ 6.31 และ 6.32 ตามลำดับ โดยการทดสอบจะพิจารณาภายใต้สภาวะที่กระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง (รายละเอียดได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.4.1) ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 6.7

(ก) ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต $\%E_{i_C, avg} / i_{C, peak}^*$ (ข) ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต K

รูปที่ 6.31 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตสำหรับการอนุมานฟัซซี่แบบ Mamdani

(ก) ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุต $\%E_{i_C, avg} / i_{C, peak}^*$ (ข) ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุต K

รูปที่ 6.32 ฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตสำหรับการอนุมานฟัซซี่แบบ Takagi-Sugeno

ตารางที่ 6.7 ผลการทดสอบการอนุมานฟัซซี

วิธีการทำ ดีฟัซซี	ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่าย เฟสรวม		ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส			จำนวน ครั้งการ สวิตซ์ (ครั้ง)
	เฟส T	เฟส M	เฟส A	เฟส B	เฟส C	
	ก่อนการชดเชย					
	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	
	ภายหลังการชดเชย					
การอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno						
WA	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
การอนุมานฟัซซีของ Mamdani แบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด						
COG	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
BOA	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
SOM	3.16%	3.15%	3.16%	3.15%	3.15%	13650
LOM	3.16%	3.15%	3.16%	3.15%	3.15%	13650
MOM	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
การอนุมานฟัซซีของ Mamdani แบบค่าสูงสุด-ผลคูณ						
COG	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
BOA	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
SOM	3.16%	3.15%	3.16%	3.15%	3.15%	13650
LOM	3.16%	3.15%	3.16%	3.15%	3.15%	13650
MOM	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908

จากตารางที่ 6.7 พบว่า การอนุมานฟัซซีของ Takagi-Sugeno และการอนุมานฟัซซีของ Mamdani ทั้งในกรณีแบบค่าสูงสุด-ต่ำสุด และ แบบค่าสูงสุด-ผลคูณ ร่วมกับวิธีการทำดีฟัซซีในรูปแบบต่าง ๆ มีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก โดยให้ผลค่า %THD กระแสที่แหล่งจ่าย ภายหลังการชดเชยไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 โดยการทำดีฟัซซีแบบ SOM และ LOM จะให้ค่า %THD ต่ำที่สุด แต่มีจำนวนครั้งการสวิตช์สูงกว่าการทำดีฟัซซีแบบอื่น ๆ

ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้การอนุมานฟัซซี่แบบ Takagi-Sugeno เนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์โมนิกและให้จำนวนครั้งการสวิตซ์ต่ำ อีกทั้งยังมีความซับซ้อนน้อยกว่าการอนุมานฟัซซี่ของ Mamdani และสามารถลดภาระในการประมวลผลของระบบได้

6.8 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกของฟัซซี่ลอจิก

ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ และตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต K ในกรณีใช้วิธีการอนุมานฟัซซี่แบบ Takagi-Sugeno สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.33 และ 6.34 ตามลำดับ

จากรูปที่ 6.33 แสดงตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ (i_1 ถึง i_4) โดยสามารถอธิบายรายละเอียดในแต่ละตำแหน่งได้ดังนี้

ตำแหน่ง i_1 คือ ค่า $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ เท่ากับศูนย์ ($i_1 = 0$) ซึ่งมิต้าน้อยกว่าช่วงค่าที่ยอมรับได้อย่างสมบูรณ์และต้องทำการปรับเพิ่มค่า HB

ตำแหน่ง i_2 และ i_3 คือ ขอบเขตของค่า $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ ในช่วงที่ยอมรับได้อย่างสมบูรณ์และไม่ต้องทำการปรับค่า HB (เป็นช่วงที่ให้ค่า %THD ในแต่ละสภาวะของกระแสโหลดที่พิจารณามีค่าไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022)

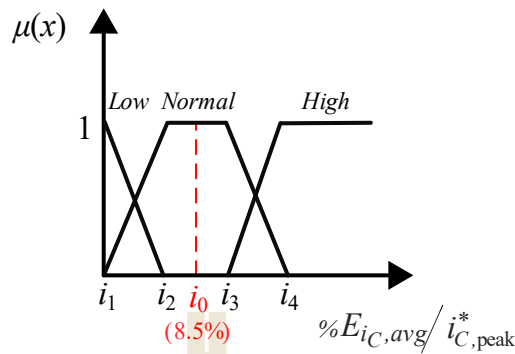
ตำแหน่ง i_4 คือ ขอบเขตของค่า $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ ที่มีค่าสูงกว่าช่วงค่าที่ยอมรับได้อย่างสมบูรณ์และต้องปรับลดค่า HB

นอกจากนี้รูปที่ 6.34 แสดงตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต K (O_1 ถึง O_3) โดยรายละเอียดของแต่ละตำแหน่งแสดงได้ดังนี้

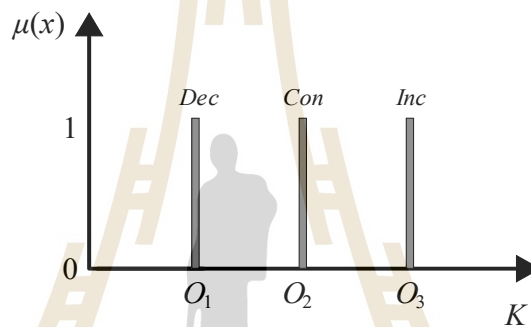
ตำแหน่ง O_1 คือ ค่าเกณฑ์ปรับลดขนาดของค่า HB

ตำแหน่ง O_2 คือ ค่าเกณฑ์คงค่า HB กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ($O_2 = 1$)

ตำแหน่ง O_3 คือ ค่าเกณฑ์ปรับเพิ่มขนาดของค่า HB



รูปที่ 6.33 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$

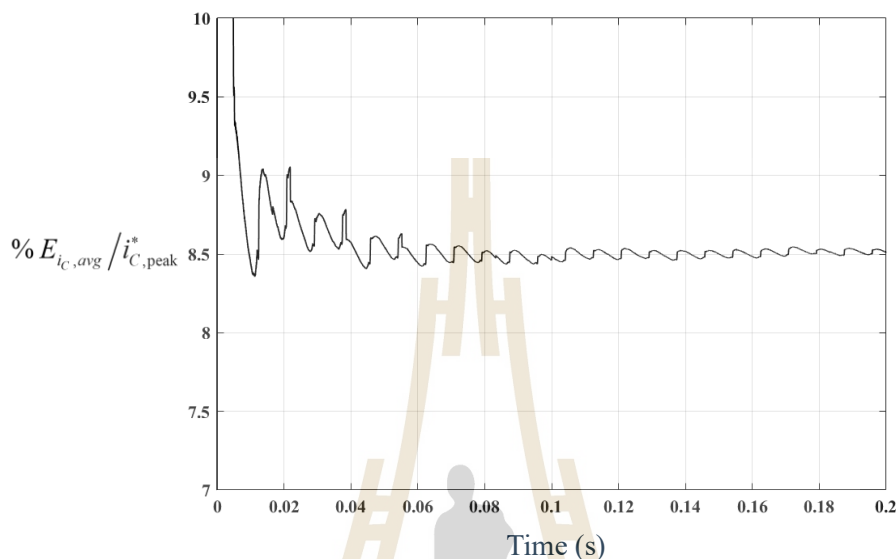


รูปที่ 6.34 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต K

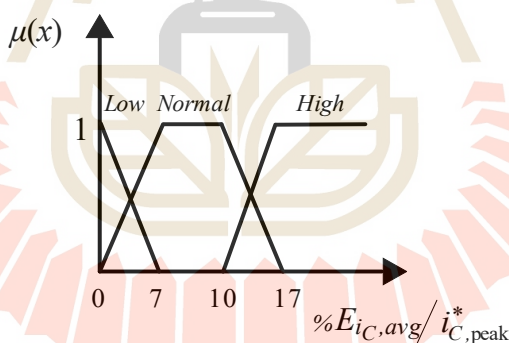
การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ (i_1 ถึง i_4) เริ่มต้นจากการพิจารณาค่า $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ ที่เกิดขึ้นในกระแสโหลดในสภาวะปกติดังแสดงในรูปที่ 6.35 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.5 และถูกกำหนดเป็นค่าตั้งต้น (i_0) สำหรับการออกแบบ โดยการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต (i_1 ถึง i_4) จะกำหนดให้เป็นแบบสมมาตรซ้ายขวาจากค่า i_0 ซึ่งกำหนดให้ค่า i_1 เท่ากับ 0 ดังนั้น จะได้ว่าค่า i_4 เท่ากับ 17 สำหรับการออกแบบค่า i_2 และ i_3 หากกำหนดระยะจากค่า i_0 กว้างเกินไป ซึ่งอาจมีขอบเขตครอบคลุมถึงค่า $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ ที่สูงเกินความเหมาะสม เมื่อกลไกการปรับค่า HB ปรับเพื่อเข้าสู่ค่าดังกล่าว อาจทำให้ค่า %THD มีค่าเกิน 5% ไม่เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 ได้ และในขณะที่หากกำหนดระยะจากค่า i_0 แคบเกินไป ซึ่งค่าของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก i_2 และ i_3 จะมีขอบเขตที่แคบไม่ครอบคลุมค่า $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ ที่สามารถรักษาระดับค่า %THD ไม่เกิน 5% ได้ทุกสภาวะของกระแสโหลด ส่งผลให้ในบางสภาวะของกระแสโหลดยังคงมีค่า %THD เกิน 5% ซึ่งไม่เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกระยะห่างที่เหมาะสม โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก

อินพุต คือ $i_2 = 7$ และ $i_3 = 10$ โดยสามารถแสดงค่าของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต

$\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ ได้ดังรูปที่ 6.36



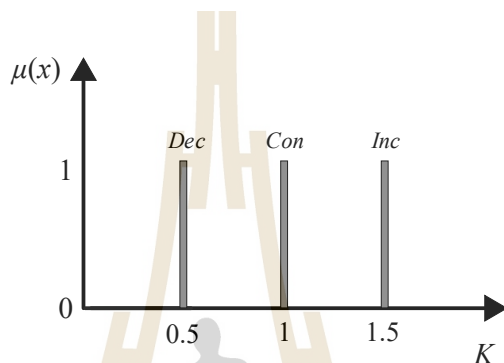
รูปที่ 6.35 ค่า $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$ ที่เกิดขึ้นในกระแสโหลดในสภาวะปกติ



รูปที่ 6.36 ค่าของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุต $\%E_{i_C,avg}/i_{C,peak}^*$

การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต K (O_1 ถึง O_3) ใช้หลักการออกแบบฟังก์ชันสมาชิกแบบสมมาตรซ้ายขวาเช่นกัน โดยมีตำแหน่งกลาง คือ O_2 เท่ากับ 1 เพื่อคงค่า HB เท่าเดิม ส่วนการกำหนดค่าของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก O_1 และ O_3 จากค่า O_2 กว้างเกินไป จะส่งผลให้ค่าเกน K มีค่ามากเกินไปความเหมาะสม ซึ่งอาจให้ผลลัพธ์ของการปรับค่า HB มีค่ามากเกินไป ส่งผลให้ค่า %THD มีแนวโน้มเกิน 5% ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน และในขณะที่การกำหนดค่าของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิก O_1 และ O_3 จากค่า O_2 แคบเกินไป จะส่งผลให้การขนาดของการเปลี่ยนแปลงของค่า HB ในแต่ละรอบมีค่าต่ำเกินไป ทำให้ใช้ระยะเวลานานขึ้นในการลู่เข้าค่า HB

ที่เหมาะสม เป็นผลให้ความเร็วในการตอบสนองของตัวควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลลดลง และอาจทำให้ในบางช่วงเวลาค่า %THD ยังคงสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกกระยะห่างที่เหมาะสม โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเออร์ตฟุต คือ $O_1 = 0.5$ และ $O_3 = 1.5$ โดยสามารถแสดงค่าของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเออร์ตฟุต K ได้ดังรูปที่ 6.37



รูปที่ 6.37 ค่าของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกเออร์ตฟุต K

6.9 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมดังแสดงในรูปที่ 6.10 กรณีกระแสไหลมีการเปลี่ยนแปลง เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ร่วมกับการปรับค่า HB ด้วยฟัชชีลอจิกที่ได้ออกแบบ ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า ตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสสองแถบแบบปรับตัวได้ (Adaptive Double Band Hysteresis Current Control : ADBHCC) โดยการทดสอบจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลทั้งหมด 2 กรณี เช่นเดียวกันกับในบทที่ 5 คือ

กรณีที่ 1 คือ ช่วงที่ 1 กระแสไหลในสภาวะปกติ ช่วงที่ 2 กระแสไหลเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของกระแสไหลในสภาวะปกติ ช่วงที่ 3 กระแสไหลลดลงเป็น 0.5 เท่าของกระแสไหลในสภาวะปกติ และในช่วงที่ 4 กระแสไหลเปลี่ยนแปลงกลับสู่สภาวะของกระแสไหลในสภาวะปกติ

กรณีที่ 2 คือ ช่วงที่ 1 กระแสไหลในสภาวะปกติ ช่วงที่ 2 กระแสไหลลดลงเป็น 0.6 เท่าของกระแสไหลในสภาวะปกติ ช่วงที่ 3 กระแสไหลเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของกระแสไหลในสภาวะปกติ และในช่วงที่ 4 กระแสไหลเปลี่ยนแปลงกลับสู่สภาวะของกระแสไหลในสภาวะปกติ

6.9.1 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกกรณีใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC

ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมกรณีใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC สำหรับกรณีโหลดที่ 1 และกรณีโหลดที่ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 6.38 และ 6.39 ตามลำดับ และผลการจำลองสถานการณ์ที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 6.40 และ 6.41 ตามลำดับ โดยรายละเอียดผลการกำจัดฮาร์มอนิก สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

กรณีโหลดที่ 1 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมดังรูปที่ 6.38 ในช่วงที่ 1 (0 ถึง 0.7 วินาที) ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ ในช่วงก่อนการชดเชย (Before compensation) พบว่า กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) ยังคงผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ โดยมีค่า %THD เท่ากับ 22.16% อย่างไรก็ตาม ภายหลังจากการชดเชย (After compensation) เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ทำงานร่วมกับระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC ฉีดกระแสชดเชย (i_{CT} , i_{CM}) เข้าสู่ระบบรางไฟฟ้า ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) กลับมาเป็นรูปไซน์ โดยมีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M ลดลงเท่ากับ 3.97% และ 3.97% ตามลำดับ เมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 2 (0.7 ถึง 1.2 วินาที) กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า (มีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมก่อนการชดเชยเท่ากับ 22.83%) ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม ADBHCC สามารถปรับค่า HB ให้สอดคล้องตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลด ส่งผลให้ยังคงมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง และทำให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมยังคงมีลักษณะเป็นรูปไซน์ โดยมีค่า %THD ภายหลังจากการชดเชยในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 4.49% และ 4.29% ตามลำดับ จากนั้นในช่วงที่ 3 (1.2 ถึง 1.7 วินาที) กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.5 เท่า (มีค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 20.93%) ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม ADBHCC ยังคงสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชย ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมคงความเป็นรูปไซน์ และมีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 4.01% และ 4.04% ตามลำดับ และสุดท้ายในช่วงที่ 4 (1.7 ถึง 2.2 วินาที) กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงกลับสู่กระแสโหลดในสภาวะปกติดั้งเดิม ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม ADBHCC จะปรับค่า HB ให้สอดคล้องกับกระแสโหลดในสภาวะปกติ ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมยังคงเป็นรูปไซน์ อย่างไรก็ตาม พบว่าค่า %THD ในเฟส T และเฟส M ภายหลังจากการชดเชย

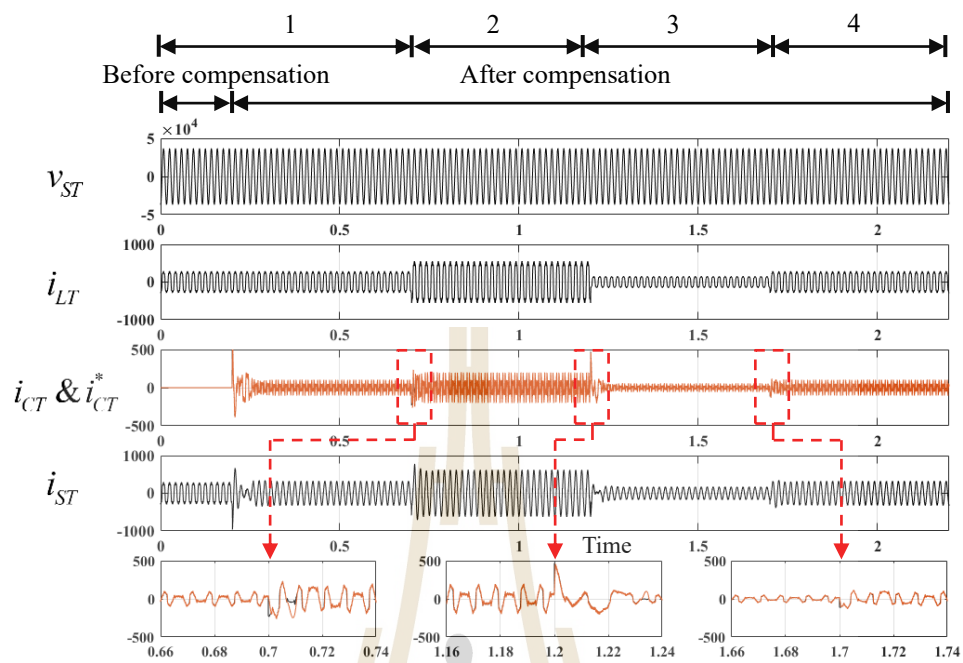
แตกต่างกันไปจากในช่วงที่ 1 โดยมีค่าเท่ากับ 3.62% และ 3.58% ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมการปรับค่า HB ภายหลังการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลด

กรณีโหลดที่ 2 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมดังรูปที่ 6.39 ในช่วงที่ 1 ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ ช่วงก่อนการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.2 วินาที กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมมีความผิดเพี้ยนสูงและไม่เป็นรูปไซน์ โดยมีค่า %THD สูงถึง 22.16% อย่างไรก็ตาม ภายหลังการชดเชยตั้งแต่เวลา 0.2 วินาทีเป็นต้นไป กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมกลับมาเป็นรูปไซน์ โดยมีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M ลดลงเท่ากับ 3.97% และ 3.97% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุม ADBHCC จากนั้นในช่วงที่ 2 เมื่อกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.6 เท่า (มีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมก่อนการชดเชยเท่ากับ 21.32%) พบว่า กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมยังคงเป็นรูปไซน์ เนื่องจากตัวควบคุม ADBHCC ยังคงมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงในสภาวะการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดลดลง โดยมีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมภายหลังการชดเชยในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 4.06% และ 4.00% ตามลำดับ สำหรับในช่วงที่ 3 กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่า (มีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมก่อนการชดเชยเท่ากับ 22.60%) พบว่า กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมยังคงเป็นรูปไซน์ สะท้อนถึงสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุม ADBHCC ในสภาวะกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น โดยมีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมภายหลังการชดเชยในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 4.09% และ 3.96% ตามลำดับ และในช่วงที่ 4 กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงกลับมาเป็นกระแสโหลดในสภาวะปกติเช่นเดิม โดยกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมยังคงความเป็นรูปไซน์ เนื่องจากตัวควบคุม ADBHCC ยังคงมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชย โดยมีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมภายหลังการชดเชยในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 4.23% และ 4.70% ตามลำดับ

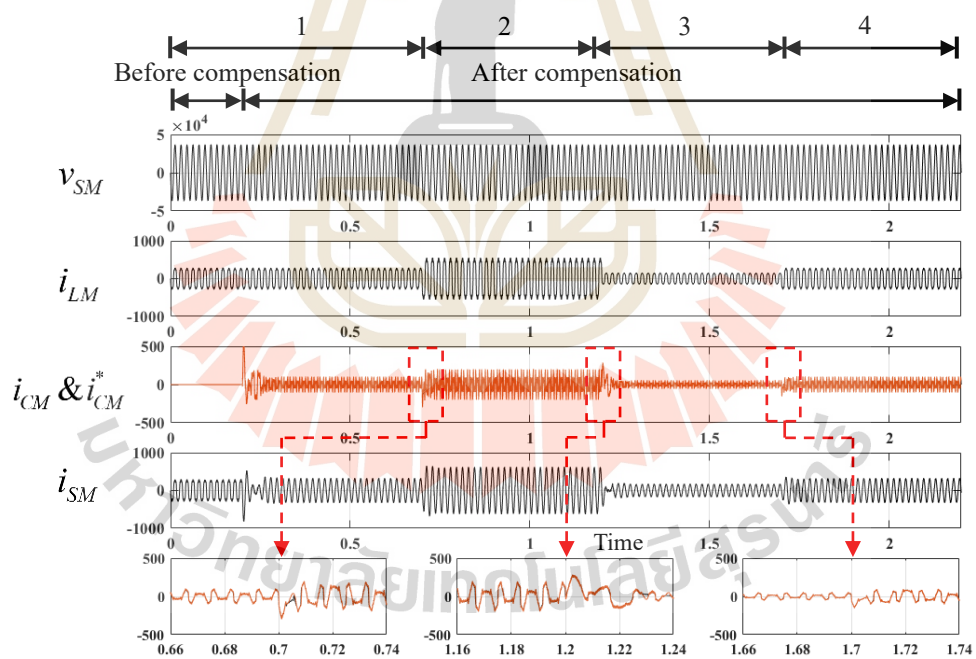
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสในกรณีโหลดที่ 1 ดังรูปที่ 6.40 พบว่า ภายหลังการชดเชยเมื่อกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) กลับมาเป็นรูปไซน์จะส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) กลับมาเป็นรูปไซน์เช่นเดียวกัน โดยในช่วงที่ 1 ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ มีค่า %THD ภายหลังการชดเชยในเฟส A B และ C เท่ากับ 3.97% 3.96% และ 3.97% ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น

เป็น 2 เท่า มีค่า %THD ภายหลังการชดเชยเท่ากับ 4.49% 4.33% และ 4.35% ตามลำดับ ในช่วงที่ 3 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.5 เท่า มีค่า %THD ภายหลังการชดเชยเท่ากับ 4.01% 4.04% และ 4.02% ตามลำดับ และในช่วงที่ 4 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงกลับสู่กระแสโหลดในสภาวะปกติ โดยมีค่า %THD ภายหลังการชดเชยในเฟส A B และ C เท่ากับ 3.60% 3.62% และ 3.58% ตามลำดับ สำหรับผลการกำจัดฮาร์มอนิกในกรณีโหลดที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 6.41 พบว่า ภายหลังการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟสกลับมาเป็นรูปไซน์เช่นเดียวกับกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม โดยในช่วงที่ 1 ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ มีค่า %THD ในเฟส A B และ C เท่ากับ 3.97% 3.96% และ 3.97% ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเท่ากับ 0.6 เท่า จะมีค่า %THD เท่ากับ 4.06% 4.02% และ 4.00% ตามลำดับ ในช่วงที่ 3 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 1.5 เท่า มีค่า %THD เท่ากับ 4.09% 4.00% และ 3.98% ตามลำดับ และในช่วงที่ 4 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงกลับสู่กระแสโหลดในสภาวะปกติ มีค่า %THD ในเฟส A B และ C เท่ากับ 4.23% 4.56% และ 4.61% ตามลำดับ โดยผลค่า %THD ดังกล่าวทั้งหมดสามารถดูได้จากตารางที่ 6.8 และ 6.9 สำหรับกรณีโหลดที่ 1 และกรณีโหลดที่ 2 ตามลำดับ

จากผลการกำจัดฮาร์มอนิกในรูปที่ 6.38 ถึง 6.41 ลักษณะการบิดเบี้ยวของกระแสที่แหล่งจ่ายในช่วงสภาวะชั่วคราวเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลด เป็นผลจากการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 1 คาบรูปสัญญาณวิธี SWFA ของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF

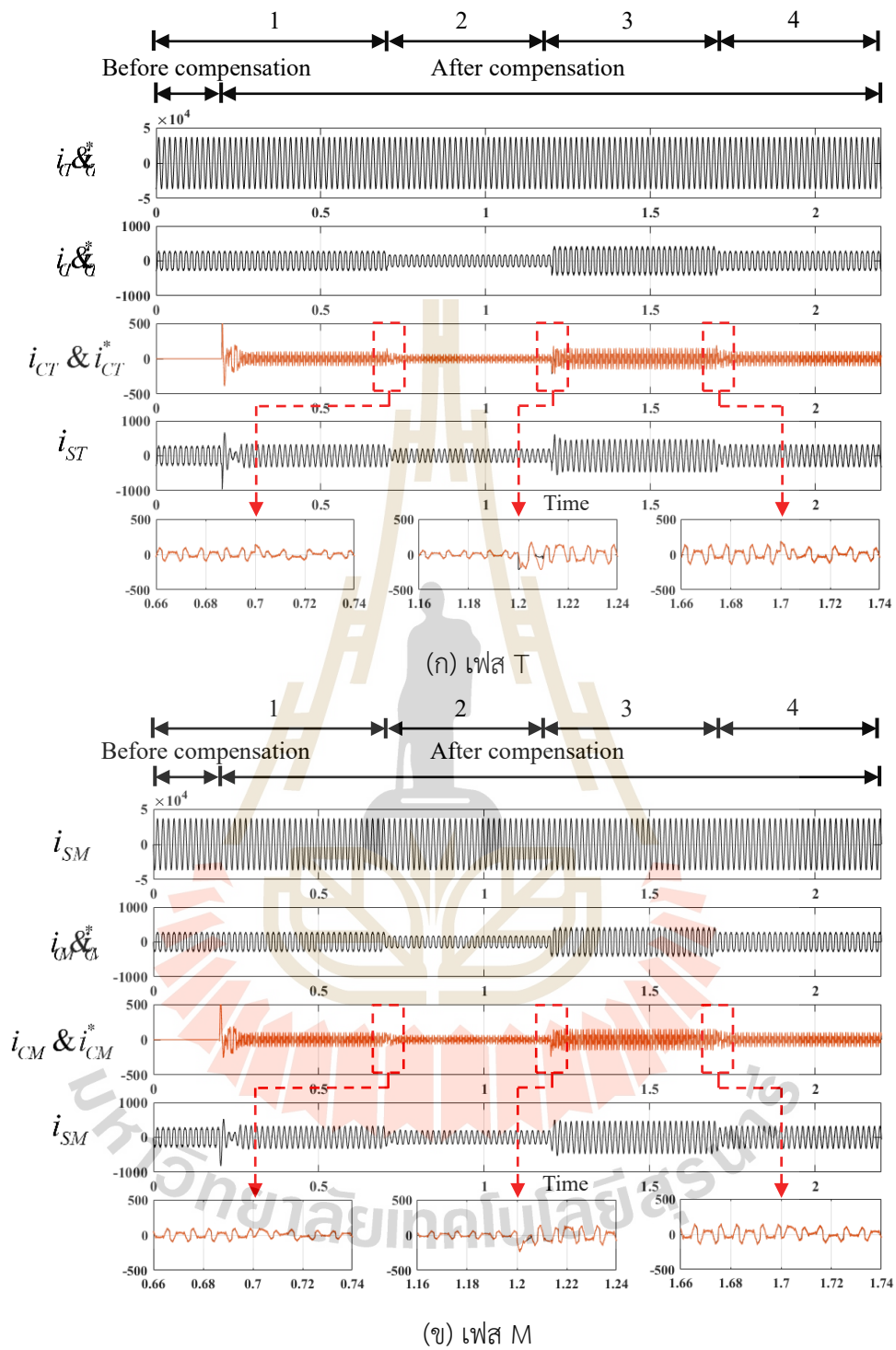


(ก) เฟส T

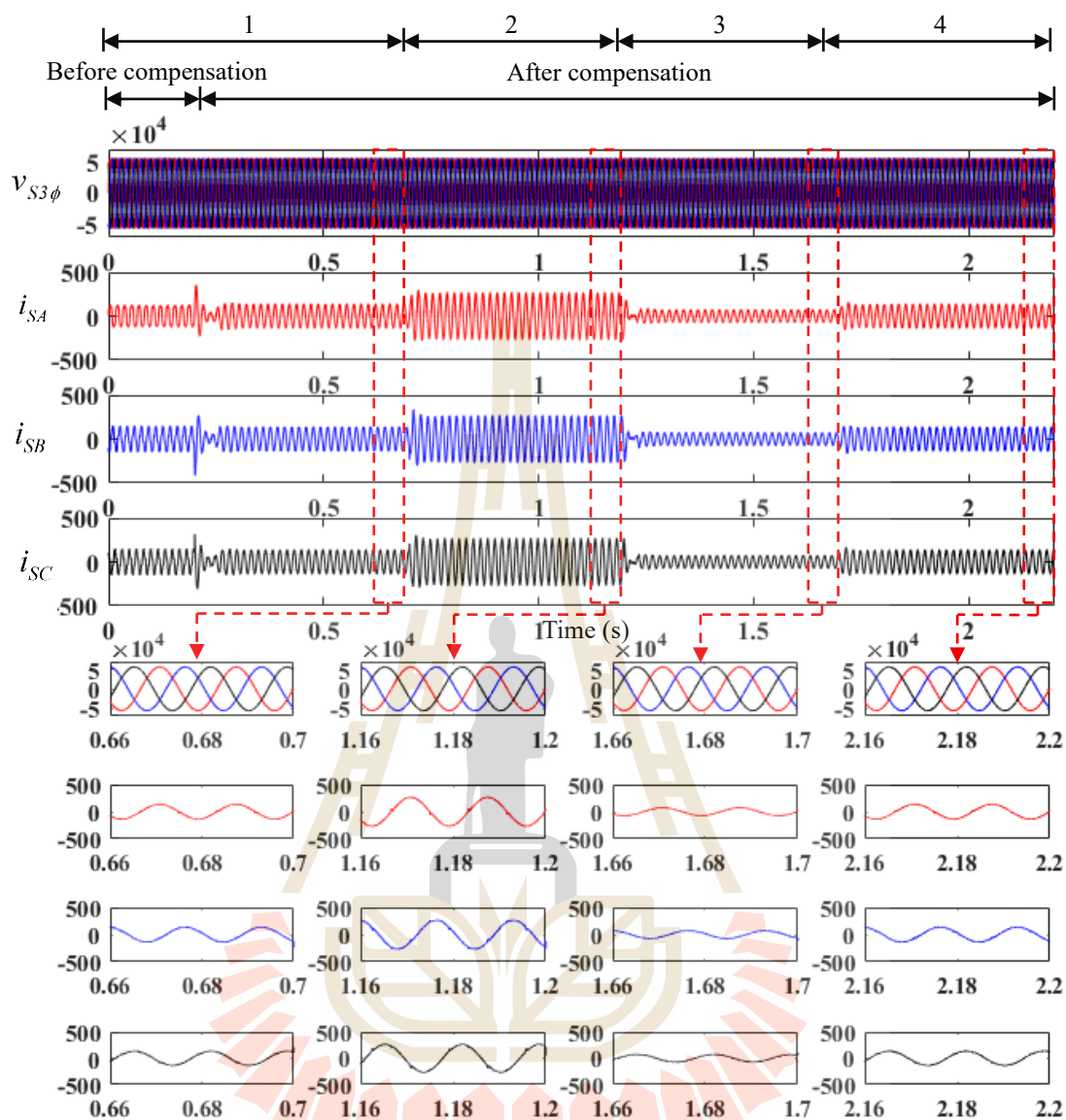


(ข) เฟส M

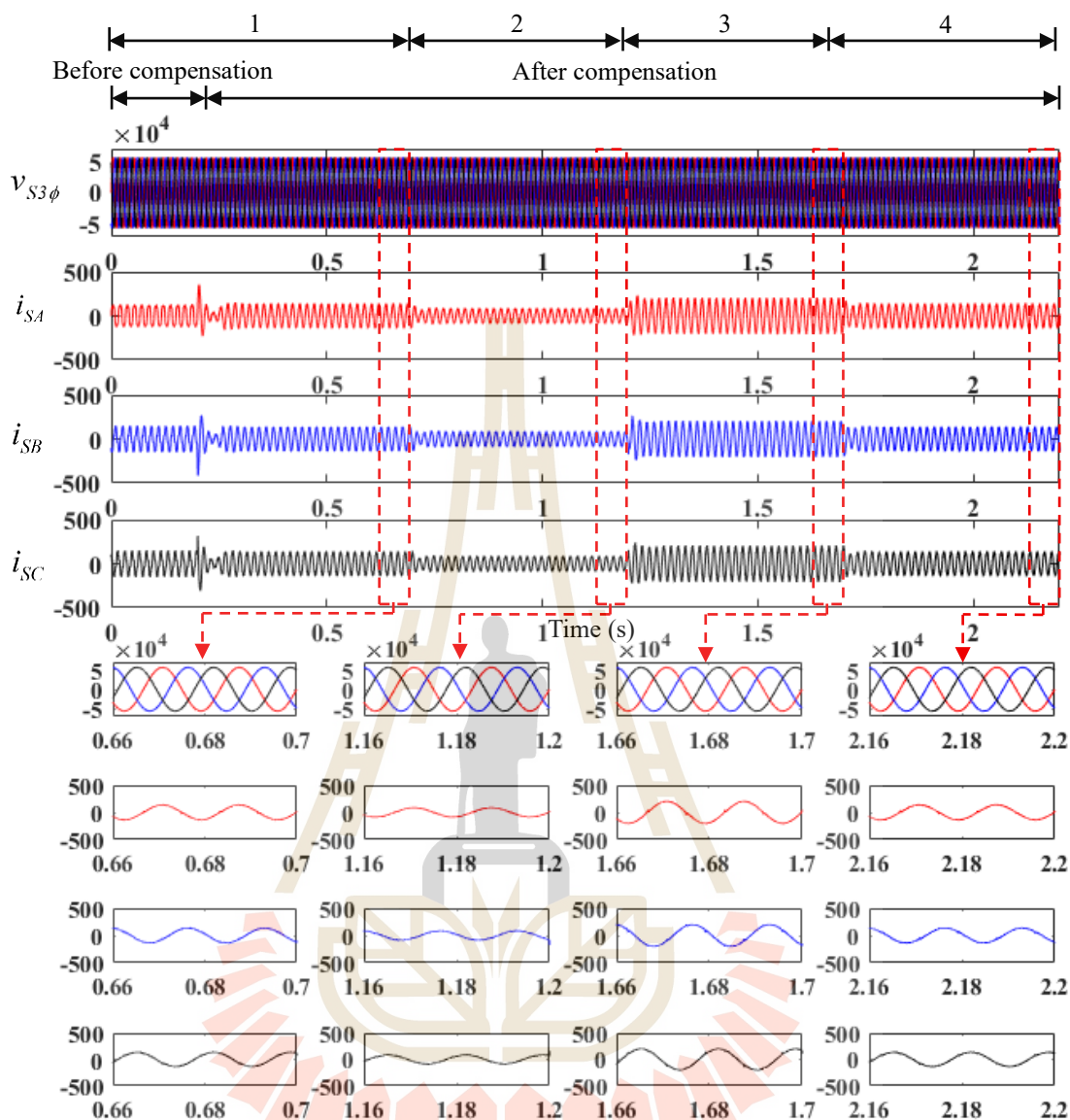
รูปที่ 6.38 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสร่วมที่ใช้ตัวควบคุม ADBHCC สำหรับกรณีโหลดที่ 1



รูปที่ 6.39 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสร่วมที่ใช้ตัวควบคุม ADBHCC สำหรับกรณีโหลดที่ 2



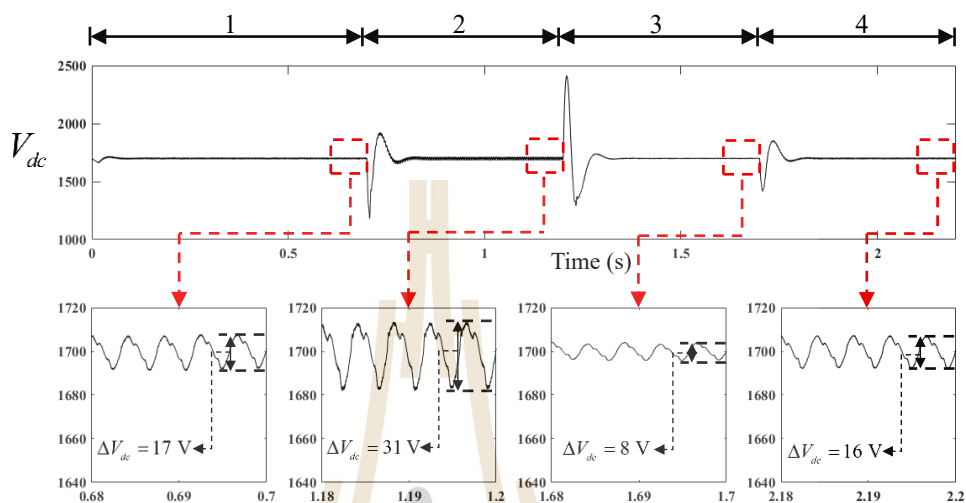
รูปที่ 6.40 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่ใช้ตัวควบคุม ADBHCC สำหรับกรณีโหลดที่ 1



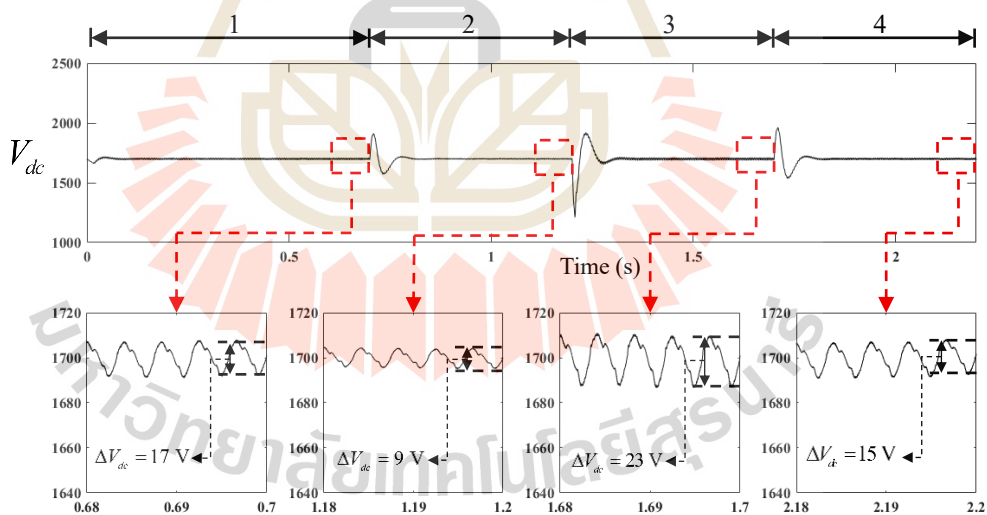
รูปที่ 6.41 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่ใช้ตัวควบคุม ADBHCC สำหรับกรณีโหลดที่ 2

สำหรับผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้กรณีโหลดที่ 1 และกรณีโหลดที่ 2 ได้ดังรูปที่ 6.42 และ 6.43 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว พบว่า ตัวควบคุมพีไอภายใต้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง โดยสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ให้มีค่าเท่ากับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (1700 V) ในทุกกรณีโหลด โดยมีการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง (ΔV_{dc}) สำหรับกรณีโหลดที่ 1 ในช่วงที่ 1 2 3 และ 4 เท่ากับ 17 V 31 V 8 V และ 16 V ตามลำดับ ในขณะที่กรณีโหลดที่ 2 มีค่าการกระเพื่อมในช่วงที่ 1 2 3 และ 4 เท่ากับ 17 V 9 V 23 V

และ 15 V ตามลำดับ ทั้งนี้ ในทุกกรณีโหลดมีค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงอยู่ในขอบเขต 34 V ตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 6.42 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงภายใต้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC สำหรับกรณีโหลดที่ 1



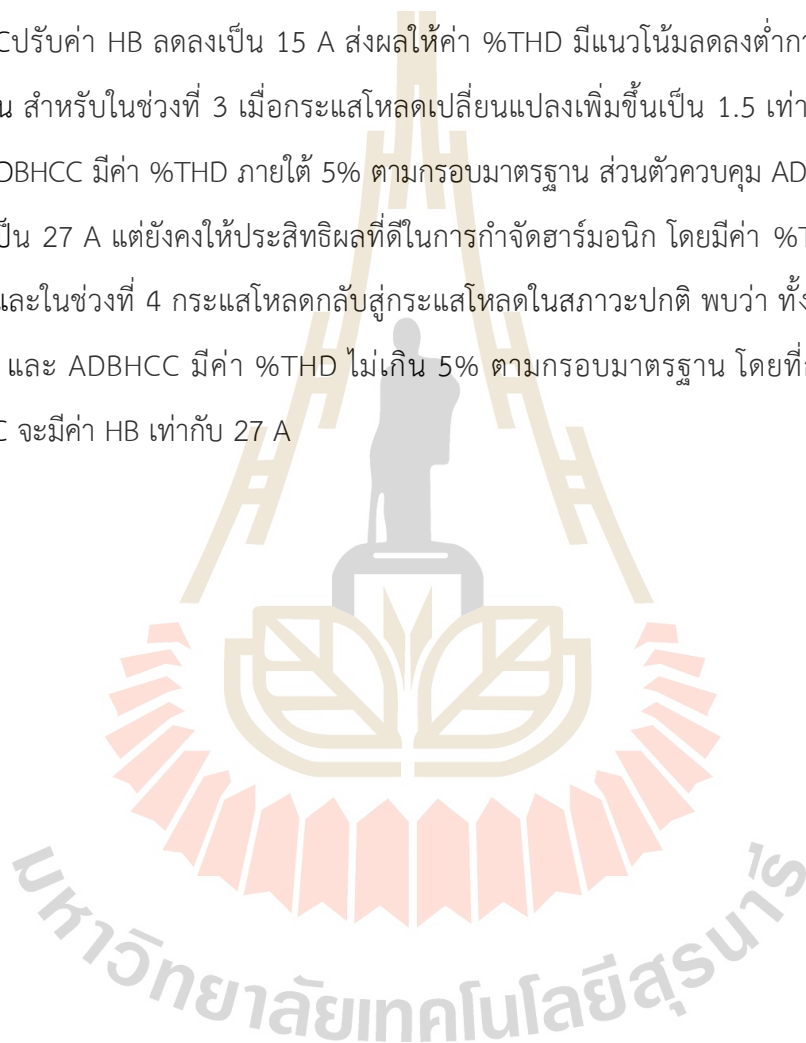
รูปที่ 6.43 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงภายใต้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC สำหรับกรณีโหลดที่ 2

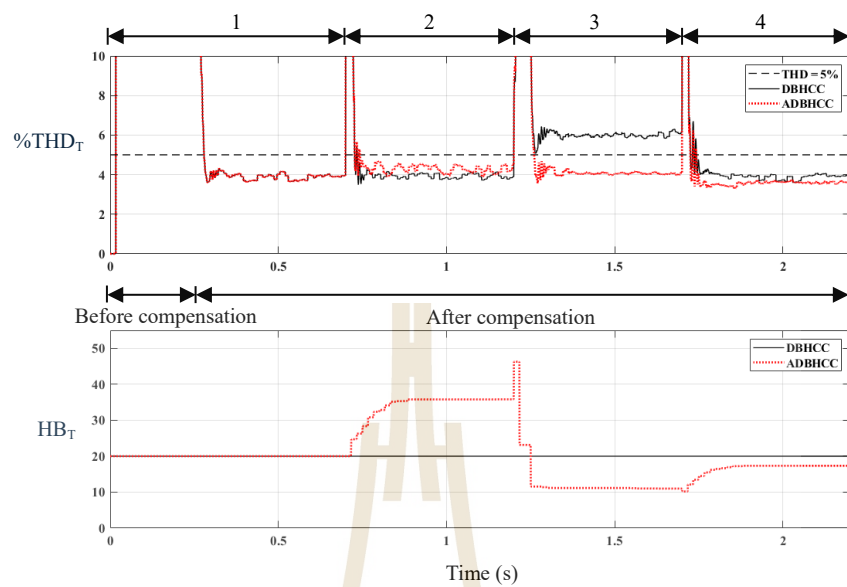
6.9.2 การเปรียบเทียบผลการกำจัดฮาร์มอนิกระหว่างกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC และ ADBHCC

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาเปรียบเทียบผลการกำจัดฮาร์มอนิกของการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ที่ตั้งค่า HB เท่ากับ 20 A (ตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5) กับตัวควบคุม ADBHCC ที่มีการปรับค่า HB โดยใช้พีชชีลอจิก ซึ่งการเปรียบเทียบสามารถแสดงผลการกำจัดฮาร์มอนิก (ค่า %THD) ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าของ HB เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีโหลดที่ 1 และกรณีโหลดที่ 2 ได้ดังรูปที่ 6.44 และ 6.45 ตามลำดับ ส่วนตารางสรุปค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายในกรณีโหลดที่ 1 และกรณีโหลดที่ 2 แสดงได้ดังตารางที่ 6.8 และ 6.9 ตามลำดับ

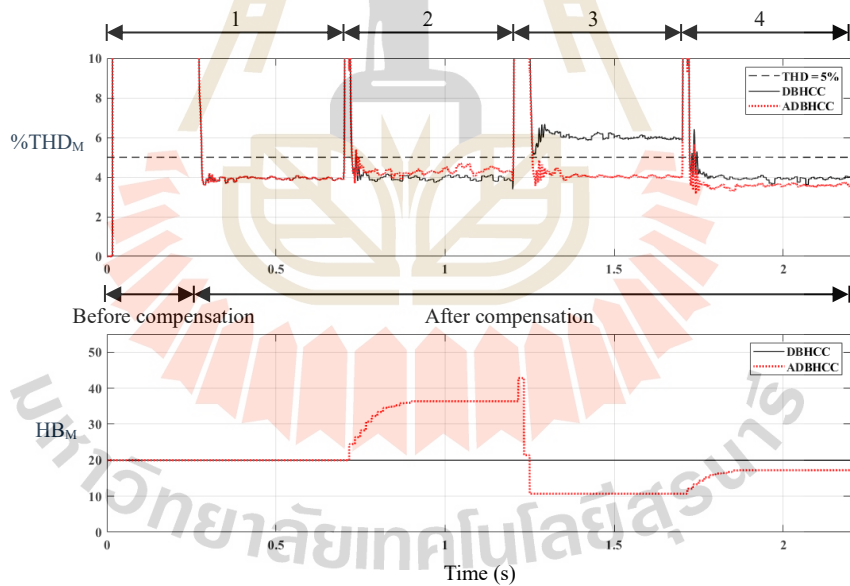
ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับค่า HB กรณีโหลดที่ 1 แสดงดังรูปที่ 6.44 โดยในช่วงที่ 1 ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ทั้งในกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC และ ADBHCC มีค่า HB เท่ากันเท่ากับ 20 A ส่งผลให้ค่า %THD ของทั้งสองกรณีมีค่าเท่ากัน และมีค่าอยู่ภายใต้ 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 จากนั้นในช่วงที่ 2 เมื่อกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า สังเกตได้ว่าตัวควบคุม DBHCC ยังคงให้ผลค่า %THD ต่ำกว่า 5% ด้วยค่า HB คงที่เท่ากับ 20 A ในขณะที่ตัวควบคุม ADBHCC ได้ปรับค่า HB เพิ่มขึ้นเป็น 36 A ซึ่งช่วยลดจำนวนครั้งการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที อย่างไรก็ตาม ค่าของ %THD จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ยังคงมีค่าน้อยกว่า 5% ตามกรอบมาตรฐาน สำหรับในช่วงที่ 3 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.5 เท่า พบว่า กรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC ให้ประสิทธิภาพที่ไม่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก โดยมีค่า %THD เกิน 5% ไม่เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน ในขณะที่กรณีใช้ตัวควบคุม ADBHCC สามารถปรับค่า HB ลดลงเป็น 11 A ส่งผลให้ค่า %THD มีแนวโน้มลดลงและมีค่าไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน และในช่วงที่ 4 ภายใต้กระแสโหลดกลับมาเป็นกระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ทั้งกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC และ ADBHCC มีค่า %THD ไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน โดยในกรณีใช้ตัวควบคุม ADBHCC จะทำงานภายใต้ค่า HB เท่ากับ 17 A

ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับค่า HB กรณีโหลดที่ 2 แสดงดังรูปที่ 6.45 ในช่วงที่ 1 ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ทั้งในกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC และ ADBHCC มีค่า HB เท่ากับ 20 A ส่งผลให้มีค่า %THD เท่ากัน และมีค่าอยู่ภายใต้ 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 จากนั้นในช่วงที่ 2 เมื่อกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.6 เท่า พบว่า กรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC ให้ค่า %THD เกิน 5% ไม่เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน ในขณะที่ตัวควบคุม ADBHCC ปรับค่า HB ลดลงเป็น 15 A ส่งผลให้ค่า %THD มีแนวโน้มลดลงต่ำกว่า 5% ตามกรอบมาตรฐาน สำหรับในช่วงที่ 3 เมื่อกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่า พบว่า กรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC มีค่า %THD ภายใต้อีก 5% ตามกรอบมาตรฐาน ส่วนตัวควบคุม ADBHCC ปรับค่า HB เพิ่มขึ้นเป็น 27 A แต่ยังคงให้ประสิทธิผลที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก โดยมีค่า %THD ที่ต่ำกว่า 5% เช่นกัน และในช่วงที่ 4 กระแสโหลดกลับสู่กระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ทั้งกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC และ ADBHCC มีค่า %THD ไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน โดยที่กรณีใช้ตัวควบคุม ADBHCC จะมีค่า HB เท่ากับ 27 A



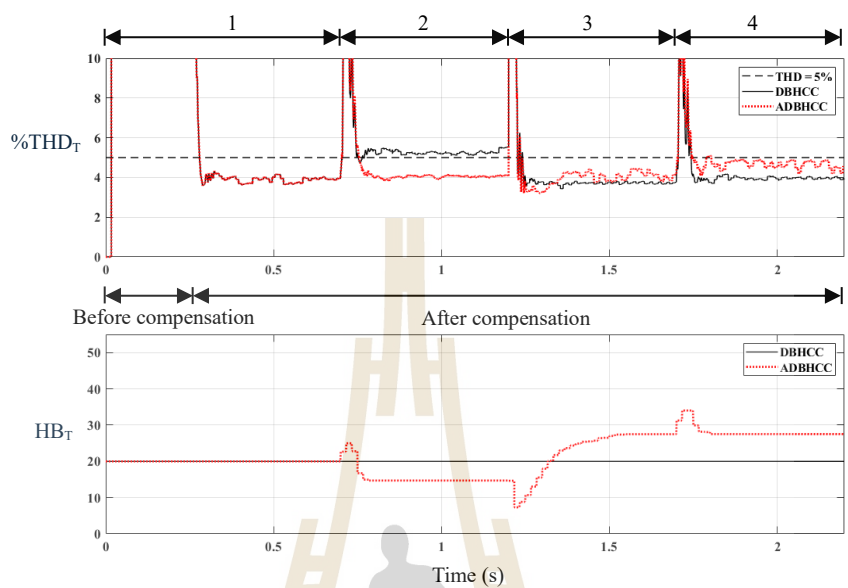


(ก) เฟส T

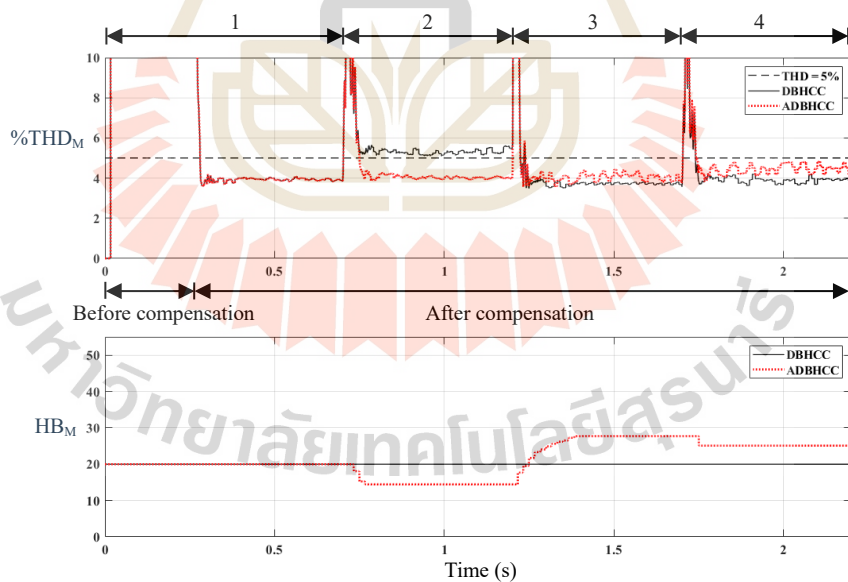


(ข) เฟส M

รูปที่ 6.44 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับค่า HB สำหรับกรณีโหลดที่ 1



(ก) เฟส T



(ข) เฟส M

รูปที่ 6.45 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับค่า HB สำหรับกรณีโหลดที่ 2

ตารางที่ 6.8 ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายในกรณีโหลดที่ 1

ตัวควบคุม	สภาวะของ กระแสโหลด	ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่าย เฟสรวม		ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส			จำนวน ครั้ง การ สวิตซ์ (ครั้ง)
		เฟส T	เฟส M	เฟส A	เฟส B	เฟส C	
	ก่อนการชดเชย						
	ปกติ (1 เท่า)	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	
	เพิ่มขึ้น 2 เท่า	22.83%	22.83%	22.83%	22.83%	22.83%	
	ลดลง 0.5 เท่า	20.93%	20.93%	20.93%	20.93%	20.93%	
	ภายหลังการชดเชย						
DBHCC	ช่วงที่ 1 (ปกติ 1 เท่า)	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
	ช่วงที่ 2 (เพิ่มขึ้น 2 เท่า)	3.92%	4.14%	4.14%	3.96%	3.99%	6584
	ช่วงที่ 3 (ลดลง 0.5 เท่า)	5.93%	5.89%	5.89%	5.85%	6.00%	7028
	ช่วงที่ 4 (ปกติ 1 เท่า)	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
ADBHCC	ช่วงที่ 1 (ปกติ 1 เท่า)	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
	ช่วงที่ 2 (เพิ่มขึ้น 2 เท่า)	4.49%	4.29%	4.49%	4.33%	4.35%	4676
	ช่วงที่ 3 (ลดลง 0.5 เท่า)	4.01%	4.04%	4.01%	4.04%	4.02%	11004
	ช่วงที่ 4 (ปกติ 1 เท่า)	3.60%	3.60%	3.60%	3.62%	3.58%	8202

ตารางที่ 6.9 ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายในกรณีโหลดที่ 2

ตัวควบคุม	สภาวะของ กระแสโหลด	ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่าย เฟสรวม		ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส			จำนวน ครั้ง การ สวิตช์ (ครั้ง)
		เฟส T	เฟส M	เฟส A	เฟส B	เฟส C	
	ก่อนการชดเชย						
	ปกติ (1 เท่า)	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	
	เพิ่มขึ้น 1.5 เท่า	22.60%	22.60%	22.60%	22.60%	22.60%	
	ลดลง 0.6 เท่า	21.32%	21.32%	21.32%	21.32%	21.32%	
	ภายหลังการชดเชย						
DBHCC	ช่วงที่ 1 (ปกติ 1 เท่า)	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
	ช่วงที่ 2 (ลดลง 0.6 เท่า)	5.27%	5.23%	5.27%	5.26%	5.23%	7052
	ช่วงที่ 3 (เพิ่มขึ้น 1.5 เท่า)	3.84%	3.74%	3.74%	3.79%	3.83%	6768
	ช่วงที่ 4 (ปกติ 1 เท่า)	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
ADBHCC	ช่วงที่ 1 (ปกติ 1 เท่า)	3.97%	3.97%	3.97%	3.96%	3.97%	6908
	ช่วงที่ 2 (ลดลง 0.6 เท่า)	4.06%	4.00%	4.06%	4.02%	4.00%	9720
	ช่วงที่ 3 (เพิ่มขึ้น 1.5 เท่า)	4.09%	3.96%	4.09%	4.00%	3.98%	5756
	ช่วงที่ 4 (ปกติ 1 เท่า)	4.23%	4.70%	4.23%	4.56%	4.61%	6140

จากผลการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมภายใต้กรณีโหลดที่ 1 และกรณีโหลดที่ 2 ดังตารางที่ 6.8 และ 6.9 ตามลำดับ พบว่า ในกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC เมื่อการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดลดลงเป็น 0.5 เท่า และ 0.6 เท่า จะให้ประสิทธิภาพที่ไม่ดีในการกำจัดฮาร์โมนิก โดยมีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการกำจัดฮาร์โมนิกสูงเกิน 5% ไม่เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 ในขณะที่กรณีใช้ตัวควบคุม ADBHCC พบว่า เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่า %THD ในทุกสภาวะโหลดที่พิจารณาทดสอบมีค่าไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ตัวควบคุม ADBHCC มีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีกว่าตัวควบคุม DBHCC ส่งผลให้การกำจัดฮาร์โมนิกมีประสิทธิภาพที่ดีแม้ในสภาวะกระแสโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยสามารถรักษาค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายให้ไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

6.10 สรุป

นำเสนอทฤษฎีทางฟัซซีลอจิก ได้แก่ ฟัซซีเซต (Fuzzy set) การดำเนินการทางฟัซซีเซต (Fuzzy set operations) ฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) ตัวแปรภาษา (Linguistic variables) และค่าเชิงภาษา (Linguistic value) กฎฟัซซี (Fuzzy rules) และการอนุมานฟัซซี (Fuzzy inference) และได้นำเสนอการออกแบบฟัซซีลอจิกสำหรับใช้ปรับค่า HB ของตัวควบคุม DBHCC ประกอบด้วย การทดสอบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา พร้อมทั้งทดสอบจำนวนฟังก์ชันสมาชิก การออกแบบกฎฟัซซี และการทดสอบวิธีการอนุมานฟัซซี โดยมีค่าเชิงภาษาของอินพุต $\%E_{ic,avg}/i_{C,peak}^*$ จำนวน 3 ค่า คือ “Zero” “Normal” และ “High” และมีค่าเชิงภาษาของเอาต์พุต K จำนวน 3 ค่า คือ “Dec” “Con” และ “Inc” และออกแบบกฎฟัซซีจำนวน 3 กฎ นอกจากนี้ได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC ที่ใช้ฟัซซีลอจิกในการปรับค่า HB โดยผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม ADBHCC สามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์โมนิก โดยมีค่า %THD ไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 ในทุกสภาวะโหลดที่พิจารณาทดสอบ ซึ่งให้ผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ดีกว่ากรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC ที่คงค่า HB ซึ่งมีค่า %THD เกิน 5% ในบางสภาวะของกระแสโหลด นอกจากนี้ ตัวควบคุม ADBHCC ยังช่วยลดจำนวนครั้งการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที ซึ่งจะนำไปสู่การช่วยลดกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที

บทที่ 7

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

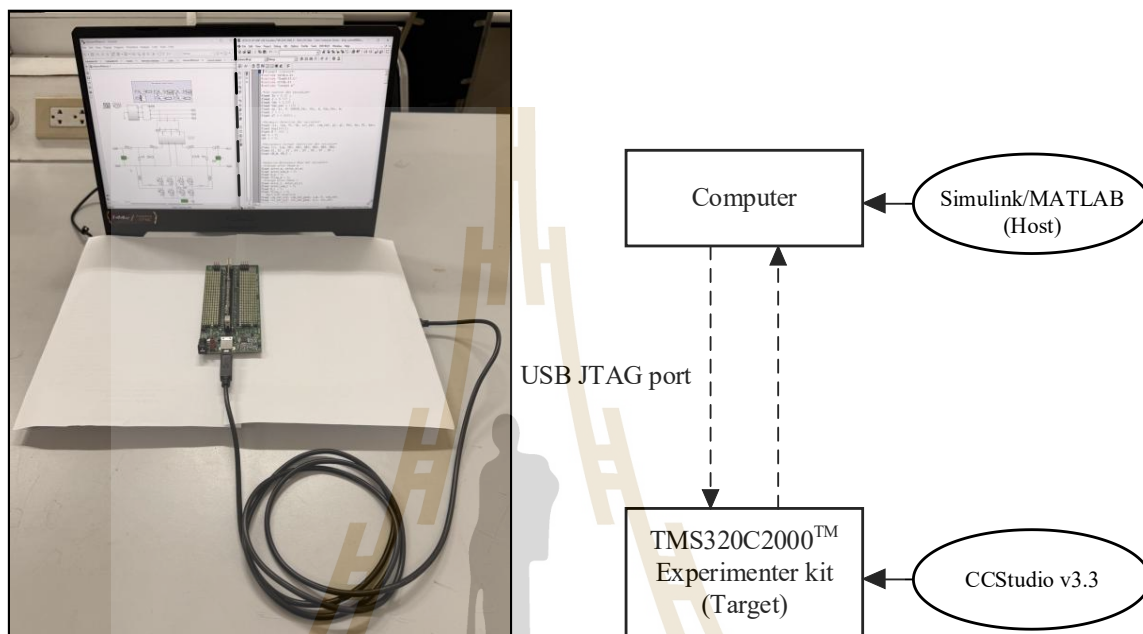
7.1 กล่าวนำ

การตรวจสอบสมรรถนะของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสสองแถบแบบปรับตัวได้ (ADBHCC) ที่มีการปรับค่าแถบฮีสเตอร์ซิส (HB) โดยใช้ฟuzzyลอจิกผ่านการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม Simulink/MATLAB ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6 แม้ว่าจะสามารถแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแนวทางที่เสนอได้ในระดับหนึ่ง แต่อาจยังไม่เพียงพอสำหรับการประเมินการทำงานที่ใกล้เคียงในทางปฏิบัติ ดังนั้น ในบทนี้จึงนำเสนอการจำลองสถานการณ์เพิ่มเติมโดยใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the Loop : HIL) ซึ่งมีความใกล้เคียงกับการทำงานในระบบฮาร์ดแวร์จริงมากยิ่งขึ้น และช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบที่พิจารณาอันเนื่องมาจากสมรรถนะของระบบควบคุมที่ไม่ดี โดยการนำเสนอในบทนี้จะแบ่งออกเป็นหัวข้อ ได้แก่ รายละเอียดการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป และการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปเพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC

7.2 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (HIL) (ทศพร ณรงค์ฤทธิ์, 2557) เป็นกระบวนการทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรม Simulink/MATLAB (Host) กับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimenter kit (Target) โดยใช้โปรแกรม Code Composer Studio เวอร์ชัน 3.3 (CCStudio v3.3) สำหรับควบคุมและสื่อสารกับบอร์ด DSP การเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด DSP

กับคอมพิวเตอร์จะดำเนินการผ่านสาย USB JTAG emulator ซึ่งใช้ระบบการสื่อสารแบบ RTDX (Real Time Data eXchange) สำหรับรับและส่งข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink/MATLAB และบอร์ด DSP โดยสามารถแสดงการเชื่อมต่อได้ดังรูปที่ 7.1



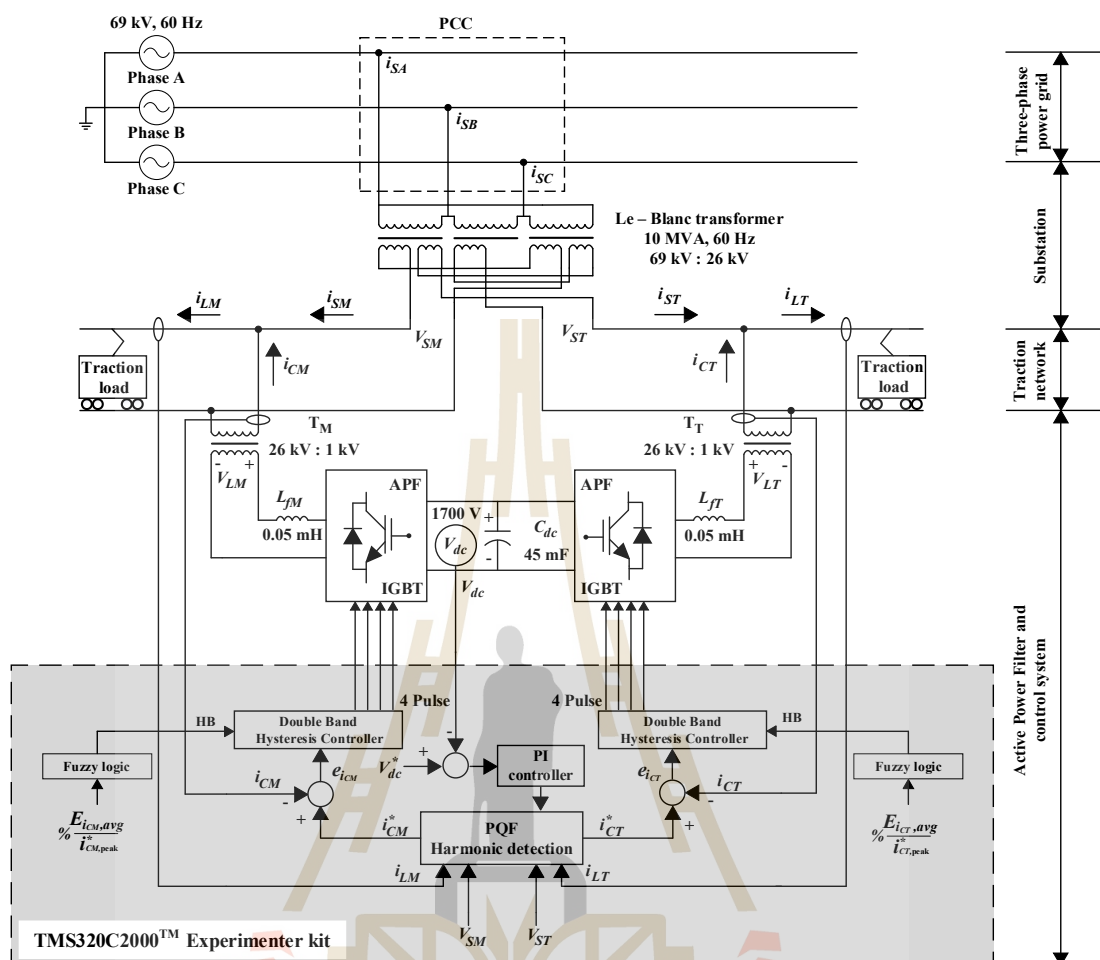
รูปที่ 7.1 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

กระบวนการทำงานของการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป เริ่มต้นจากโปรแกรม Simulink/MATLAB ส่งข้อมูลอินพุตไปยังบอร์ด DSP โดยใช้บล็อก RTDX Write ผ่านสาย USB JTAG emulator จากนั้นบอร์ด DSP จะรับข้อมูลดังกล่าวผ่านคำสั่ง Read from RTDX เพื่อนำไปประมวลผลตามโปรแกรมที่เขียนไว้ใน CCStudio v3.3 หลังเสร็จสิ้นการประมวลผล บอร์ด DSP จะส่งข้อมูลเอาต์พุตกลับไปยังโปรแกรม Simulink/MATLAB โดยใช้คำสั่ง Write to RTDX ผ่านสาย USB JTAG emulator และ โปรแกรม Simulink/MATLAB จะรับข้อมูลดังกล่าวโดยใช้บล็อก RTDX Read เพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์ของระบบต่อไป จากกระบวนการทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น คือ 1 รอบการคำนวณในช่วงเวลาการชักตัวอย่าง (Sampling time) และในรอบการทำงานถัดไป การทำงานจะวนซ้ำเดิมเพื่ออัปเดตข้อมูลตลอดช่วงการจำลองสถานการณ์

7.3 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงได้ดังรูปที่ 7.2 จากรูปดังกล่าว ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้าและวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะถูกสร้างบนโปรแกรม Simulink/MATLAB โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ในขณะที่ส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ส่วนการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC ที่มีการปรับค่า HB โดยใช้พีซีซีลอจิก และส่วนการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอจะถูกโปรแกรมบนบอร์ด DSP ซึ่งจะรับข้อมูลอินพุตจากโปรแกรม Simulink/MATLAB ประกอบด้วยแรงดันที่แหล่งจ่าย (v_{ST} , v_{SM}) กระแสทางด้านโหลด (i_{LT} , i_{LM}) กระแสชดเชย (i_{CT} , i_{CM}) และแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ส่วนค่าเอาต์พุตที่ได้จากบอร์ด DSP คือ สัญญาณพัลส์ควบคุมอุปกรณ์สวิตช์กำลัง ไอจีบีทีที่สร้างโดยตัวควบคุม ADBHCC เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้ฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดทั้งหมด 2 กรณี เช่นเดียวกับในบทที่ 6 คือ กรณีโหลดที่ 1 ประกอบด้วย ช่วงที่ 1 เป็นค่ากระแสโหลดในสภาวะปกติ ช่วงที่ 2 กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ช่วงที่ 3 กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.5 เท่า และในช่วงที่ 4 กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงกลับสู่กระแสโหลดในสภาวะปกติ สำหรับกรณีโหลดที่ 2 ประกอบด้วย ช่วงที่ 1 เป็นกระแสโหลดในสภาวะปกติ ช่วงที่ 2 กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.6 เท่า ช่วงที่ 3 กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่า และในช่วงที่ 4 กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงกลับสู่กระแสโหลดในสภาวะปกติเดิม โดยการนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปจะแบ่งเป็นหัวข้อ ได้แก่ ผลการกำจัดฮาร์มอนิกกรณีใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสแบบสองแถบ (DBHCC) ผลการกำจัดฮาร์มอนิกกรณีใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC และการเปรียบเทียบผลการกำจัดฮาร์มอนิกระหว่างกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC และ ADBHCC โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้



รูปที่ 7.2 ระบบกำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

7.3.1 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC

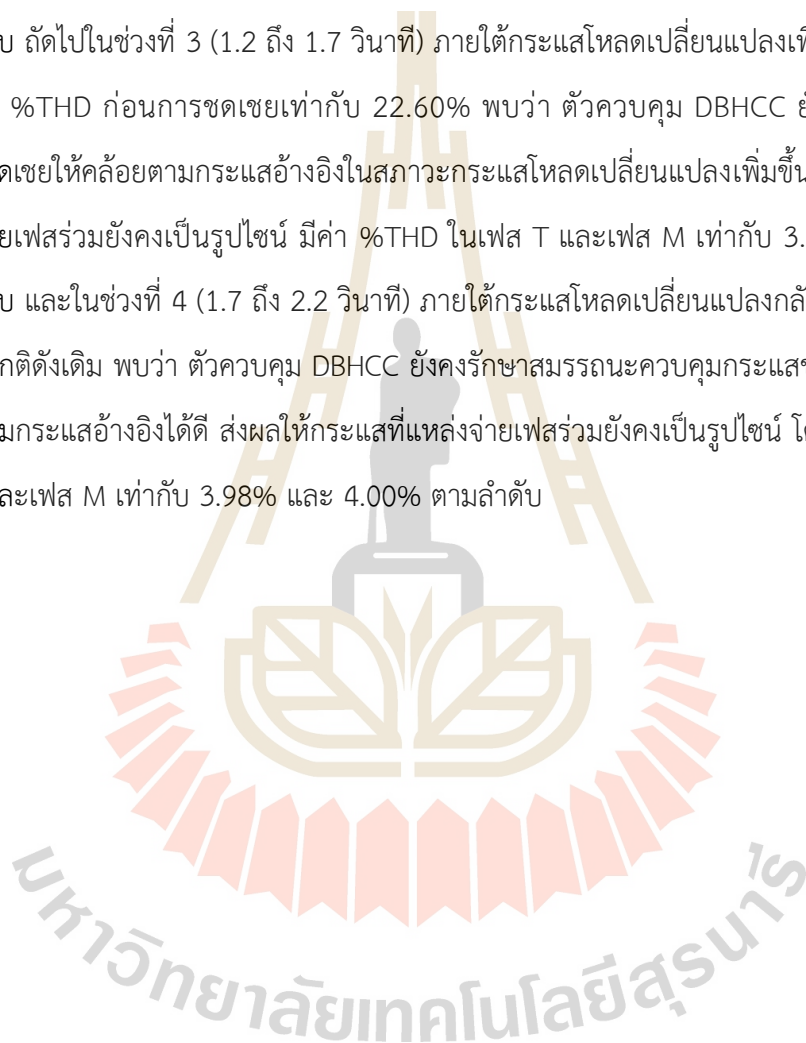
ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมกรณีใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ภายใต้กรณีโหลดที่ 1 และกรณีโหลดที่ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 7.3 และ 7.4 ตามลำดับ และผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 7.5 และ 7.6 ตามลำดับ โดยสามารถอภิปรายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

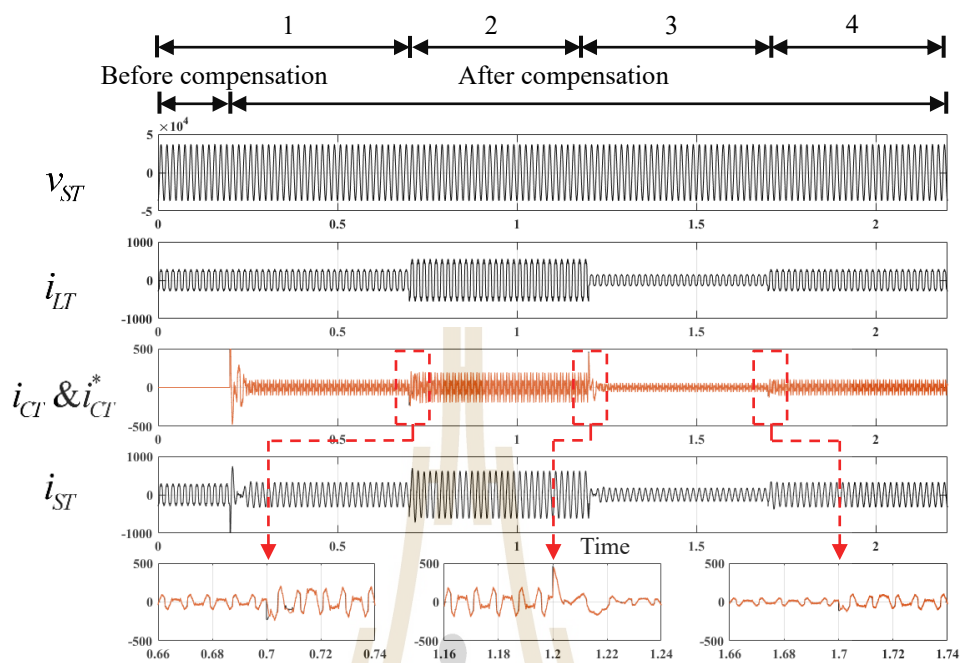
กรณีโหลดที่ 1 แสดงผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมดังรูปที่ 7.3 ในช่วงที่ 1 (0 ถึง 0.7 วินาที) ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ก่อนการชดเชย (Before compensation) ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.2 วินาที กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) มีลักษณะ

ผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์เช่นเดียวกับกระแสโหลด (i_{LT} , i_{LM}) โดยมีค่า %THD เท่ากับ 22.16% จากนั้นภายหลังการชดเชย (After compensation) ตั้งแต่เวลา 0.2 วินาที เป็นต้นไป พบว่า ตัวควบคุม DBHCC ที่รับข้อมูลอินพุตจากโปรแกรม Simulink/MATLAB ทำการประมวลผลบนบอร์ด DSP และให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณพัลส์ควบคุมอุปกรณ์สวิตช์กำลังไอจีบีทีที่ส่งไปยังวงจรกรองกำลัง แอ็กทิฟภายในโปรแกรม Simulink/MATLAB เพื่อทำการฉีดกระแสชดเชย (i_{CT} , i_{CM}) ที่มีลักษณะ คล้อยตามกระแสอ้างอิง (i_{CT}^* , i_{CM}^*) เข้าสู่จุดพิจารณากำจัดฮาร์มอนิก ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่าย เฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) มีลักษณะกลับมาเป็นรูปไซน์ โดย %THD ในเฟส T และเฟส M มีค่าลดลง เท่ากับ 3.98% และ 4.00% ตามลำดับ ต่อมาในช่วงที่ 2 (0.7 ถึง 1.2 วินาที) ภายใต้สภาวะกระแส โหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า โดยมีค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 22.83% พบว่า ตัวควบคุม DBHCC ยังคงมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชย (i_{CT} , i_{CM}) โดยมีลักษณะที่ คล้อยตามกระแสอ้างอิง (i_{CT}^* , i_{CM}^*) ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) ยังคงมี ลักษณะเป็นรูปไซน์ ที่ค่า %THD ในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 3.91% และ 3.92% ตามลำดับ จากนั้นในช่วงที่ 3 (1.2 ถึง 1.7 วินาที) ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.5 เท่า โดยมีค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 20.93% พบว่า ตัวควบคุม DBHCC สามารถควบคุมกระแสชดเชยให้ คล้อยตามกระแสอ้างอิงในสภาวะกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลง ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเป็นรูป ไซน์มากขึ้น แต่ยังคงมีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M สูงเกินมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 เท่ากับ 5.93% และ 5.92% ตามลำดับ และในช่วงที่ 4 (1.7 ถึง 2.2 วินาที) ภายใต้กระแสโหลด เปลี่ยนแปลงกลับสู่กระแสโหลดในสภาวะปกติอีกครั้ง พบว่า ตัวควบคุม DBHCC สามารถควบคุม กระแสชดเชยได้ดีเช่นเดิม ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมยังคงเป็นรูปไซน์ ที่ค่า %THD ในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 3.97% และ 3.97% ตามลำดับ

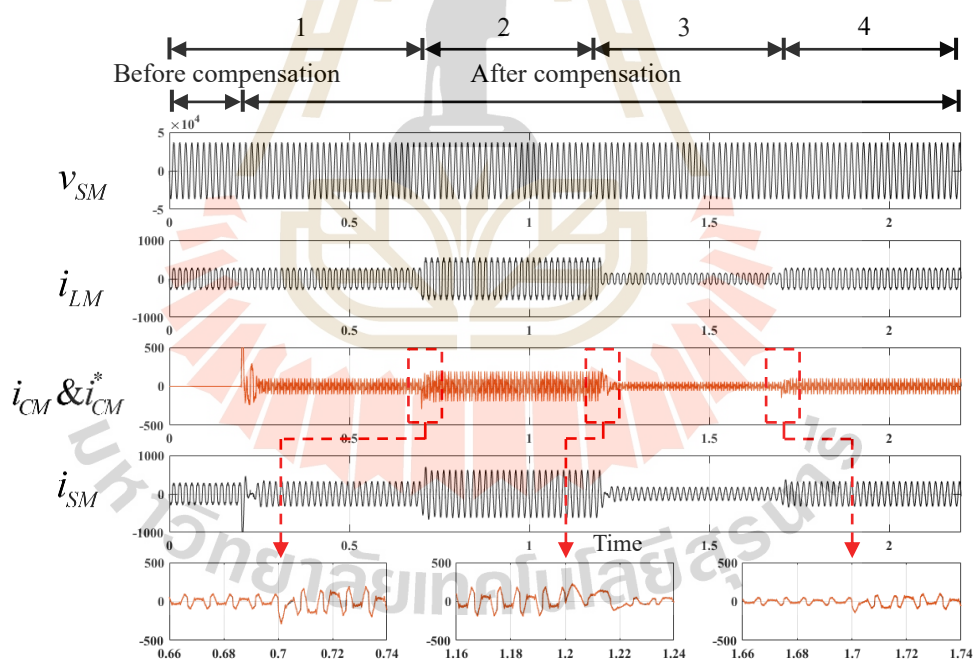
กรณีโหลดที่ 2 แสดงผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมดังรูปที่ 7.4 ใน ช่วงที่ 1 (0 ถึง 0.7 วินาที) ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ก่อนการชดเชยกระแสที่ แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) มีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ โดยมีค่า %THD เท่ากับ 22.16% จากนั้นภายหลังการชดเชย พบว่า ตัวควบคุม DBHCC สามารถควบคุมการทำงานของวงจรกรองกำลัง แอ็กทิฟให้ฉีดกระแสชดเชย (i_{CT} , i_{CM}) ที่มีลักษณะคล้อยตามกระแสอ้างอิง (i_{CT}^* , i_{CM}^*) ส่งผลให้ กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) มีลักษณะกลับมาเป็นรูปไซน์ โดย %THD ในเฟส T และ

เฟส M มีค่าลดลงเท่ากับ 3.98% และ 4.00% ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 (0.7 ถึง 1.2 วินาที) ภายใต้สภาวะกระแสไหลเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.6 เท่า โดยมีค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 21.32% พบว่า ตัวควบคุม DBHCC สามารถควบคุมกระแสชดเชยที่คล้อยตามกระแสอ้างอิงในสภาวะกระแสไหลเปลี่ยนแปลง ลดลงได้ ทำให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมมีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มขึ้นในระดับหนึ่ง แต่ยังคงมีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M เกินมาตรฐาน เท่ากับ 5.29% และ 5.24% ตามลำดับ ถัดไปในช่วงที่ 3 (1.2 ถึง 1.7 วินาที) ภายใต้กระแสไหลเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่า โดยมีค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 22.60% พบว่า ตัวควบคุม DBHCC ยังสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้คล้อยตามกระแสอ้างอิงในสภาวะกระแสไหลเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมยังคงเป็นรูปไซน์ มีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 3.75% และ 3.77% ตามลำดับ และในช่วงที่ 4 (1.7 ถึง 2.2 วินาที) ภายใต้กระแสไหลเปลี่ยนแปลงกลับสู่กระแสไหลในสภาวะปกติดั้งเดิม พบว่า ตัวควบคุม DBHCC ยังคงรักษาสมรรถนะควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้อยตามกระแสอ้างอิงได้ดี ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมยังคงเป็นรูปไซน์ โดยมีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 3.98% และ 4.00% ตามลำดับ



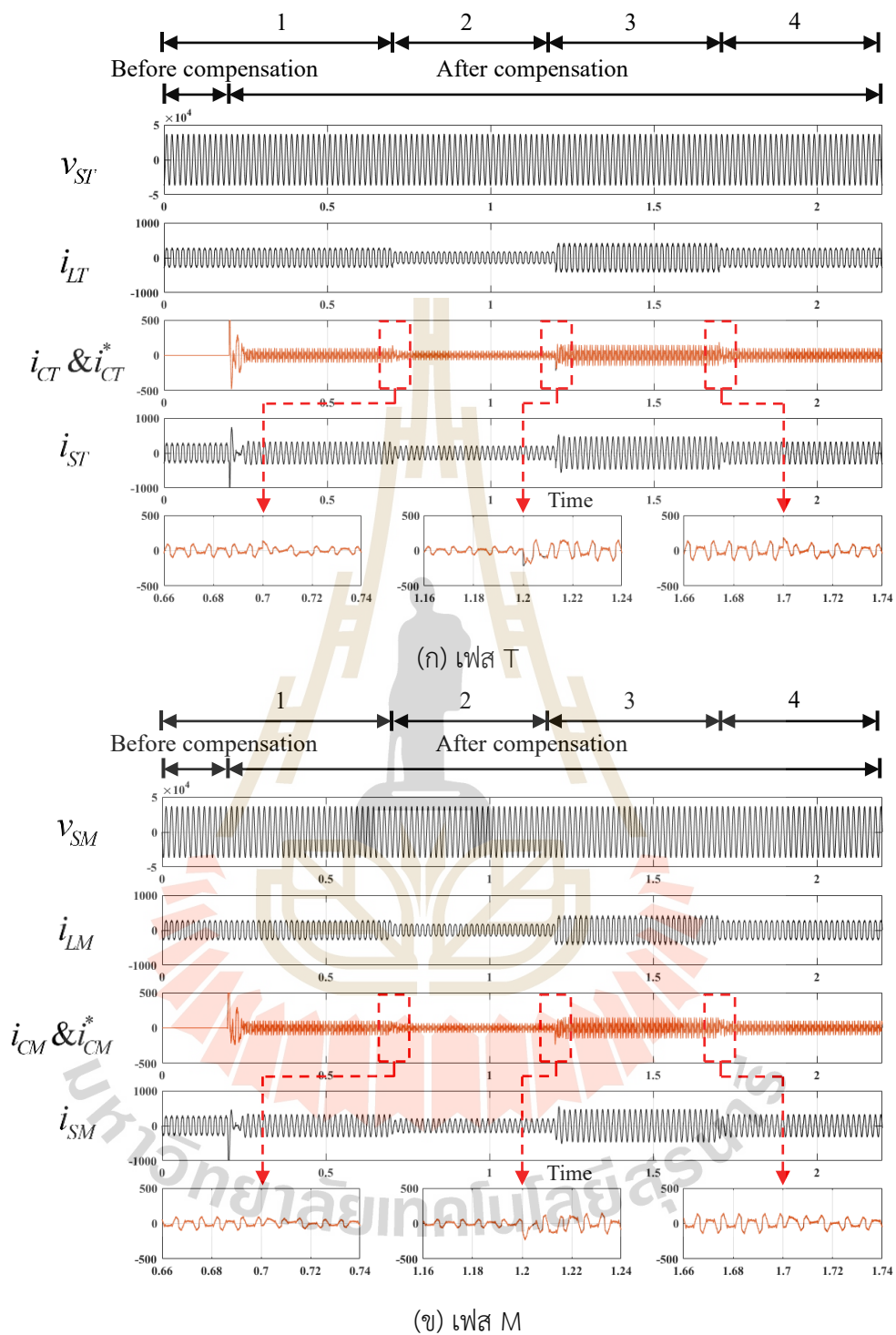


(ก) เฟส T



(ข) เฟส M

รูปที่ 7.3 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสร่วมโดยใช้ตัวควบคุม DBHCC ในกรณีโหลดที่ 1



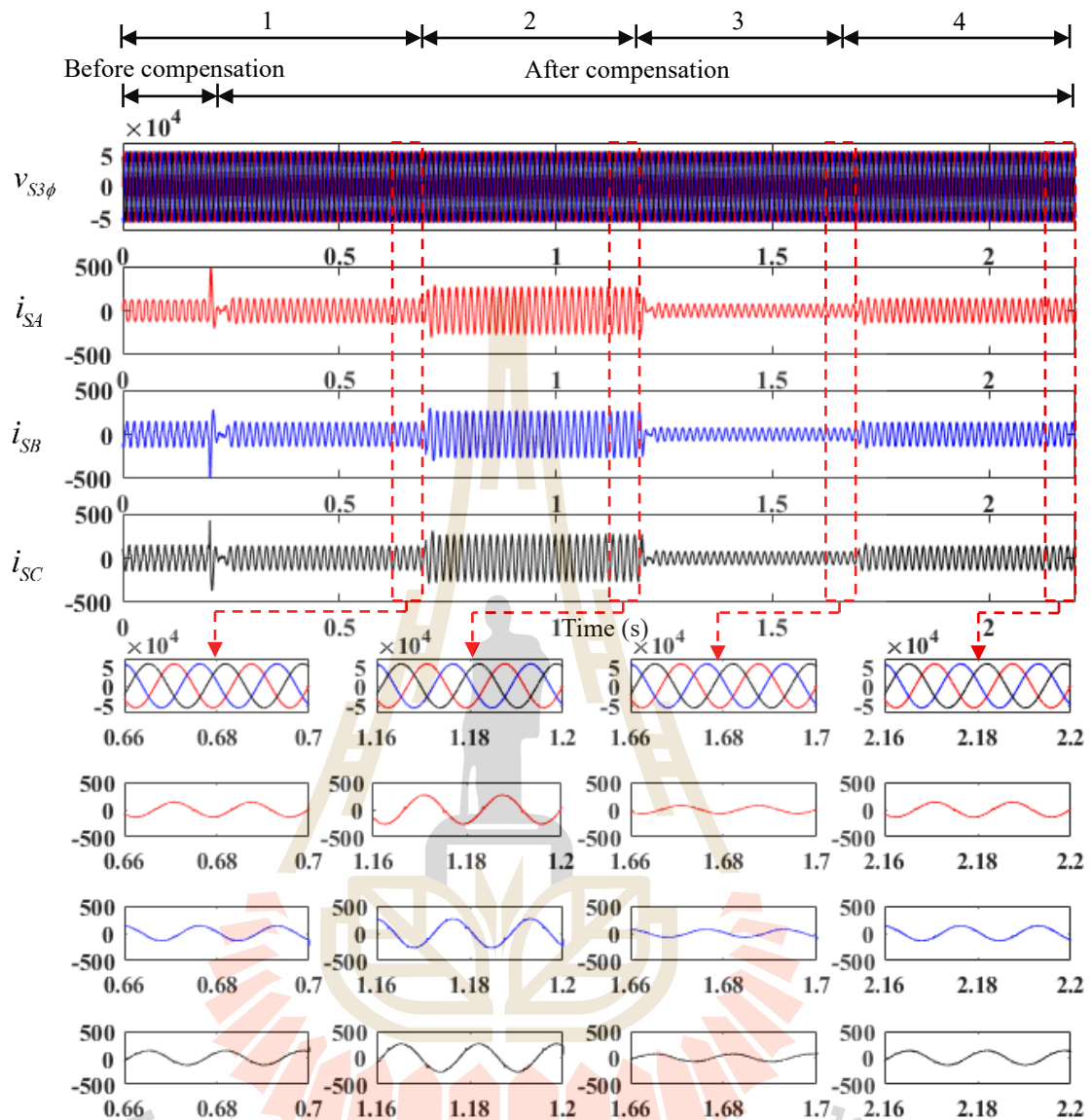
รูปที่ 7.4 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสร่วมโดยใช้ตัวควบคุม DBHCC ในกรณีโหลดที่ 2

จากผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ส่งผลให้ฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสถูกกำจัดด้วยเช่นกัน โดยสามารถอภิปรายผลในแต่ละกรณีโหนดได้ดังนี้

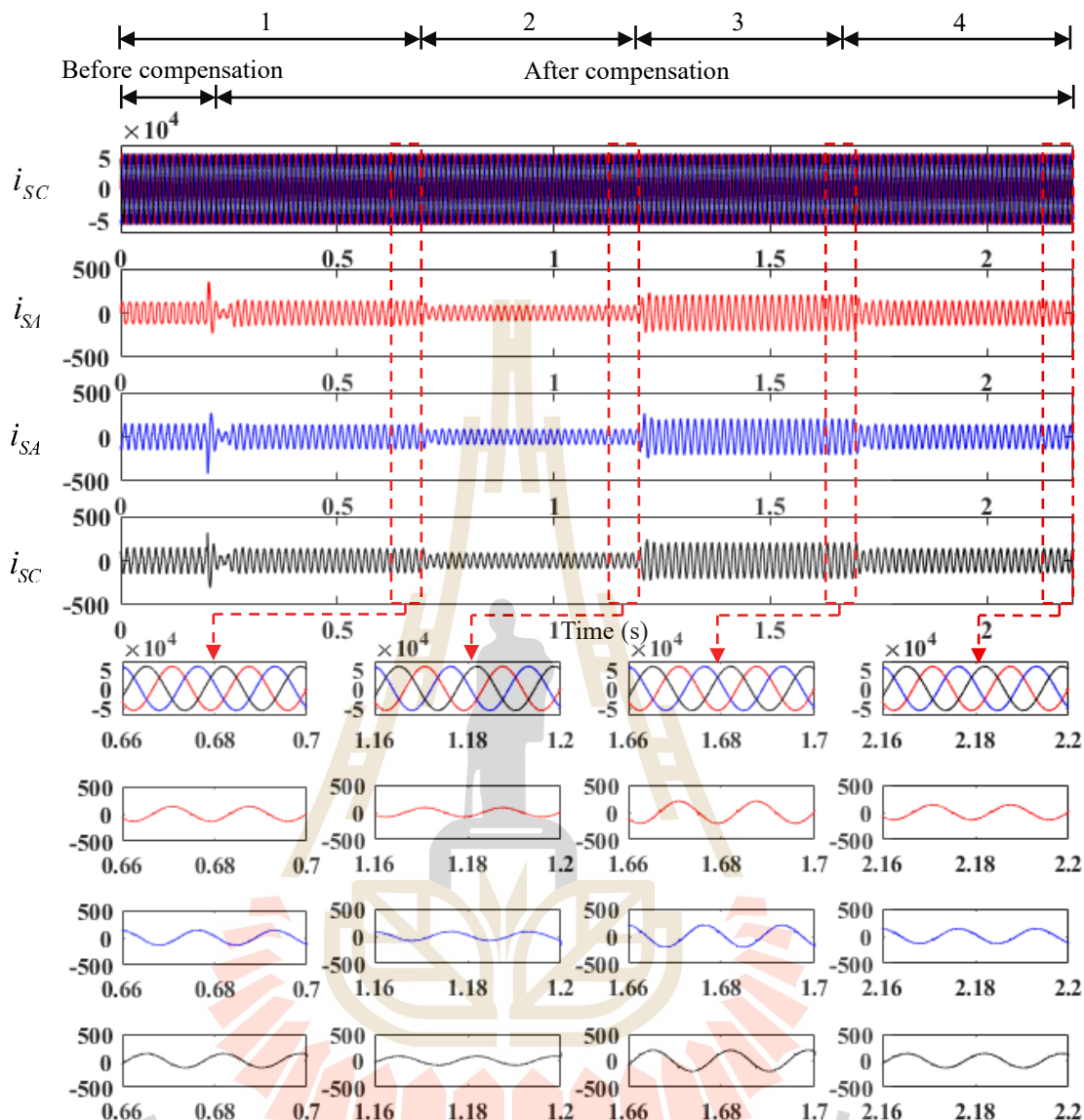
กรณีโหนดที่ 1 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแสดงดังรูปที่ 7.5 จากรูปดังกล่าว จะเห็นว่ากระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) มีลักษณะเป็นรูปไซน์ โดยในช่วงที่ 1 ภายใต้กระแสโหนดในสภาวะปกติ มีค่า %THD ภายหลังการชดเชยเท่ากับ 4.00% 4.00% และ 3.96% ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 ภายใต้กระแสโหนดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า มีค่า %THD เท่ากับ 3.92% 3.93% และ 3.89% ตามลำดับ ต่อมาในช่วงที่ 3 ภายใต้กระแสโหนดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.5 เท่า มีค่า %THD ภายหลังการชดเชยเท่ากับ 5.92% 5.99% และ 5.87% ตามลำดับ และในช่วงที่ 4 กระแสโหนดกลับสู่กระแสโหนดในสภาวะปกติ พบว่า มีค่า %THD ภายหลังการชดเชยเท่ากับ 3.97% 3.98% และ 3.95% ตามลำดับ

กรณีโหนดที่ 2 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแสดงดังรูปที่ 7.6 โดยพบว่า กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟสมีลักษณะเป็นรูปไซน์ ซึ่งในช่วงที่ 1 ภายใต้กระแสโหนดในสภาวะปกติ พบว่า ค่า %THD ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 4.00% 4.00% และ 3.96% ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 ภายใต้กระแสโหนดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.6 เท่า มีค่า %THD ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 5.24% 5.31% และ 5.24% ตามลำดับ ในช่วงที่ 3 ภายใต้กระแสโหนดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่า มีค่า %THD ภายหลังการชดเชยเท่ากับ 3.77% 3.75% และ 3.77% ตามลำดับ และในช่วงที่ 4 กระแสโหนดกลับสู่กระแสโหนดในสภาวะปกติดังเดิม มีค่า %THD ภายหลังการชดเชยเท่ากับ 4.00% 4.00% และ 3.96% ตามลำดับ

จากผลการกำจัดฮาร์มอนิกในรูปที่ 7.3 ถึง 7.6 ลักษณะการบิดเบี้ยวของกระแสที่แหล่งจ่ายในช่วงสภาวะชั่วคราวเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสโหนด เป็นผลจากการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 1 คาบรูปสัญญาณวิธี SWFA ของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF



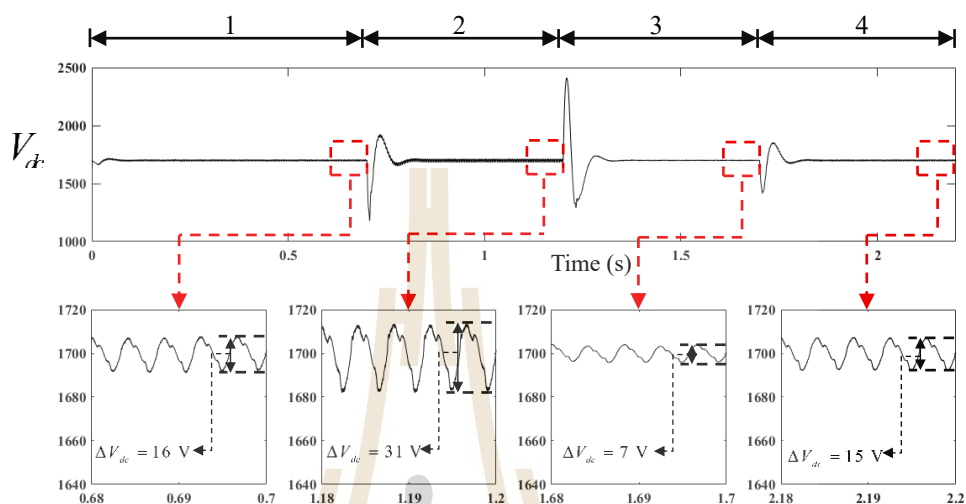
รูปที่ 7.5 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสโดยใช้ตัวควบคุม DBHCC ในกรณีโหลดที่ 1



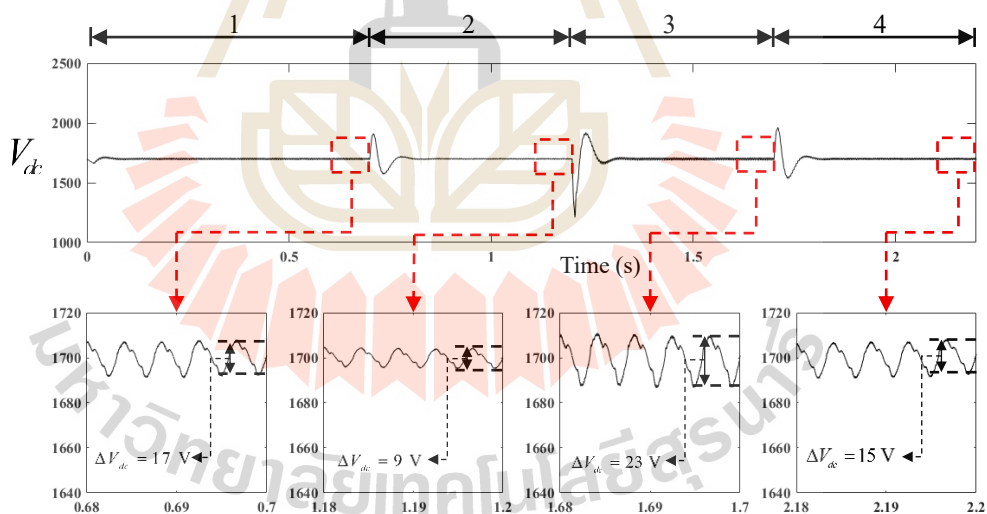
รูปที่ 7.6 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสโดยใช้ตัวควบคุม DBHCC ในกรณีโหลดที่ 2

สำหรับผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอร่วมกับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.7 และ 7.8 สำหรับกรณีโหลดที่ 1 และกรณีโหลดที่ 2 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวพบว่า การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอที่ประมวลผลบนบอร์ด DSP มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง โดยสามารถควบคุมให้มีค่าเท่ากับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงเท่ากับ 1700 V โดยมีการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง (ΔV_{dc}) ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดในกรณีโหลดที่ 1 ในช่วงที่ 1 2 3 และ 4 เท่ากับ 16 V 31 V 7 V และ 15 V ตามลำดับ และภายใต้

กรณีโหลดที่ 2 ในช่วงที่ 1 2 3 และ 4 เท่ากับ 17 V 9 V 23 V และ 15 V ตามลำดับ ซึ่งมีค่าอยู่ภายใต้ขอบเขต 34 V ตามที่ได้ออกแบบไว้ทุกช่วงโหลด



รูปที่ 7.7 ผลการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอร่วมกับการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุม DBHCC ในกรณีโหลดที่ 1



รูปที่ 7.8 ผลการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอร่วมกับการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุม DBHCC ในกรณีโหลดที่ 2

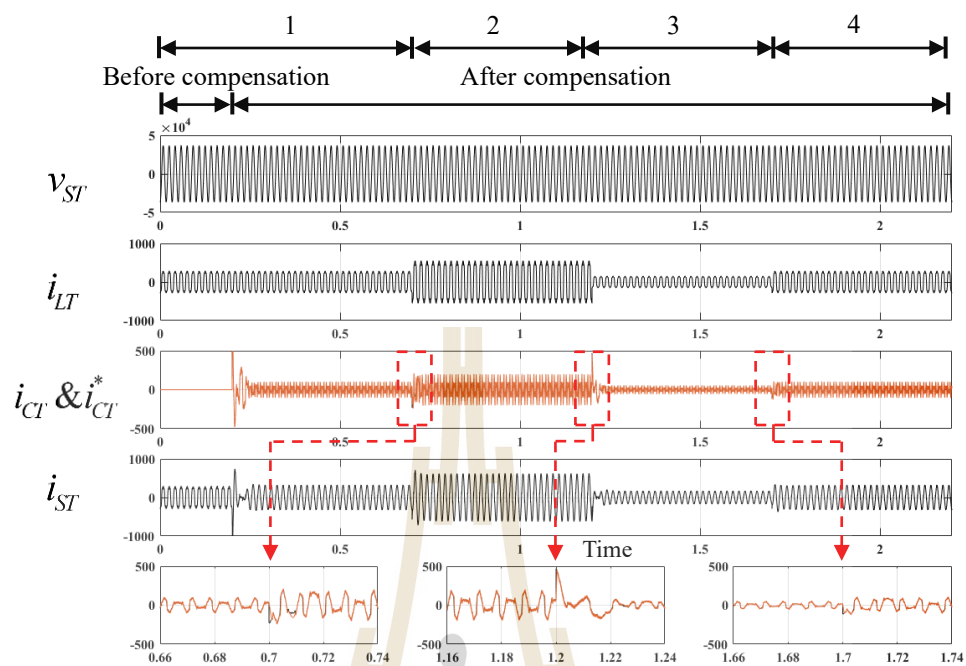
7.3.2 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในอุปกรณ์ใช้ ตัวควบคุม ADBHCC

ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมกรณีใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC ภายใต้กรณีโหลดที่ 1 และกรณีโหลดที่ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 7.9 และ 7.10 ตามลำดับ และผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 7.11 และ 7.12 ตามลำดับ โดยสามารถอภิปรายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

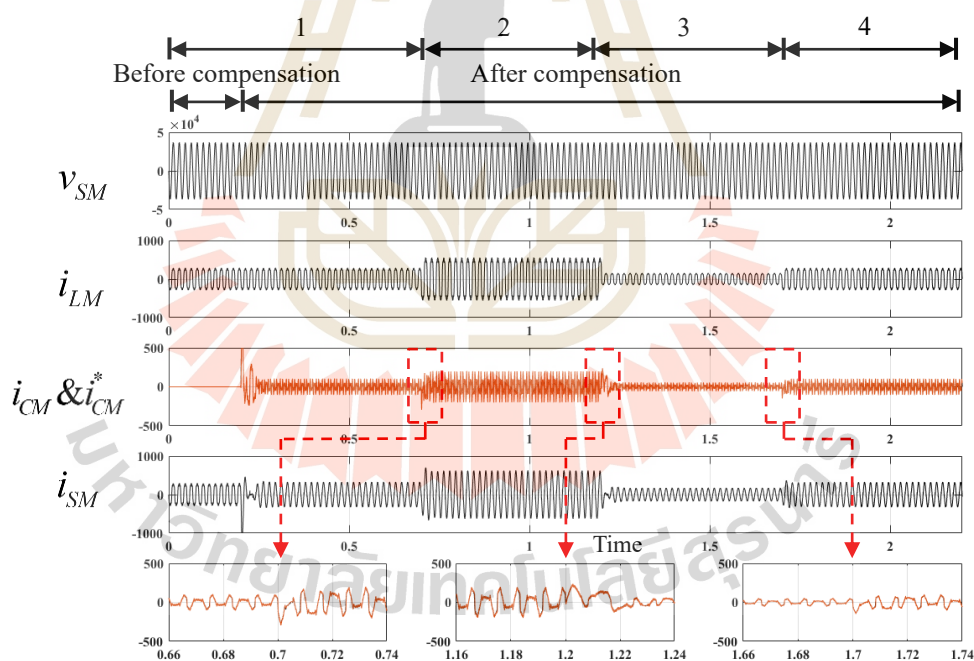
กรณีโหลดที่ 1 แสดงผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมดังรูปที่ 7.9 ในช่วงที่ 1 (0 ถึง 0.7 วินาที) ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ก่อนการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.2 วินาที กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) มีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์เช่นเดียวกับกระแสโหลด (i_{LT} , i_{LM}) โดยมีค่า %THD เท่ากับ 22.16% จากนั้นตั้งแต่เวลา 0.2 วินาที เป็นต้นไป หลังการชดเชย พบว่า ตัวควบคุม ADBHCC ที่ประมวลผลบนบอร์ด DSP สามารถควบคุมการผิดกระแสชดเชย (i_{CT} , i_{CM}) ที่มีลักษณะคล้อยตามกระแสอ้างอิง (i_{CT}^* , i_{CM}^*) เข้าสู่จุดพิจารณากำจัดฮาร์มอนิก ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) มีลักษณะกลับมาเป็นรูปไซน์ โดย %THD ในเฟส T และเฟส M มีค่าลดลงเท่ากับ 3.98% และ 4.00% ตามลำดับ และในช่วงที่ 2 (0.7 ถึง 1.2 วินาที) ภายใต้สภาวะกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า พบว่า ตัวควบคุม ADBHCC ยังคงมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชย (i_{CT} , i_{CM}) ให้มีลักษณะตามกระแสอ้างอิง (i_{CT}^* , i_{CM}^*) โดยตัวควบคุม ADBHCC สามารถปรับค่า HB ที่สอดคล้องกับกับสภาวะกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) ยังคงมีลักษณะเป็นรูปไซน์ และมีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 4.41% และ 4.34% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 22.83% ต่อมาในช่วงที่ 3 (1.2 ถึง 1.7 วินาที) ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.5 เท่า พบว่า ตัวควบคุม ADBHCC ยังคงสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้คล้อยตามกระแสอ้างอิงและสามารถปรับค่า HB ตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดลดลง ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมยังคงเป็นรูปไซน์ โดยมีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 4.03% และ 4.43% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 20.93% และในช่วงที่ 4 (1.7 ถึง 2.2 วินาที) ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงกลับสู่ กระแสโหลดในสภาวะปกติ ดังเดิม

พบว่า ยังมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชย โดยตัวควบคุม ADBHCC สามารถปรับค่า HB ที่สอดคล้องกับกระแสโหลดในสภาวะปกติ ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่าย เฟสรวมยังคงเป็นรูปไซน์ และมีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 3.66% และ 3.64% ตามลำดับ

กรณีโหลดที่ 2 แสดงผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมดังรูปที่ 7.10 โดยในช่วงที่ 1 ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ก่อนการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวม (i_{ST} , i_{SM}) มีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ โดยมีค่า %THD เท่ากับ 22.16% และภายหลังการชดเชยตัวควบคุม ADBHCC สามารถปรับค่า HB ที่สอดคล้องตามกระแสโหลดในสภาวะปกติ และควบคุมผิดกระแสชดเชย (i_{CT} , i_{CM}) ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง (i_{CT}^* , i_{CM}^*) ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมกลับมาเป็นรูปไซน์ โดยมีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M ลดลงเท่ากับ 3.98% และ 4.00% ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.6 เท่า พบว่า ตัวควบคุม ADBHCC สามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง โดยสามารถปรับค่า HB ที่สอดคล้องกับสภาวะกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลง ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมยังคงเป็นรูปไซน์ มีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 4.09% และ 4.09% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 21.32% ถัดไปในช่วงที่ 3 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่า พบว่า ตัวควบคุม ADBHCC ซึ่งมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชย โดยสามารถปรับค่า HB ที่สอดคล้องกับสภาวะของกระแสโหลดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมยังคงเป็นรูปไซน์ ที่มีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 4.03% และ 4.19% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า %THD ก่อนการชดเชยเท่ากับ 22.60% และในช่วงที่ 4 กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงกลับสู่กระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ตัวควบคุม ADBHCC สามารถควบคุมกระแสชดเชยได้ดีเช่นเดิม โดยสามารถปรับค่า HB ตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลด ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายเฟสรวมยังคงความเป็นรูปไซน์โดยมีค่า %THD ในเฟส T และเฟส M เท่ากับ 4.72% และ 4.48% ตามลำดับ

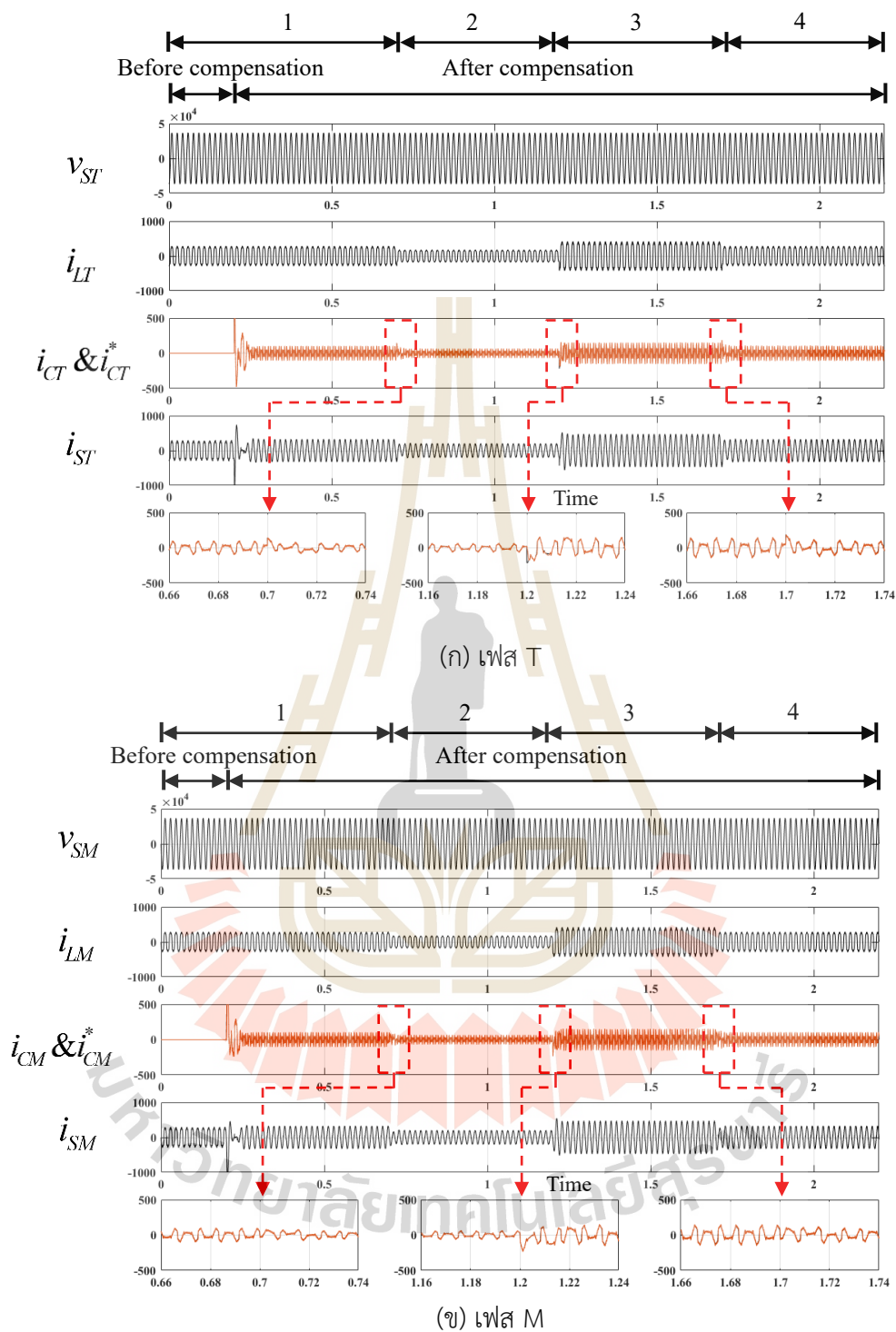


(ก) เฟส T



(ข) เฟส M

รูปที่ 7.9 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสร่วมโดยใช้ตัวควบคุม ADBHCC ในกรณีโหลดที่ 1



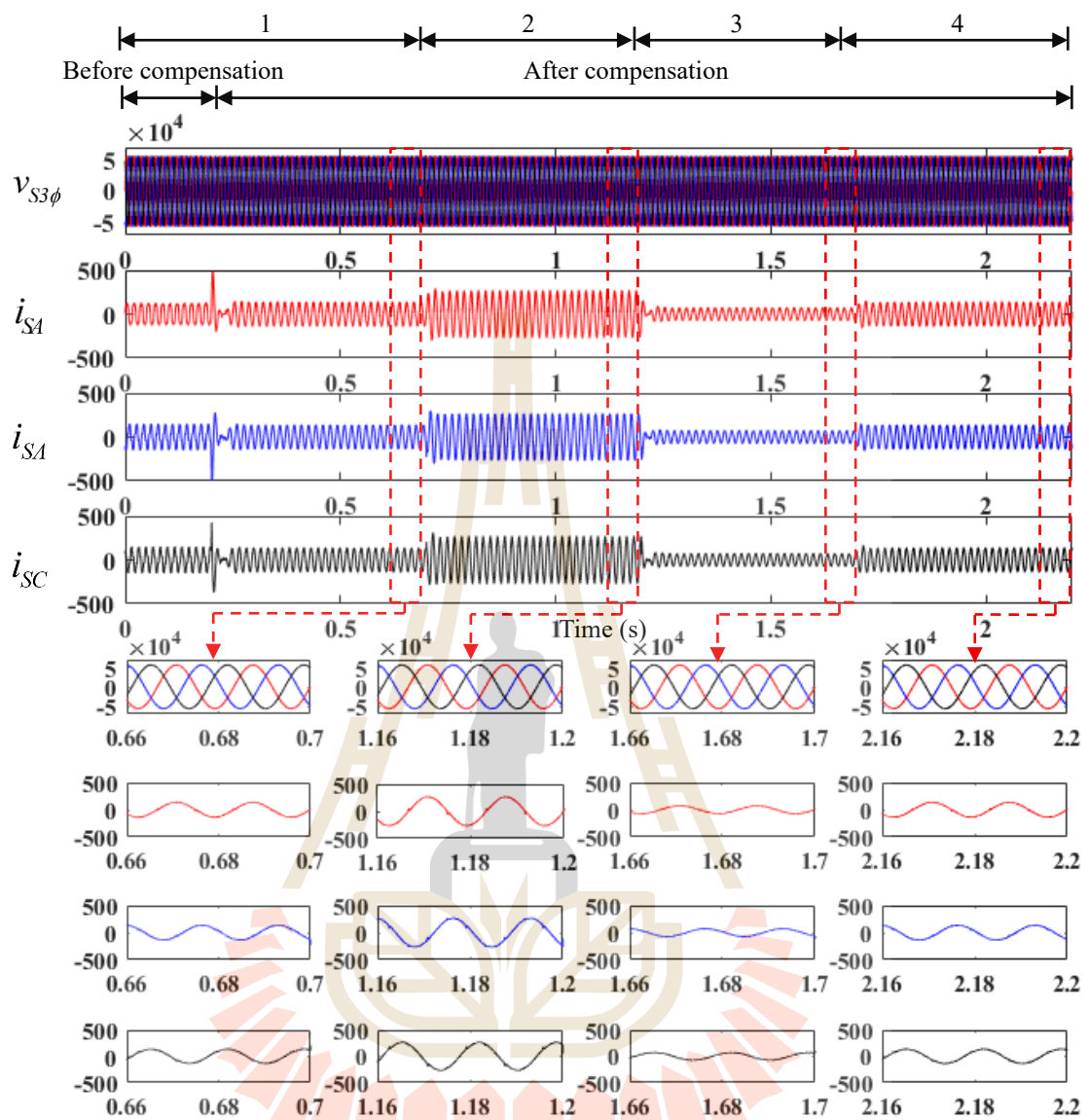
รูปที่ 7.10 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสร่วมโดยใช้ตัวควบคุม ADBHCC ในกรณีโหลดที่ 2

จากผลการจำลองฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้าเฟสรวมที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) กลับมาเป็นรูปไซน์ภายหลังการชดเชยด้วยเช่นกัน โดยสามารถแสดงผลการจำลองฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสในแต่ละกรณีโหลดได้ดังนี้

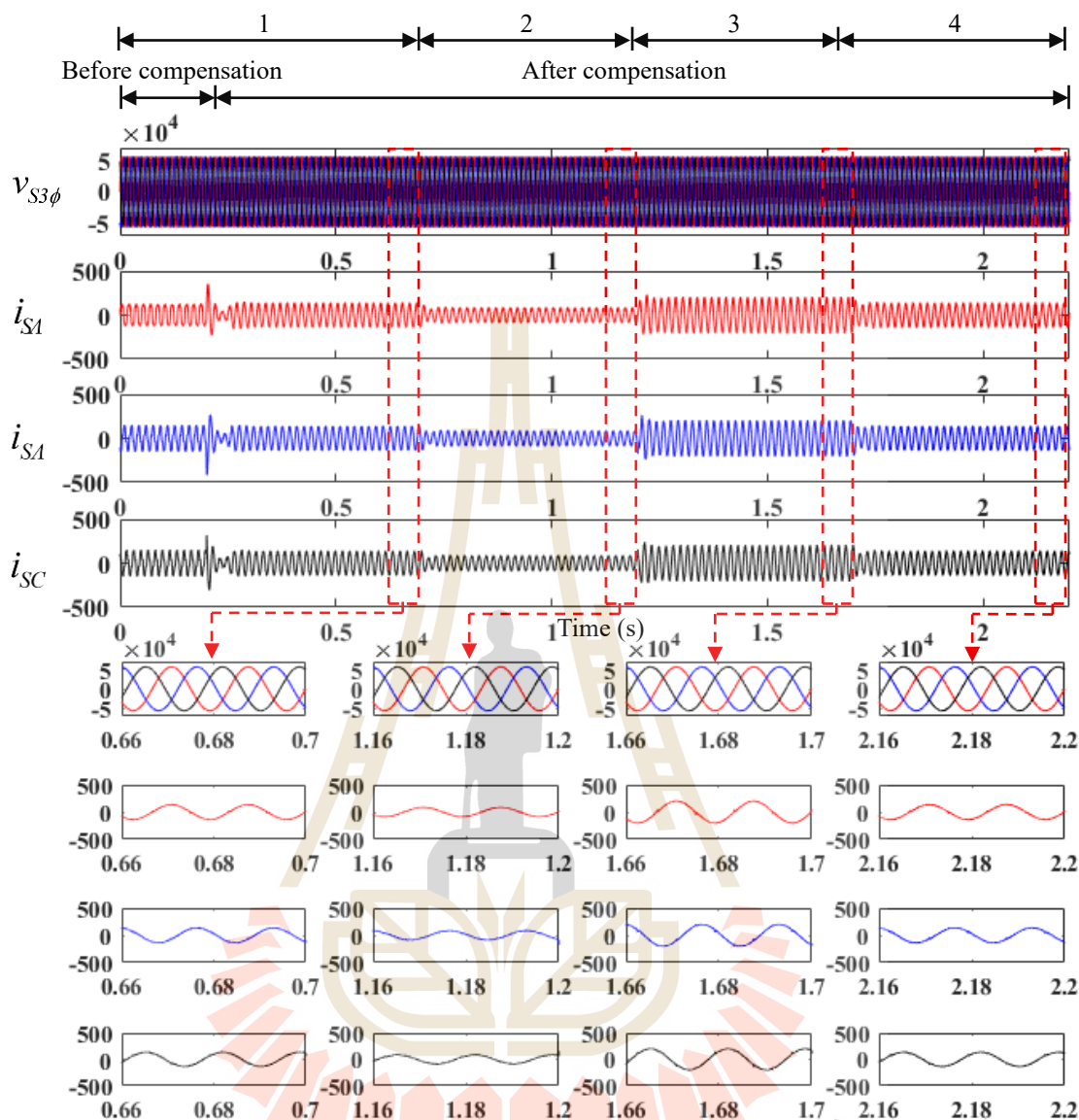
กรณีโหลดที่ 1 ผลการจำลองฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสดังรูปที่ 7.11 พบว่าในช่วงที่ 1 ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ มีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) ภายหลังการชดเชยเท่ากับ 4.00% 4.00% และ 3.96% ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า พบว่า มีค่า %THD เท่ากับ 4.34% 4.39% และ 4.40% ตามลำดับ ต่อมาในช่วงที่ 3 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.5 เท่า พบว่า มีค่าเท่ากับ 4.34% 4.39% และ 4.40% ตามลำดับ และในช่วงที่ 4 กระแสโหลดกลับสู่กระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า มีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟสภายหลังการชดเชยเท่ากับ 3.64% 3.67% และ 3.64% ตามลำดับ

กรณีโหลดที่ 2 ผลการจำลองฮาร์โมนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสดังรูปที่ 7.12 โดยในช่วงที่ 1 ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 4.00% 4.00% และ 3.96% ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.6 เท่า พบว่า ค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟสมีค่าเท่ากับ 4.09% 4.09% และ 4.09% ตามลำดับ ในช่วงที่ 3 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่า มีค่า %THD เท่ากับ 4.19% 4.07% และ 4.07% ตามลำดับ และในช่วงที่ 4 กระแสโหลดกลับสู่กระแสโหลดในสภาวะปกติ ดังเดิม พบว่า จะมีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟสภายหลังการชดเชยเท่ากับ 4.48% 4.64% และ 4.68% ตามลำดับ

จากผลการจำลองฮาร์โมนิกในรูปที่ 7.9 ถึง 7.12 จะเกิดลักษณะการบิดเบี้ยวของกระแสที่แหล่งจ่ายในช่วงสภาวะชั่วคราวเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดเช่นเดียวกับกรณีที่ใช้การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม DBHCC ซึ่งเป็นผลจากการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 1 คาบรูปสัญญาณวิธี SWFA



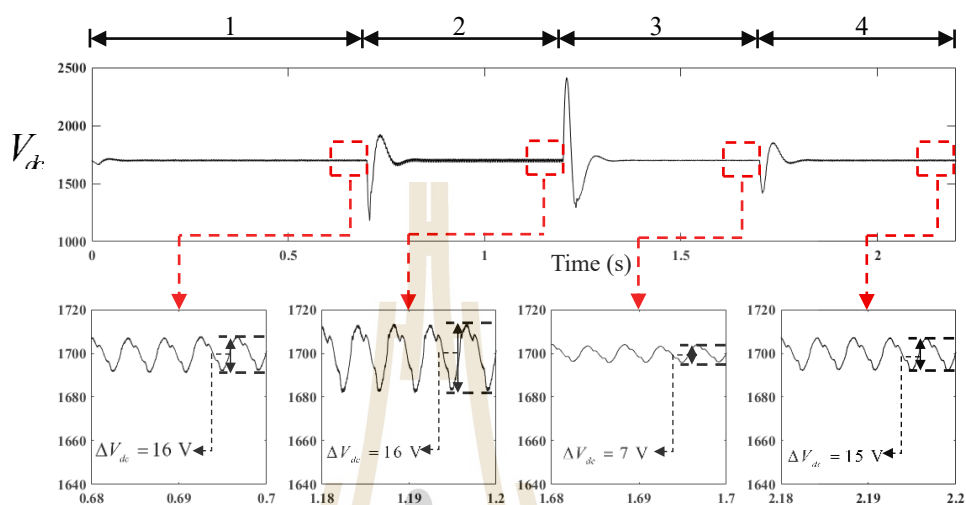
รูปที่ 7.11 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสโดยตัวควบคุม ADBHCC ในกรณีโหลดที่ 1



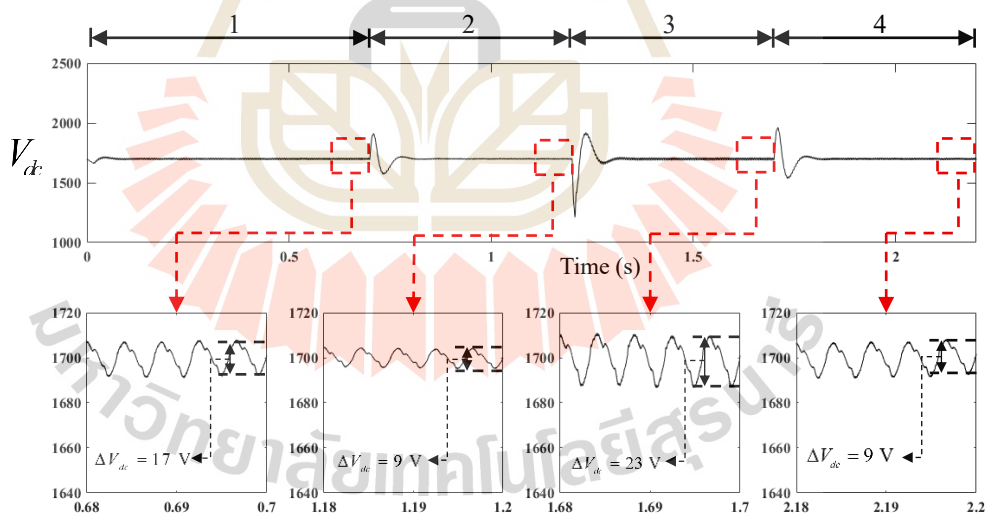
รูปที่ 7.12 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสโดยตัวควบคุม ADBHCC ในกรณีโหลดที่ 2

สำหรับผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้ตัวควบคุมพีไอร่วมกับการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.13 และ 7.14 สำหรับกรณีโหลดที่ 1 และกรณีโหลดที่ 2 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวพบว่า ตัวควบคุมพีไอที่ประมวลผลบนบอร์ด DSP มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง โดยสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าเท่ากับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (1700 V) และมีการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง (ΔV_{dc}) ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดในกรณีโหลดที่ 1 ในช่วงที่ 1 2 3 และ 4 เท่ากับ 16 V 31 V 7 V และ 15 V ตามลำดับ และภายใต้กรณีโหลดที่ 2

ในช่วงที่ 1 2 3 และ 4 เท่ากับ 17 V 9 V 23 V และ 15 V ตามลำดับ ซึ่งมีค่าอยู่ภายใต้ขอบเขต 34 V ตามที่ได้ออกแบบไว้ทุกช่วงโหลด



รูปที่ 7.13 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอร่วมกับการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุม ADBHCC ในกรณีโหลดที่ 1



รูปที่ 7.14 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอร่วมกับการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุม ADBHCC ในกรณีโหลดที่ 2

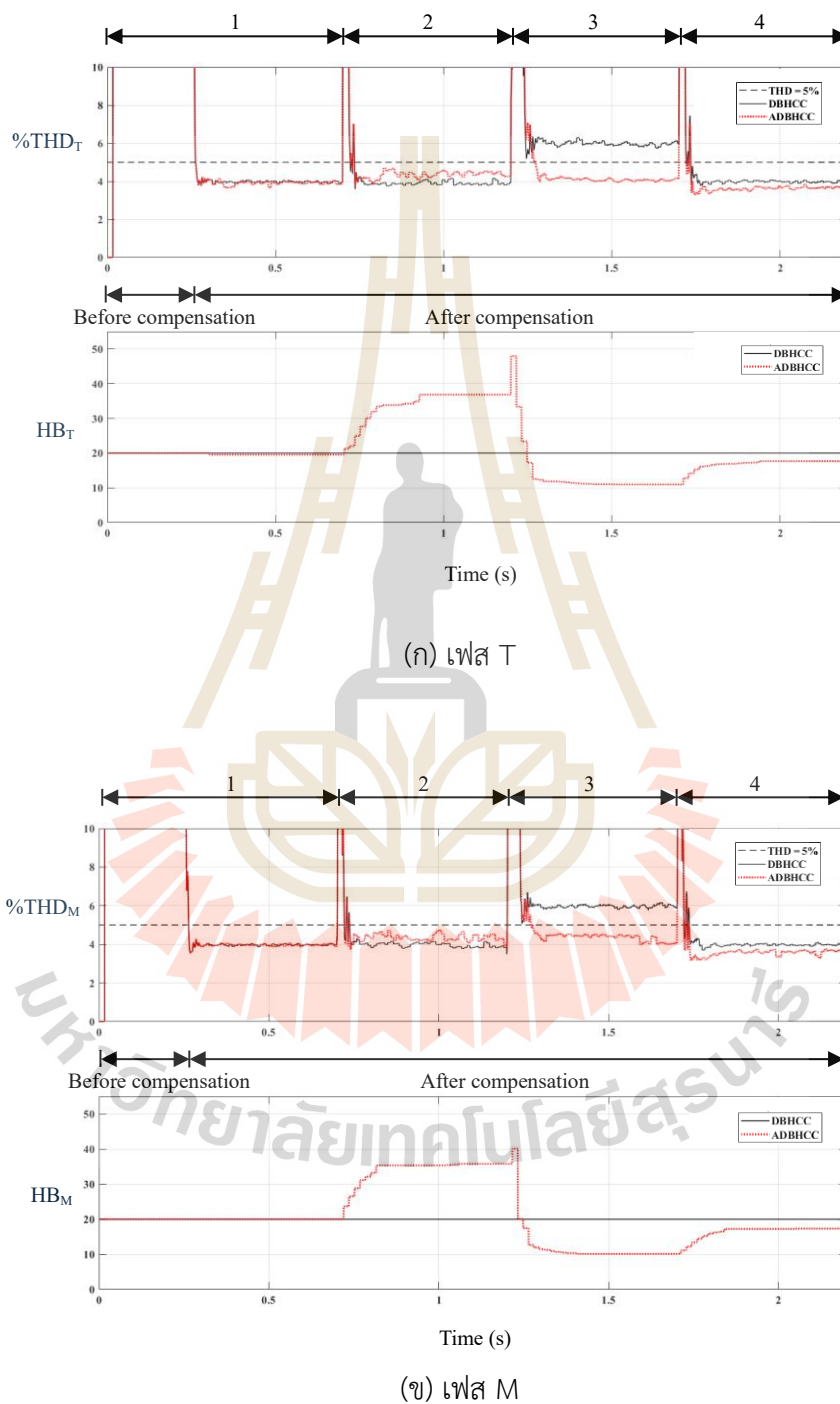
7.3.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูประหว่างกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC และ ADBHCC

ในหัวข้อนี้นำเสนอการเปรียบเทียบผลการกำจัดฮาร์มอนิกระหว่างกรณีใช้การควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุม DBHCC ที่มีการกำหนดค่า HB คงที่เท่ากับ 20 A และกรณีใช้ตัวควบคุม ADBHCC ที่มีการปรับค่า HB ด้วยพีชชีลอจิก การเปรียบเทียบจะแสดงผลการกำจัดฮาร์มอนิก (ค่า %THD) ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าของ HB เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีโหลดที่ 1 และในกรณีโหลดที่ 2 ดังรูปที่ 7.15 และ 7.16 ตามลำดับ และแสดงสรุปผลค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายและจำนวนครั้งการสวิตช์ในกรณีโหลดที่ 1 และกรณีโหลดที่ 2 ดังตารางที่ 7.1 และ 7.2 ตามลำดับ ดังต่อไปนี้

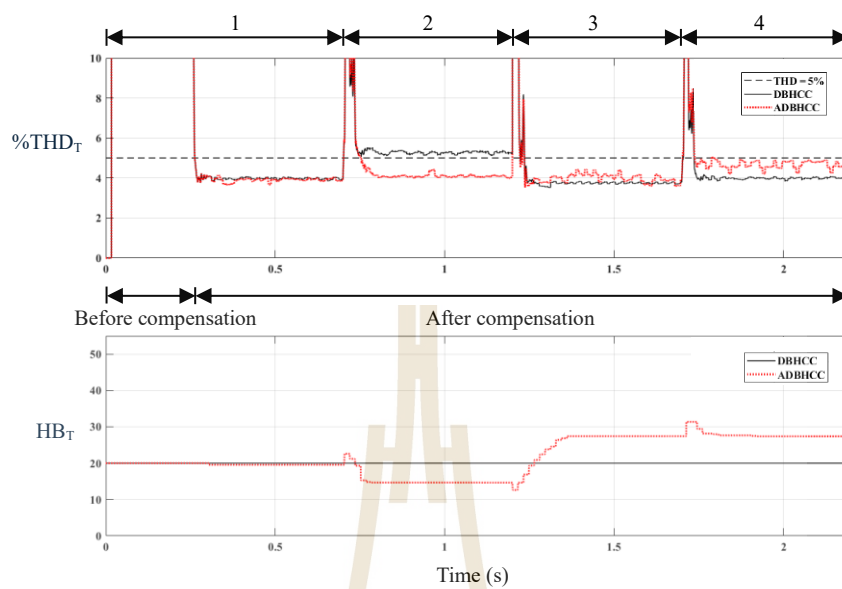
ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับค่า HB ในกรณีโหลดที่ 1 ดังรูปที่ 7.15 ในช่วงที่ 1 ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ตัวควบคุม DBHCC และ ADBHCC มีค่า HB เท่ากันที่ 20 A ส่งผลให้มีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายเท่ากัน และมีค่าไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 ช่วงที่ 2 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ตัวควบคุม DBHCC ที่คงค่า HB เท่ากับ 20 A ยังคงให้ค่า %THD ต่ำกว่า 5% ตามกรอบมาตรฐาน ส่วนตัวควบคุม ADBHCC ทำการปรับเพิ่มค่า HB เป็น 36 A โดยส่งผลให้ค่า %THD ต่ำกว่า 5% เช่นกัน จากนั้นในช่วงที่ 3 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.5 เท่า พบว่า ตัวควบคุม DBHCC ที่ค่า HB เท่ากับ 20 A ให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก ที่ไม่ดี โดยมีค่า %THD เกิน 5% ไม่เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน ในขณะที่ตัวควบคุม ADBHCC ทำการปรับลดค่า HB เป็น 10 A ซึ่งทำให้ค่า %THD ไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน และในช่วงที่ 4 สภาวะที่กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงกลับมาเป็นกระแสโหลดในสภาวะปกติ พบว่า ตัวควบคุม DBHCC และ ADBHCC มีค่า %THD ไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน แต่กรณีใช้ตัวควบคุม ADBHCC จะควบคุมภายใต้ค่า HB เท่ากับ 17 A

ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับค่า HB ในกรณีโหลดที่ 2 ดังรูปที่ 7.16 ช่วงที่ 1 ภายใต้กระแสโหลดในสภาวะปกติ ตัวควบคุม DBHCC และ ADBHCC ประมวลผลบนบอร์ด DSP ด้วยค่า HB เท่ากันเท่ากับ 20 A ส่งผลให้มีค่า %THD เท่ากัน โดยมีค่าไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน ช่วงที่ 2 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น 0.6 เท่า พบว่า ตัวควบคุม DBHCC ที่คงค่า HB เท่ากับ 20 A ให้ค่า %THD เกิน 5% ซึ่งไม่เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน ส่วนตัวควบคุม ADBHCC พบว่า มีการปรับค่า HB ลดลงเป็น 15 A ส่งผลให้ค่า %THD ลดลงต่ำกว่า 5% ตามกรอบมาตรฐาน ในช่วงที่ 3 ภายใต้กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่า ตัวควบคุม DBHCC และ ADBHCC มีค่า %THD ต่ำกว่า 5% ตามกรอบมาตรฐาน โดยตัวควบคุม ADBHCC ทำการปรับค่า HB เป็น 27 A และในช่วงที่ 4 กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงสู่กระแสโหลดในสภาวะปกติเช่นเดิม พบว่า ตัวควบคุม

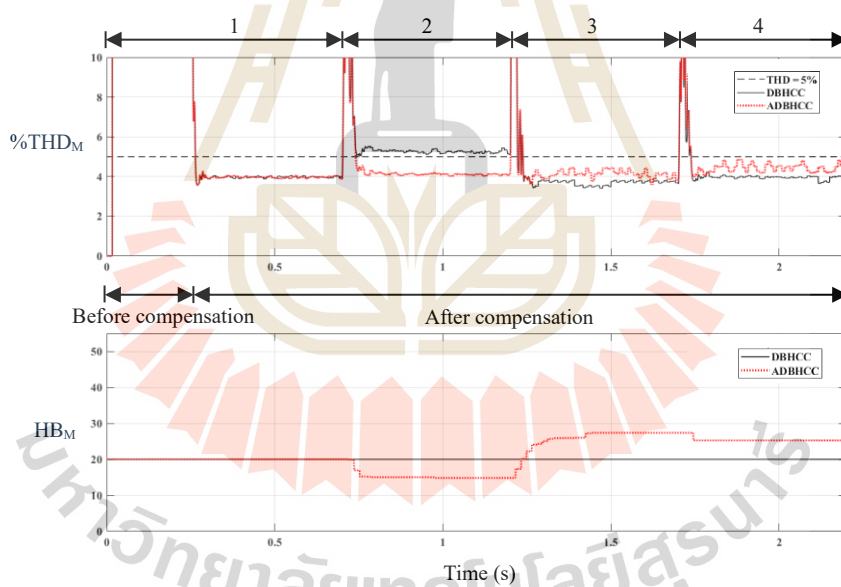
DBHCC และ ADBHCC ยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดี โดยมีค่า %THD น้อยกว่า 5% ตามกรอบมาตรฐานทั้งคู่ซึ่งตัวควบคุม ADBHCC ได้ปรับค่า HB เท่ากับ 27 A



รูปที่ 7.15 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับค่า HB สำหรับกรณีโหลดที่ 1



(ก) เฟส T



(ข) เฟส M

รูปที่ 7.16 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับค่า HB สำหรับกรณีโหลดที่ 2

ตารางที่ 7.1 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกกรณีโหลดที่ 1

ตัวควบคุม	สภาวะของ กระแสโหลด	ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่าย เฟสรวม		ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส			จำนวน ครั้ง การ สวิตซ์ (ครั้ง)
		เฟส T	เฟส M	เฟส A	เฟส B	เฟส C	
	ก่อนการชดเชย						
	ปกติ (1 เท่า)	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	
	เพิ่มขึ้น 2 เท่า	22.83%	22.83%	22.83%	22.83%	22.83%	
	ลดลง 0.5 เท่า	20.93%	20.93%	20.93%	20.93%	20.93%	
	ภายหลังการชดเชย						
DBHCC	ช่วงที่ 1 (ปกติ 1 เท่า)	3.98%	4.00%	4.00%	4.00%	3.96%	6908
	ช่วงที่ 2 (เพิ่มขึ้น 2 เท่า)	3.91%	3.92%	3.92%	3.93%	3.89%	6584
	ช่วงที่ 3 (ลดลง 0.5 เท่า)	5.93%	5.92%	5.92%	5.99%	5.87%	7028
	ช่วงที่ 4 (ปกติ 1 เท่า)	3.97%	3.97%	3.97%	3.98%	3.95%	6908
ADBHCC	ช่วงที่ 1 (ปกติ 1 เท่า)	3.98%	4.00%	4.00%	4.00%	3.96%	6908
	ช่วงที่ 2 (เพิ่มขึ้น 2 เท่า)	4.41%	4.34%	4.34%	4.39%	4.40%	4728
	ช่วงที่ 3 (ลดลง 0.5 เท่า)	4.03%	4.43%	4.43%	4.16%	4.10%	11382
	ช่วงที่ 4 (ปกติ 1 เท่า)	3.66%	3.64%	3.64%	3.67%	3.64%	8276

ตารางที่ 7.2 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกกรณีโหลดที่ 2

ตัวควบคุม	สภาวะของ กระแสโหลด	ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่าย เฟสรวม		ค่า %THD ของ กระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส			จำนวน ครั้ง การ สวิตซ์ (ครั้ง)
		เฟส T	เฟส M	เฟส A	เฟส B	เฟส C	
	ก่อนการชดเชย						
	ปกติ (1 เท่า)	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	
	เพิ่มขึ้น 1.5 เท่า	22.60%	22.60%	22.60%	22.60%	22.60%	
	ลดลง 0.6 เท่า	21.32%	21.32%	21.32%	21.32%	21.32%	
	ภายหลังการชดเชย						
DBHCC	ช่วงที่ 1 (ปกติ 1 เท่า)	3.98%	4.00%	4.00%	4.00%	3.96%	6908
	ช่วงที่ 2 (ลดลง 0.6 เท่า)	5.29%	5.24%	5.24%	5.31%	5.24%	7052
	ช่วงที่ 3 (เพิ่มขึ้น 1.5 เท่า)	3.75%	3.77%	3.77%	3.75%	3.77%	6768
	ช่วงที่ 4 (ปกติ 1 เท่า)	3.98%	4.00%	4.00%	4.00%	3.96%	6908
ADBHCC	ช่วงที่ 1 (ปกติ 1 เท่า)	3.98%	4.00%	4.00%	4.00%	3.96%	6908
	ช่วงที่ 2 (ลดลง 0.6 เท่า)	4.09%	4.09%	4.09%	4.09%	4.09%	9720
	ช่วงที่ 3 (เพิ่มขึ้น 1.5 เท่า)	4.03%	4.19%	4.19%	4.07%	4.07%	5788
	ช่วงที่ 4 (ปกติ 1 เท่า)	4.72%	4.48%	4.48%	4.64%	4.68%	5942

จากผลการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมโดยใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปภายใต้กรณีโหลดที่ 1 และกรณีโหลดที่ 2 ดังตารางที่ 7.1 และ 7.2 ตามลำดับ พบว่า ในกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC จะมีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ไม่ดี โดยในบางสถานะของกระแสโหลดมีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการกำจัดฮาร์มอนิกเกิน 5% ซึ่งไม่เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 ในขณะที่กรณีใช้ตัวควบคุม ADBHCC จะมีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีกว่า โดยมีค่า %THD ของกระแสที่แหล่งจ่ายไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 ในทุกช่วงสถานะของกระแสโหลด นอกจากนี้ ตัวควบคุม ADBHCC ยังช่วยลดจำนวนครั้งการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที ซึ่งจะนำไปสู่การลดกำลังสูญเสียในการสวิตช์ที่อุปกรณ์ไอจีบีทีของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

7.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอกระบวนการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป และการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป เพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC ที่มีการปรับค่า HB โดยใช้ฟัชชีลอจิกที่ออกแบบไว้ในบทที่ 6 ภายใต้สภาวะการทำงานที่ใกล้เคียงในทางปฏิบัติ โดยผลการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องกับผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ภายในโปรแกรม Simulink/MATLAB ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ภายใต้สภาวะที่ใกล้เคียงกับในทางปฏิบัติวงจรรอกกำลังแอกทีฟร่วมกับระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ และระบบควบคุมกระแสชดเชยกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC และกรณีใช้ตัวควบคุม ADBHCC ยังคงสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะกรณีใช้ตัวควบคุม ADBHCC ซึ่งให้ค่า %THD ไม่เกิน 5% ในทุกช่วงของทั้งกรณีกระแสโหลดที่พิจารณาทดสอบเป็นไปตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอตัวควบคุมฮิสเตอร์ซีสแบบปรับตัวได้สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม โดยเริ่มต้นจากการศึกษาค้นคว้าปรัทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาซึ่งได้นำเสนอในบทที่ 2 ประกอบด้วย ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ในบทที่ 3 นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQF ซึ่งเป็นวิธีการผสมผสานระหว่างวิธี PQ แบบดั้งเดิม ร่วมกับการใช้หลักการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดวเลื่อน (SWFA) โดยได้รวมข้อดีของวิธี PQ และวิธี SWFA เข้าด้วยกัน ส่งผลให้วิธี PQF มีความถูกต้องและแม่นยำในการตรวจจับฮาร์มอนิกมากขึ้น และสามารถชดเชยกำลังรีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้ด้วย นอกจากนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างวิธี PQ ที่ใช้วงจรกรองแบบผ่านต่ำ (LPF) และวิธี PQF ที่ใช้การวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดวเลื่อน (SWFA) ในการแยกปริมาณฮาร์มอนิก โดยพบว่าวิธี PQF ให้สมรรถนะในการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี PQ โดยมีค่า %THD น้อยกว่าและมีค่าไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

ในบทที่ 4 นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟประกอบด้วยค่าตัวเหนี่ยวนำ วงจรกรอง (L_f) ที่เสนอโดย Ingram, David ME, and Simon D. Round. แรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) และตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) ที่เสนอโดย Thomas, et al. สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอได้รับการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม โดยการเปรียบเทียบพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่พิจารณากับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบอันดับสองมาตรฐาน นอกจากนี้ในส่วนการควบคุมกระแสชดเชยได้นำเสนอเปรียบเทียบวิธีการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบดั้งเดิมหนึ่งแถบ (SBHCC) และตัวควบคุมฮิสเตอร์ซิสแบบสองแถบ (DBHCC) โดยจากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้จากการออกแบบเมื่อทำงานร่วมกับตัวควบคุมกระแสชดเชยทั้งสองรูปแบบมีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก โดยค่า %THD ของกระแส จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสมีค่าน้อยกว่า 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 อย่างไรก็ตามการใช้ตัวควบคุม DBHCC จะมีจำนวนครั้งการสวิตช์ของของอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีทีที่น้อยกว่าการใช้ตัวควบคุม SBHCC ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้เลือกใช้ตัวควบคุม DBHCC สำหรับควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ในบทที่ 5 นำเสนอการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 4 ในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า การเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดรถไฟฟาส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิก โดยในบางสถานะของกระแสโหลดส่งผลให้สมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกต่ำลงและมีค่า %THD เกิน 5% ซึ่งไม่เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอการทดสอบปรับเปลี่ยนค่าแถบฮิสเตอร์ซิส (HB) ของตัวควบคุม DBHCC เพื่อศึกษาผลกระทบของต่อประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก จากการทดสอบ พบว่า ค่า HB มีผลโดยตรงต่อการควบคุมกระแสชดเชยและประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก ด้วยเหตุนี้ เพื่อรองรับกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจึงมีความจำเป็นที่ต้องออกแบบกลไกในการปรับค่า HB ของตัวควบคุม DBHCC

ในบทที่ 6 นำเสนอการออกแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) สำหรับปรับเปลี่ยนค่าแถบฮิสเตอร์ซิสของตัวควบคุม DBHCC โดยได้อธิบายทฤษฎีทางฟัซซีลอจิก ได้แก่ ฟัซซีเซต (Fuzzy set)

การดำเนินการทางฟัซซีเซต (Fuzzy set operations) ฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) ตัวแปรภาษา (Linguistic variables) และค่าเชิงภาษา (Linguistic value) กฎฟัซซี (Fuzzy rules) และการอนุมานฟัซซี (Fuzzy inference) พร้อมทั้งได้นำเสนอการทดสอบและออกแบบฟัซซีลอจิกสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ปรับค่า HB ของตัวควบคุม DBHCC ซึ่งประกอบด้วย การสอบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิก การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาพร้อมทั้งทดสอบจำนวนฟังก์ชันสมาชิก การออกแบบกฎฟัซซี การทดสอบวิธีการอนุมานฟัซซี โดยผลการทดสอบและการออกแบบได้เลือกใช้ค่าเชิงภาษาของอินพุต $\%E_{i_c,avg}/i_{C,peak}^*$ จำนวน 3 ค่า คือ “Zero” “Normal” และ “High” และมีค่าเชิงภาษาของเอาต์พุต K จำนวน 3 ค่า คือ “Dec” “Con” และ “Inc” และกฎฟัซซีจำนวน 3 กฎ เพื่อประโยชน์ในการลดความซับซ้อนของการประมวลผลในระบบฟัซซีลอจิก นอกจากนี้ ได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์การก่อกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมกรณีกระแสไหลดมีการเปลี่ยนแปลงภายในโปรแกรม Simulink/MATLAB เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม DBHCC ที่มีการปรับค่า HB ด้วย ฟัซซีลอจิก ซึ่งเรียกใหม่ว่าตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสสองแถบแบบปรับตัวได้ (ADBHCC) พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์กรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC แบบคงค่า HB โดยผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม ADBHCC ให้ประสิทธิภาพที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยและผลการกำจัด ฮาร์โมนิก โดยมีค่า $\%THD$ ไม่เกิน 5% ตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022 ในทุกกรณีโหลดที่พิจารณา ในขณะที่กรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC ยังคงมีค่า $\%THD$ เกิน 5% ในบางสถานะของกระแสไหล นอกจากนี้ ตัวควบคุม ADBHCC ยังช่วยลดจำนวนครั้งการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที ซึ่งจะนำไปสู่การช่วยลดกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที

สำหรับในบทที่ 7 นำเสนอการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (HIL) ระบบก่อกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป และการจำลองสถานการณ์การก่อกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป เพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม ADBHCC ที่ออกแบบไว้ในบทที่ 6 ภายใต้ลักษณะการทำงานที่มีความใกล้เคียงกับการทำงานในระบบฮาร์ดแวร์จริงมากยิ่งขึ้น โดยผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการก่อกำจัดฮาร์โมนิกที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ภายในโปรแกรม Simulink/MATLAB นำเสนอไว้ในบทที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ภายใต้สถานะที่ใกล้เคียงกับการทำงานจริง วงจรกรองกำลังแอกทีฟร่วมกับระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ และ

ระบบควบคุมกระแสชดเชยกรณีใช้ตัวควบคุม DBHCC และกรณีใช้ตัวควบคุม ADBHCC ยังคงสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะกรณีใช้ตัวควบคุม ADBHCC ซึ่งให้ค่า %THD ไม่เกิน 5% ในทุกช่วงของทั้งกรณีกระแสโหลดที่พิจารณาทดสอบเป็นไปตามกรอบมาตรฐาน IEEE Std. 519-2022

8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- 1) องค์ความรู้ทางปัญญาประดิษฐ์สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ส่งผลให้สมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น
- 2) ควรมีการพิจารณาการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีสภาวะของกระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้าไม่สมดุล (ขนาดของกระแสโหลดในเฟส T และเฟส M ไม่เท่ากัน) และกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เพื่อทดสอบและพัฒนาตัวควบคุมให้ดียิ่งขึ้น
- 3) เนื่องจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ ถูกใช้สำหรับกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกับกระแสโหลด อย่างไรก็ตาม ควรศึกษาวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมร่วมด้วย เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่อาจเกิดขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย
- 4) เนื่องด้วยขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (HIL) จึงยังไม่มีการพัฒนาและทดสอบด้วยระบบฮาร์ดแวร์จริงในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตาม เพื่อสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการใช้งานจริง ควรมีการดำเนินการสร้างฮาร์ดแวร์จริงซึ่งจะช่วยยืนยันความถูกต้องและเพิ่มความน่าเชื่อถือของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รายการอ้างอิง

- [1] Hasan Komurcugil. (2015). Double-band hysteresis current-controlled single-phase shunt active filter for switching frequency mitigation. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**. 69:131-140.
- [2] Sy-Ruen Huang and Bing-Nan Chen. (2002). Harmonic study of the Le Blanc transformer for Taiwan railway's electrification system. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 17(2):495-499.
- [3] Hirofumi Akagi, Yoshihira Kanazawa and Akira Nabae. (1984). Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. **IEEE Transactions on industry applications**. 3:625-630.
- [4] 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 Proceedings-Electric Power Applications**. 148(1):21-28.
- [5] Suksan Tiwarachakun, Kongpol Areerak and Kongpan Areerak. (2014). Instantaneous Power Theory with Fourier and Optimal Predictive Controller Design for Shunt Active Power Filter. **Modelling and Simulation in Engineering**. 1: 381760.
- [6] Wazir Muhammad Laghari, Mohammad Usman Baloch, Muhammad Abid Mengal and Syed Jalal Shah. (2014). Performance Analysis of Analog Butterworth Low Pass Filter as Compared to Chebyshev Type-I Filter, Chebyshev Type-II Filter. **Circuits and Systems**. 5(9):209-216.
- [7] D.M.E. Ingram and S.D. Round. (1997). A novel digital hysteresis current controller for an active power filter. **Proceedings of Second International Conference on Power Electronics and Drive Systems**. 2:744-749
- [8] Shailendra Kumar Jain and Pramod Agarwal. (2010). Design Simulation and Experimental Investigations, on a Shunt Active Power Filter for Harmonics, and Reactive Power Compensation. **Electric power components and systems**. 31(7):671-692.

- [9] Thierry Thomas, Kévork Haddad, Géza Joós and Alain Jaafari. (1998). Design and performance of active power filters. **IEEE Industry Applications Magazine**. 4(5):38-46.
- [10] David M. E. Ingram and Simon D. Round. (2010). A fully digital hysteresis current controller for an active power filter. **International Journal of Electronics**. 86(10): 1217-1232.
- [11] Innocent Omoyibo, Godspower Idode, Wisdom Omoregbee, Ozah Osemudiamen, Helen Osunde. (2025). Analysis of Switching Frequency Effects on THD and Switching Losses in a Filtered Single-Phase SPWM Inverter. **Iconic Research And Engineering Journals**. 9(5).
- [12] Allal El Moubarek Bouzid, Pierre Sicard, Ahmed Cheriti, Hicham Chaoui and Paul Makanga Koumba. (2017). Adaptive hysteresis current control of active power filters for power quality improvement. **IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)**.
- [13] E.H. Mamdani. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plants. **Proceedings of the institution of electrical engineers**. 121(12):1585-1588.
- [14] Fausto Cavallaro. (2015). A Takagi-Sugeno fuzzy inference system for developing a sustainability index of biomass. **Sustainability**. 7(9):12359-12371.
- [15] ทศพร ณรงค์ฤทธิ์. (2557). การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับตัวสำหรับวงจรกรองกำลัง แอ็กทีฟ แบบขนานในระบบสามเฟสสมดุล. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.



ภาคผนวก ก

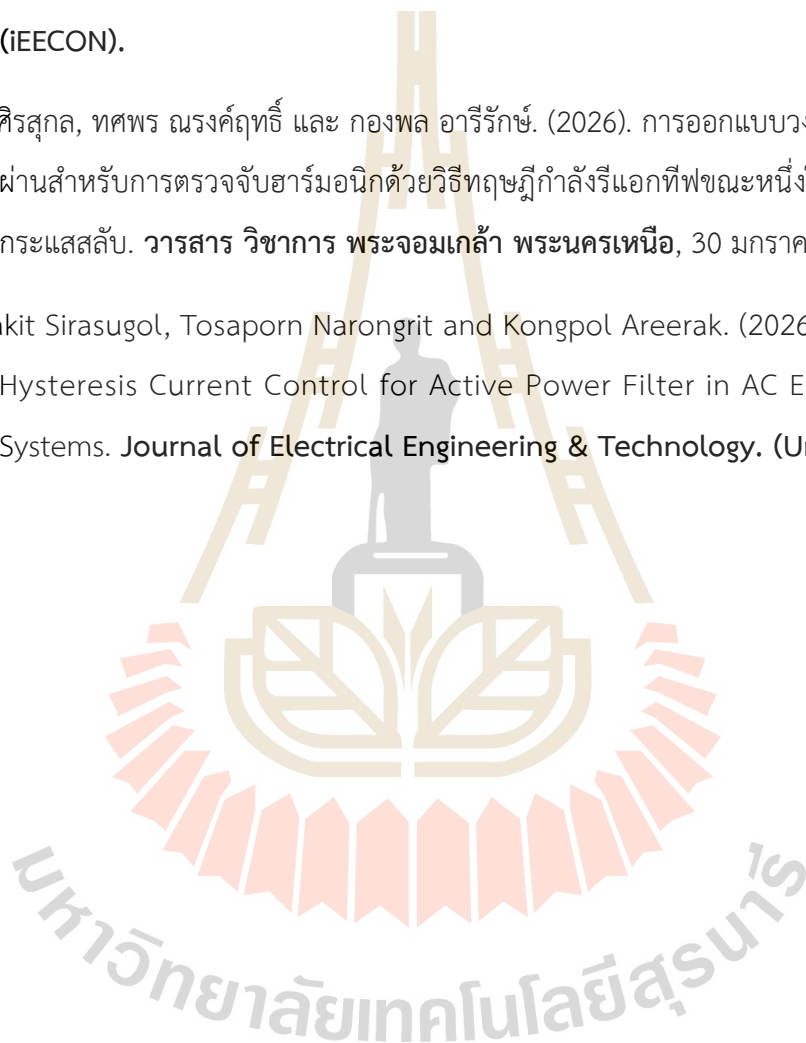
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Sooppakit Sirasugol, Twin Domkitpanya, Tosaporn Narongrit and Kongpol Areerak. (2024). Harmonic Elimination of AC Electric Railway Systems Using Shunt Active Power Filters. **2024 12th International Electrical Engineering Congress (IEEECON)**.

ศุภกฤต ศิริสุกุล, ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และ กองพล อารีรักษ์. (2026). การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ. วารสาร วิชาการ พระจอมเกล้า พระนครเหนือ, 30 มกราคม 2569 (ตอบรับ)

Sooppakit Sirasugol, Tosaporn Narongrit and Kongpol Areerak. (2026). Double Band Hysteresis Current Control for Active Power Filter in AC Electric Railway Systems. **Journal of Electrical Engineering & Technology**. (Under review)



ประวัติผู้เขียน

นายสุภกฤต ศิริสุกุล เกิดเมื่อวันที่ 18 เมษายน พ.ศ. 2544 เกิดที่อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบุญวัฒนา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2566 และปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนการศึกษา กิตติบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

