

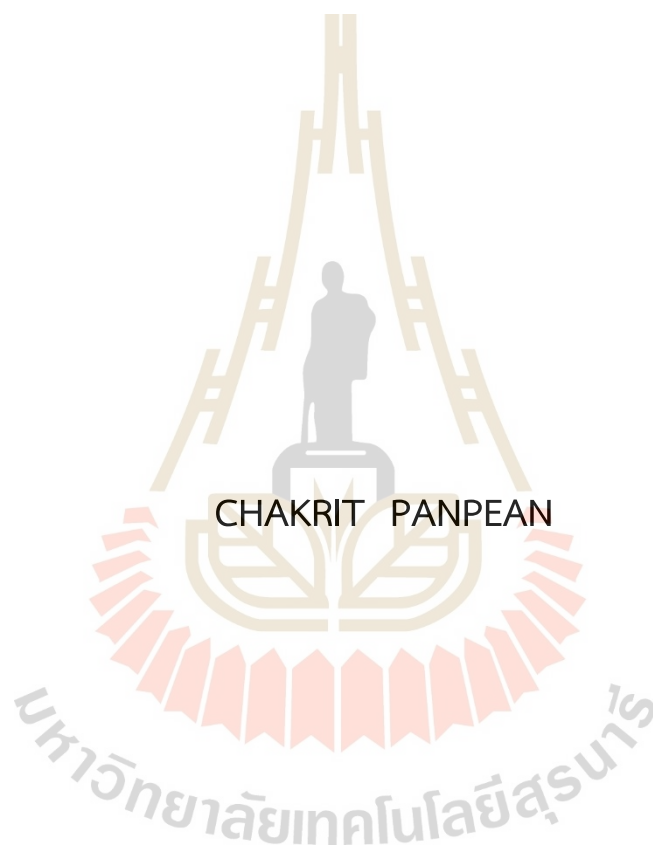
การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้า
โดยใช้การควบคุมกระแสแบบปรับตัว



นายชาคริต ปานแป้น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

POWER QUALITY IMPROVEMENT FOR ELECTRIC RAILWAY
SYSTEMS USING ADAPTIVE CURRENT CONTROL

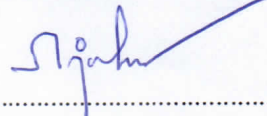


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2021

การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้า
โดยใช้การควบคุมกระแสแบบปรับตัว

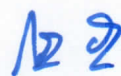
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.กมล อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.กิติ อรรถกัจจมงคล)

กรรมการ



(รศ. ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ)

กรรมการ



(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชาคริต ปานแป้น : การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้าโดยใช้การควบคุม
กระแสแบบปรับตัว (POWER QUALITY IMPROVEMENT FOR ELECTRIC RAILWAY
SYSTEMS USING ADAPTIVE CURRENT CONTROL) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์, 291 หน้า

คำสำคัญ : การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า/ระบบรางไฟฟ้า/การควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง
ร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยตัว
ควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสำหรับการปรับปรุงคุณภาพ
กระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นการกำจัดฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และ
การชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีซิงโครนัส
แบบเพิ่มสมรรถนะได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจร
รองกำลังแอกทีฟให้ดียิ่งขึ้น โดยการประยุกต์ใช้งานร่วมกันระหว่างการตรวจจับซิงโครนัส อัลกอริทึม
การตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวก และหลักการวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน
ค่าพารามิเตอร์และพิกัดของวงจรรองกำลังแอกทีฟได้รับการออกแบบให้เหมาะสมกับระบบราง
ไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า

พฤติกรรมการใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงในระบบรางไฟฟ้ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลง
กระแสโหลดแบบผสมผสานอย่างทันทีทันใด ส่งผลให้ปริมาณฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ามีการ
เปลี่ยนแปลง การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าจำเป็นต้องอาศัยระบบ
ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่สามารถปรับตัวได้ตามลักษณะการใช้งานโหลด
รถไฟความเร็วสูงในระบบรางไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานอย่างทันทีทันใด
ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดู
เลตเชิงปรับตัว ซึ่งได้รับการพัฒนามาจากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต
โดยการนำตัวควบคุมฟuzzy logic มาใช้เป็นกลไกในการปรับค่าอัตราขยายที่เหมาะสมให้กับตัวควบคุม
แบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต มาใช้ในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอง
กำลังแอกทีฟ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวได้รับการยืนยัน
สมรรถนะด้านการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า และด้านการการควบคุมกระแสชดเชยกับระบบ
ทดสอบที่มีการจ่ายโหลดของระบบรางไฟฟ้าในลักษณะสมดุล ไม่สมดุล และโหลดแบบผสมผสาน โดย
อาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป ซึ่งพบว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้
แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวที่พัฒนาขึ้นให้ค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพ
กระแสไฟฟ้าและการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีกว่าจากตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้
แบบจำลอง และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ในทุกสภาวะการจ่าย
โหลดของระบบรางไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ

นอกจากนี้ ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟในห้องปฏิบัติการ ซึ่งทำการปรับลดพิกัดจากระบบแรงไฟฟ้า และใช้วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทานเป็นโหลดของชุดทดสอบ ชุดทดสอบดังกล่าวได้รับการทดสอบกับระบบโหลดสมดุล และโหลดไม่สมดุล ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวให้สมรรถนะด้านการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต โดยสามารถพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าภายหลังการชดเชยที่อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า.....
 ปีการศึกษา 2564.....

ลายมือชื่อนักศึกษา ชวสิทธิ์ อภินันท์.....
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อ.อ......

CHAKRIT PANPEAN : POWER QUALITY IMPROVEMENT FOR ELECTRIC RAILWAY SYSTEMS USING ADAPTIVE CURRENT CONTROL. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPOL AREERAK, Ph.D., 291 PP.

Keyword : Power quality improvement/Electric railway systems/ Adaptive modulated model predictive control

This thesis proposes the compensating current control cooperated with active power filter (APF) using adaptive modulated model predictive control (AM²PC) for a power quality improvement in electric railway systems. This thesis focuses on the harmonic elimination, power factor correction, and load balancing of the source currents for power quality improvement. The enhanced synchronous detection (ESD) was developed from the synchronous detection (SD) by including the advantages of the SD method, the positive sequence voltage detector (PSVD), and the sliding window Fourier analysis (SWFA) to improve the performance of reference current calculation for APF. The parameters and rating of APF have been designed to be suitable for electric railway systems for power quality improvement.

The behavior of electric multiple unit high-speed train (EMU high-speed train) load is dynamically varied, which significantly affects the harmonic quantity in electric railway systems. Thus, an adaptive compensating current control system is necessary for power quality improvement. Consequently, this thesis proposes the compensating current control of the APF using an AM²PC. The AM²PC was developed from the modulated model predictive control (M²PC) by using a fuzzy logic controller to adjust the appropriate gain of the M²PC. The performance of power quality improvement and compensating current control of the AM²PC was tested using hardware in the loop (HIL) simulation. The simulation results show that the power quality improvement and compensating current control with the AM²PC can provide better results compared with the PI controller, model predictive control (MPC), and M²PC for testing at any electric railway system load conditions.

Finally, the hardware implementation of the power quality improvement with APF is also proposed. A single-phase rectifier with RL load acts as the nonlinear load in the system. This is the simplify system for power quality improvement in electric railway system in laboratory. The balanced and unbalanced loads are considered for testing in laboratory. For the experimental results, the proposed AM²PC can provide the better results in term of power quality improvement compared with the PI

controller, MPC, and M²PC. This can be considered by the performance indices for power quality improvement that follow the IEEE standard 519-2014.



School of Electrical Engineering..
Academic Year 2021.....

Student's Signature *รศ.ดร. อภินันท์*
Advisor's Signature *122*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ การดำเนินการวิจัย และเงินทุนสนับสนุนการวิจัย จากบุคคล กลุ่มบุคคล และหน่วยงานต่าง ๆ ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้มอบโอกาสทางการศึกษา ได้ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ และให้คำแนะนำต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเป็นแบบอย่างในการดำเนินชีวิตที่ดีแก่ผู้วิจัยเสมอมา

Prof. Serhiy Bozhko และ Dr. Seang Shen Yeoh อาจารย์ที่ปรึกษาขณะทำวิจัย ณ ประเทศอังกฤษ ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ และให้คำแนะนำต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพันธ์ อารีรักษ์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และอาจารย์ ดร. พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์ ที่ได้คำแนะนำทางด้านวิชาการ ช่วยตรวจทานและแก้ไขบทความวิจัยให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

อาจารย์จิรวรรณ หอมจันทร์ ที่ได้ให้การช่วยเหลือในการเก็บผลการทดสอบ ถ่ายทำวิดีโอผลการทดสอบ และที่สำคัญอย่างยิ่งได้เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยนอตติงแฮม

สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้มอบทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) เลขที่ PHD/0019/2560

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ครู อาจารย์ ทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านต่าง ๆ ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน และบุคคลที่สำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเสมอมา

ชาคริต ปานแป้น

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป	ฏ

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.5 ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.7 การจัดรูปเล่มรายงาน.....	6
2 ปรัชญารวบรวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 บทนำ.....	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า	9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า	13
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณอ้างอิงสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	20
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชย และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟ	26
2.6 สรุป.....	33
3 โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า.....	35
3.1 บทนำ.....	35
3.2 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้า.....	35
3.2.1 การวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้า	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 การจำลองสถานการณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สำหรับขับเคลื่อนรถไฟ.....	48
3.3 โหลดของระบบรางไฟฟ้า	52
3.4 สรุป.....	56
4 การคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้า.....	57
4.1 บทนำ.....	57
4.2 การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส.....	58
4.3 การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ	62
4.3.1 การตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวก	63
4.3.2 การวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน.....	69
4.4 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์แวร์ในรูป	72
4.5 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า	73
4.5.1 ระบบทดสอบที่หนึ่ง.....	75
4.5.2 ระบบทดสอบที่สอง	77
4.5.3 ระบบทดสอบที่สาม	77
4.5.4 ระบบทดสอบที่สี่.....	77
4.6 การทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิง	81
4.6.1 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิง สำหรับระบบทดสอบที่หนึ่ง	81
4.6.2 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิง สำหรับระบบทดสอบที่สอง.....	85
4.6.3 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิง สำหรับระบบทดสอบที่สาม.....	89
4.6.4 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิง สำหรับระบบทดสอบที่สี่.....	94
4.7 สรุป.....	97
5 การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุม	99
5.1 บทนำ.....	99
5.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ในระบบรางไฟฟ้า.....	99

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3	การออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟ	101
5.3.1	การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ.....	102
5.3.2	การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ	104
5.3.3	การออกแบบพิกัดของวงจรรอกำลังแอกทีฟ.....	107
5.4	การออกแบบระบบควบคุมสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟ	108
5.4.1	การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ	108
5.4.2	การออกแบบโครงสร้างของระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง	114
5.5	การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ในระบบรางไฟฟ้าของวงจรรอกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอ.....	117
5.5.1	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมพีไอ กรณีโหลดสมดุล	118
5.5.2	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมพีไอ กรณีโหลดไม่สมดุล	123
5.6	สรุป.....	128
6	ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง.....	129
6.1	บทนำ.....	129
6.2	ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง	130
6.2.1	การทำนายกระแสอ้างอิงในอนาคต	132
6.2.2	การทำนายกระแสชดเชยในอนาคต	133
6.2.3	การคำนวณฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุด.....	136
6.3	การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า ของวงจรรอกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง	138
6.3.1	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม MPC กรณีโหลดสมดุล	139
6.3.2	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม MPC กรณีโหลดไม่สมดุล	146
6.4	สรุป.....	152
7	ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนาย ที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต.....	153

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.1	บทนำ.....	153
7.2	ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต	153
7.2.1	การทำนายกระแสอ้างอิงในอนาคตสำหรับตัวควบคุม M^2PC	155
7.2.2	การทำนายกระแสชดเชยในอนาคตสำหรับตัวควบคุม M^2PC	156
7.2.3	การคำนวณช่วงเวลาการสวิตช์	160
7.2.4	การหาฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุดสำหรับตัวควบคุมแบบทำนาย ที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต.....	161
7.3	การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต.....	164
7.3.1	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีโหลดสมดุล.....	166
7.3.2	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีโหลดไม่สมดุล.....	172
7.3.3	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลด แบบผสมผสาน	177
7.4	สรุป.....	185
8	ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว	186
8.1	บทนำ.....	186
8.2	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ที่มีผลต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชย	186
8.3	การออกแบบตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต เชิงปรับตัว.....	188
8.3.1	รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก.....	189
8.3.2	ค่าเชิงภาษาและตัวแปรเชิงภาษา.....	191
8.3.3	การออกแบบกฎของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก.....	193
8.3.4	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก	194
8.3.5	การอนุมานฟัซซีลอจิก	198

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

8.4	การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว	201
8.4.1	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม AM ² PC กรณีโหลดสมดุล	203
8.4.2	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม AM ² PC กรณีโหลดไม่สมดุล	210
8.4.3	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม AM ² PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลด แบบผสมผสาน	215
8.5	สรุป.....	223
9	ชุดทดสอบและผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ	225
9.1	บทนำ.....	225
9.2	การสร้างชุดทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ.....	225
9.2.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา	225
9.2.2	วงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	230
9.2.3	ระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ.....	233
9.3	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า กรณีกระแสโหลดที่พิจารณา	242
9.3.1	ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ ด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสโหลดที่พิจารณา	243
9.3.2	ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ ด้วยตัวควบคุม MPC กรณีกระแสโหลดที่พิจารณา.....	245
9.3.3	ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ ด้วยตัวควบคุม M ² PC กรณีกระแสโหลดที่พิจารณา	247
9.4	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า กรณีกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา	250
9.4.1	ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ ด้วยตัวควบคุม M ² PC กรณีกระแสโหลดเปลี่ยนแปลง จากกระแสโหลดที่พิจารณา.....	252

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

9.4.2 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ ด้วยตัวควบคุม AM ² PC กรณีกระแสไหลเปลี่ยนแปลง จากกระแสไหลที่พิจารณา.....	256
9.5 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า กรณีไหลไม่สมดุล.....	261
9.6 สรุป.....	268
10 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	269
10.1 สรุป.....	269
10.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนางานวิจัยในอนาคต	273
รายการอ้างอิง	275
ภาคผนวก.....	289
ประวัติผู้เขียน.....	291

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า..... 9
2.2	โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้าในแต่ละประเทศ 12
2.3	ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า..... 13
2.4	การเปรียบเทียบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า 18
2.5	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้า..... 19
2.6	การเปรียบเทียบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า 19
2.7	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวิธีการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า..... 20
2.8	ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ 21
2.9	ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ 27
2.10	ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ 31
3.1	การเปรียบเทียบผลจากการจำลองสถานการณ์และจากการคำนวณ..... 51
3.2	ข้อมูลกระแสไหลของระบบรางไฟฟ้า 53
3.3	ดัชนีชี้วัดคุณภาพกระแสไฟฟ้า 56
4.1	ปริมาณฮาร์มอนิกที่ปรากฏในค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง 59
4.2	การเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่หนึ่ง..... 84
4.3	การเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่สอง 86
4.4	การเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่สาม 93
4.5	การเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่สี่ 97
5.1	ค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมพีไอ..... 117
5.2	ค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีไหลสมดุลด้วยตัวควบคุมพีไอ 123
5.3	ค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีไหลไม่สมดุล ด้วยตัวควบคุมพีไอ..... 127
6.1	สัมประสิทธิ์ของลากรานจ์แต่ละอันดับในกรณีการทำนายในรอบที่ $n+2$ 133
6.2	สถานะการสวิตช์ของ IGBT สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันหนึ่งเฟส..... 135

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.3 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดสมดุล ระหว่างตัวควบคุม PI และตัวควบคุม MPC.....	144
6.4 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุล ระหว่างตัวควบคุม PI และตัวควบคุม MPC.....	150
7.1 สัมประสิทธิ์ของลากรานจ์แต่ละอันดับในกรณีการทำนายในรอบที่ $n+1$	159
7.2 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดสมดุล ระหว่างตัวควบคุม PI ตัวควบคุม MPC และตัวควบคุม M^2PC	170
7.3 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุล ระหว่างตัวควบคุม PI ตัวควบคุม MPC และตัวควบคุม M^2PC	177
7.4 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสาน	182
8.1 ค่าเชิงภาษาและตัวแปรเชิงภาษาของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก	192
8.2 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก	198
8.3 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดสมดุล ระหว่างตัวควบคุม M^2PC และตัวควบคุม AM^2PC	209
8.4 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุล ระหว่างตัวควบคุม M^2PC และตัวควบคุม AM^2PC	215
8.5 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีการเปลี่ยนแปลง กระแสโหลดแบบผสมผสานระหว่างตัวควบคุม M^2PC และตัวควบคุม AM^2PC	223
9.1 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบโหลด สมดุลในกรณีกระแสโหลดที่พิจารณา	249
9.2 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบโหลด สมดุลในกรณีกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา	261
9.3 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุม AM^2PC กรณีโหลดไม่สมดุล	267

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้า 3
2.1	ภาพรวมพิธีศันวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 34
3.1	ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้า 36
3.2	โครงสร้างของหม้อแปลงเลอบลองค์ 37
3.3	วงจรสมมูลเฟส m ของหม้อแปลงเลอบลองค์ 38
3.4	วงจรสมมูลเฟส t ของหม้อแปลงเลอบลองค์ 40
3.5	การจำลองสถานการณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 49
3.6	ผลการจำลองสถานการณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้า 50
3.7	รูปสัญญาณกระแสโหดและกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา 54
4.1	ไดอะแกรมการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส 58
4.2	สเปกตรัมปริมาณฮาร์โมนิกที่ปรากฏในค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ 60
4.3	ไดอะแกรมการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ 63
4.4	ไดอะแกรมการตรวจจับแรงดันที่จุด PCC ด้วยวิธี PSVD สำหรับระบบรางไฟฟ้า 64
4.5	เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันไฟฟ้าบนแกนแอลฟา-เบตา 64
4.6	โครงสร้างการทำงานของวงจรเฟสล็อกแบบเชิงเส้น 65
4.7	ผลการทดสอบวงจรเฟสล็อกแบบเชิงเส้น 67
4.8	การแยกปริมาณทางไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน 70
4.9	การแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสัญญาณตรงและสัญญาณสลับ 70
4.10	การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์และค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งที่ความถี่มูลฐาน 72
4.11	การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับเทคนิคฮาร์แวร์ 73
4.12	ระบบทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ 75
4.13	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบทดสอบที่หนึ่ง 76
4.14	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบทดสอบที่สอง 78
4.15	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบทดสอบที่สาม 79
4.16	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบทดสอบที่สี่ 80
4.17	ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี SD สำหรับระบบทดสอบที่หนึ่ง 82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี ESD สำหรับระบบทดสอบที่หนึ่ง.....	83
4.19 สมรรถนะการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี SD และ ESD ในระบบทดสอบที่หนึ่ง	85
4.20 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี SD สำหรับระบบทดสอบที่สอง	87
4.21 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี ESD สำหรับระบบทดสอบที่สอง	88
4.22 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี SD และวิธี ESD.....	89
4.23 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี SD สำหรับระบบทดสอบที่สาม	91
4.24 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี ESD สำหรับระบบทดสอบที่สาม.....	92
4.25 สมรรถนะการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้า p ด้วยวิธี SD และ ESD ในระบบทดสอบที่สอง.....	93
4.26 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี SD สำหรับระบบทดสอบที่สี่	95
4.27 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี ESD สำหรับระบบทดสอบที่สี่	96
5.1 โครงสร้างของวงจรรองกำลังแยกที่สำหรับระบบรางไฟฟ้า	100
5.2 ผลรวมกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสัญญาณสลับของโหลดรถไฟฟากรณีโหลดสมดุล	105
5.3 ผลรวมกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสัญญาณสลับของโหลดรถไฟฟากรณีโหลดไม่สมดุล	105
5.4 โครงสร้างของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ	110
5.5 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ	111
5.6 ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการสวิตช์ PWM	113
5.7 การสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยเทคนิคการสวิตช์ PWM.....	113
5.8 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ.....	115
5.9 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ.....	116
5.10 โครงสร้างระบบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมพีไอ	118
5.11 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสโหลดที่พิจารณา	119

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลลดลง	121
5.13 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้น	122
5.14 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมพีไอ กรณีไหลไม่สมดุลเฟส m	125
5.15 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมพีไอ กรณีไหลไม่สมดุลเฟส t	126
6.1 ไดอะแกรมการควบคุมด้วย MPC สำหรับระบบควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	130
6.2 หลักการทำงานของตัวควบคุม MPC	131
6.3 โครงสร้างการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแยกที่ฟด้วยตัวควบคุม MPC	132
6.4 แผนภาพการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม MPC ในหนึ่งช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง	137
6.5 โครงสร้างระบบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุม MPC สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย	140
6.6 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม MPC กรณีกระแสไหลที่พิจารณา	141
6.7 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม MPC กรณีกระแสไหลลดลง	142
6.8 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม MPC กรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้น	143
6.9 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุม MPC สำหรับระบบไหลสมดุล	146
6.10 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม MPC กรณีไหลไม่สมดุลเฟส m	148
6.11 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม MPC กรณีไหลไม่สมดุลเฟส t	149
6.12 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุม MPC สำหรับระบบไหลไม่สมดุล	151
7.1 สัญญาณการสวิตช์และสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุม MPC และตัวควบคุม M^2PC	154
7.2 โครงสร้างการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแยกที่ฟด้วยตัวควบคุม M^2PC	155

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.3	รูปแบบการสวิตช์ของไอจีบีที.....156
7.4	สถานะเวกเตอร์แรงดันในแต่ละเซกเตอร์.....157
7.5	แผนภาพการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม M^2PC ในหนึ่งช่วงเวลาการสุมตัวอย่าง.....163
7.6	โครงสร้างระบบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุม M^2PC สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย.....165
7.7	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีกระแสโหลดที่พิจารณา.....167
7.8	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีกระแสโหลดลดลง.....168
7.9	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีกระแสโหลดเพิ่มขึ้น.....169
7.10	การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุม MPC และตัวควบคุม M^2PC สำหรับระบบโหลดสมดุล.....172
7.11	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m174
7.12	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t175
7.13	การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุม MPC และตัวควบคุม M^2PC สำหรับระบบโหลดไม่สมดุล.....176
7.14	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานในช่วงที่ 1.....179
7.15	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานในช่วงที่ 2.....180
7.16	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานในช่วงที่ 3.....181
7.17	สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยในช่วงกระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูง กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานช่วงที่ 2.....183
7.18	สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยในช่วงกระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูง กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานช่วงที่ 3.....184

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.1	โครงสร้างการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแยกทีฟด้วยตัวควบคุม AM ² PC189
8.2	ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสามเหลี่ยม.....190
8.3	ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปแท่งตรงโทน.....190
8.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน $v_{INV(m,t)}$ และกระแส $i_{C(m,t)}$191
8.5	ฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต $e_{iC(m,t)}$193
8.6	ฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต $K_{(m,t)}$193
8.7	ข้อมูลสำหรับการพิจารณาค่า E_{max}195
8.8	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต $e_{iC(m,t)}$195
8.9	ข้อมูลสำหรับการพิจารณาขอบเขตของค่าอัตราขยาย $K_{(m,t)}$197
8.10	การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของเอาต์พุต $K_{(m,t)}$198
8.11	การอนุมานฟัซซีด้วยวิธี Takagi-Sugeno200
8.12	การรวมกฎของฟัซซีด้วยการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno200
8.13	ผลเฉลยของการทำดีฟัซซีด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย.....201
8.14	โครงสร้างระบบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุม AM ² PC สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย.....202
8.15	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM ² PC กรณีกระแสไหลดที่พิจารณา.....204
8.16	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM ² PC กรณีกระแสไหลลดลง.....205
8.17	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM ² PC กรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้น.....206
8.18	การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างตัวควบคุม M ² PC และตัวควบคุม AM ² PC สำหรับระบบโหลดสมดุล.....208
8.19	ผลการปรับค่า K_m และ K_t ที่เหมาะสมด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับระบบโหลดสมดุล.....209
8.20	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM ² PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m211
8.21	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM ² PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t212

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.22	การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างตัวควบคุม M^2PC และตัวควบคุม AM^2PC สำหรับระบบโหลดไม่สมดุล213
8.23	ผลการปรับค่า K_m และ K_i ที่เหมาะสมด้วยตัวควบคุมฟuzzyลอจิก สำหรับระบบโหลดไม่สมดุล214
8.24	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM^2PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานในช่วงที่ 1216
8.25	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM^2PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานในช่วงที่ 2217
8.26	ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM^2PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานในช่วงที่ 3218
8.27	การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างตัวควบคุม M^2PC และตัวควบคุม AM^2PC สำหรับระบบโหลดแบบผสมผสาน.....220
8.28	ผลการปรับค่า K_m และ K_i ที่เหมาะสมด้วยตัวควบคุมฟuzzyลอจิก สำหรับระบบโหลดแบบผสมผสาน221
8.29	สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยในช่วงกระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูง กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสาน222
9.1	โครงสร้างชุดทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ226
9.2	แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบคงค่าแรงดันไฟฟ้า227
9.3	หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้.....227
9.4	หม้อแปลงแยกกราวด์228
9.5	หม้อแปลงเลอบลองค์228
9.6	วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส.....229
9.7	วเหนี่ยวนำขนาด 200 mH229
9.8	ชุดหลอดไฟ.....229
9.9	ไอจีบีทีมอดูล รุ่น Fuji 6MBP50RA060-55.....230
9.10	ไดโอดแกรมของไอจีบีทีมอดูล รุ่น Fuji 6MBP50RA060-55.....231
9.11	ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....231
9.12	ตัวต้านทานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....232
9.13	หม้อแปลงเชิงเส้น232
9.14	ตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....233
9.15	หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดแรงดัน v_{PCCm} และ v_{PCCl}234

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.16	ตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้ารุ่น LEM HX15-P234
9.17	ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงรุ่น LEM LV-25P235
9.18	วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....235
9.19	วงจรปรุงแต่งสัญญาณ.....236
9.20	โครงสร้างสถาปัตยกรรมบอร์ด eZdsp TM F28335.....237
9.21	ไดอะแกรมการโปรแกรมสำหรับระบบควบคุมของวงจรองกำลังแอกทีฟ238
9.22	เวลาในหนึ่งรอบการคำนวณของโปรแกรมสำหรับระบบควบคุม ของวงจรองกำลังแอกทีฟ238
9.23	การเชื่อมต่อ analog expansion และ expansion interface ของบอร์ด eZdsp TM F28335.....239
9.24	ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกรุ่น Burr-Brown DAC712P239
9.25	วงจรสร้างสัญญาณพหุรูปสามเหลี่ยม.....240
9.26	วงจรเปรียบเทียบสัญญาณและวงจรมีเสถียร.....240
9.27	วงจรวงจรขั้วเกิด241
9.28	ชุดต้นแบบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้า241
9.29	รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากรณีกระแสไหลดที่พิจารณา242
9.30	ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมพีไอ กรณีกระแสไหลดที่พิจารณา243
9.31	การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลดที่พิจารณา244
9.32	ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลดที่พิจารณา โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ245
9.33	ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม MPC กรณีกระแสไหลดที่พิจารณา246
9.34	การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม MPC กรณีกระแสไหลดที่พิจารณา247
9.35	ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลดที่พิจารณา โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม MPC.....247
9.36	ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีกระแสไหลดที่พิจารณา248
9.37	การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม M^2PC กรณีกระแสไหลดที่พิจารณา.....249
9.38	ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลดที่พิจารณา โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม M^2PC249

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.39 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากรณีกระแสไหลลดลง	251
9.40 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้น	252
9.41 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีกระแสไหลลดลง	253
9.42 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้น	254
9.43 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม M^2PC กรณีกระแสไหลลดลง.....	255
9.44 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม M^2PC กรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้น.....	255
9.45 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลลดลง โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม M^2PC	256
9.46 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้น โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม M^2PC	256
9.47 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM^2PC กรณีกระแสไหลลดลง	257
9.48 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM^2PC กรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้น	258
9.49 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม AM^2PC กรณีกระแสไหลลดลง.....	259
9.50 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม AM^2PC กรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้น	259
9.51 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลลดลง โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม AM^2PC	260
9.52 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้น โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม AM^2PC	260
9.53 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m	262
9.54 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t	263
9.55 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM^2PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m	264
9.56 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM^2PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t	265
9.57 ผลการชดเชยกระแสกรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m ให้กลับสู่สถานะสมดุล	265
9.58 ผลการชดเชยกระแสกรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t ให้กลับสู่สถานะสมดุล.....	266
9.59 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม AM^2PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m	266

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
9.60 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม AM ² PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t	266
9.61 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม AM ² PC.....	267
9.62 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม AM ² PC.....	267



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

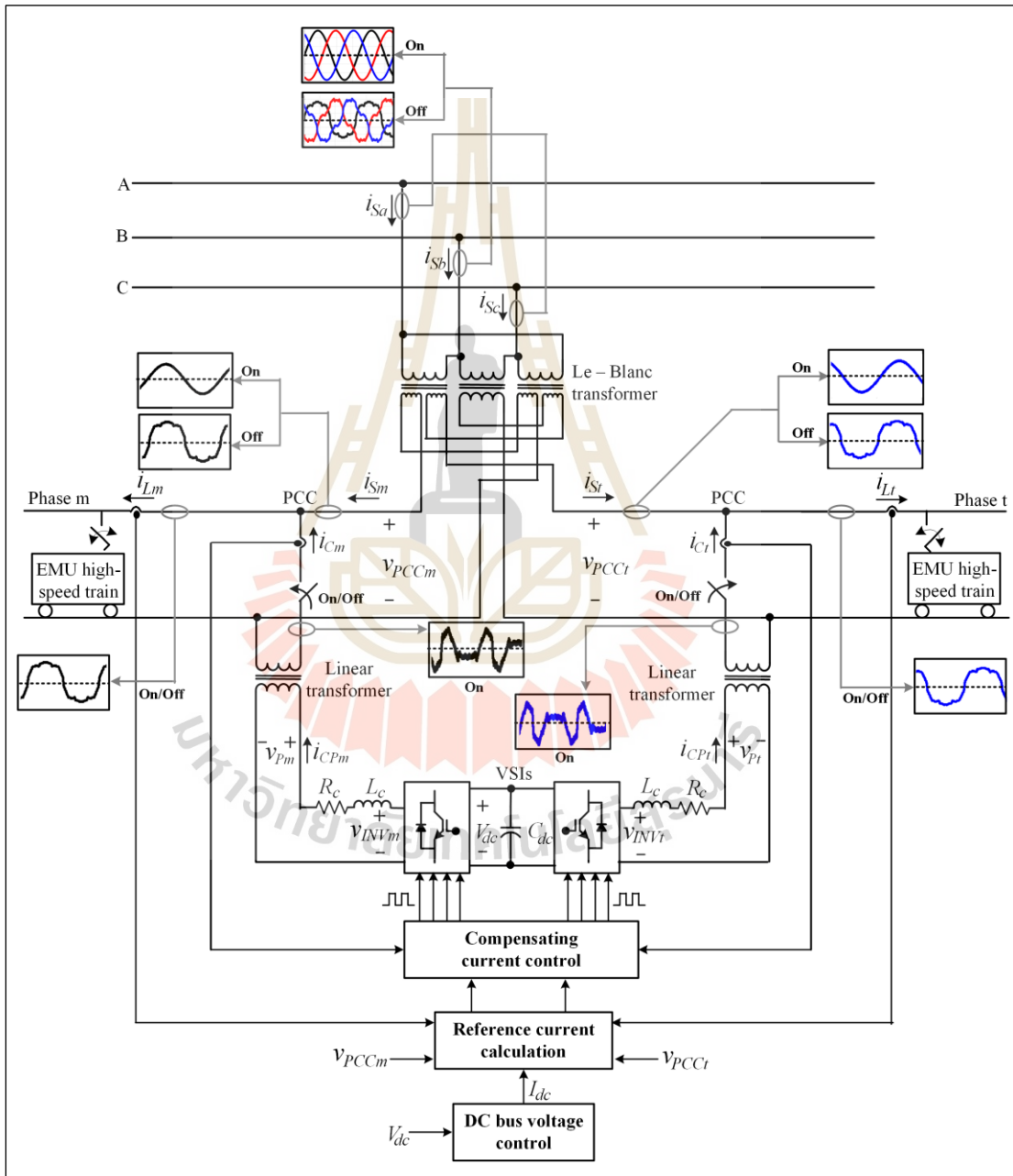
การขนส่งทางระบบรางสามารถขนส่งผู้โดยสารและสินค้าได้เป็นจำนวนมากภายในระยะเวลาอันสั้น ถือเป็นระบบขนส่งที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจ อีกทั้ง ประเทศไทย มีแผนที่จะดำเนินการสร้างระบบขนส่งทางรางให้ครอบคลุมทั่วประเทศ ตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจ ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี ซึ่งการสร้างระบบขนส่งทางรางส่วนหนึ่งเป็นระบบรางไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อน รถไฟฟ้า ดังนั้น การพัฒนาองค์ความรู้ด้านระบบรางไฟฟ้าด้วยงานวิจัยจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดย ระบบรางไฟฟ้ามีสองส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้า และโหลด ของระบบรางไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า “รถไฟฟ้า” ซึ่งประกอบด้วย วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเอซีเป็นดีซี วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นเอซี ชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส และ อุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่าง ๆ ภายในตู้โดยสาร เป็นต้น การใช้งานโหลดรถไฟฟ้าของระบบราง ไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิก ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ และกระแสโหลดไม่สมดุล ซึ่งปัญหา เหล่านี้ส่งผลกระทบต่อระบบรางไฟฟ้า เช่น ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า (L. Weijun, et al., 2016) (W. Song, et al., 2019) เกิดการรบกวนต่อระบบสื่อสารและระบบ อาณัติสัญญาณสำหรับควบคุมรถไฟ (F. Foley, 2011) (H. Zhengyou, et al., 2016) เกิดปัญหา การรับแรงดันไฟฟ้าที่เกินรับไฟฟ้า (L. Guo, et al., 2015) (Y. Song, et al., 2020) เกิดการ รบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าขณะใช้งาน (C. Charalambous, et al., 2018) อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าทำงานผิดพลาดและทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ มีอายุการใช้งานที่สั้นลง (IEEE, 1993) (W. Brumsickle, et al., 2005) การแก้ไขปัญหเหล่านี้ จึงเป็นประเด็นที่สำคัญสำหรับ งานวิจัยทางการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า โดยวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับการ แก้ปัญหาดังกล่าวในระบบรางไฟฟ้า คือ การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Z. Shu, et al., 2011) (A. Luo, et al., 2011) (S. Gazafudi, et al., 2015) เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถกำจัดกระแส ฮาร์มอนิก ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และชดเชยกระแสกรณีโหลดไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุง ค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลด้วยวงจรกรอง กำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้า

จากการศึกษาเบื้องต้น พบว่า ระบบรางไฟฟ้าที่มีระยะทางการเดินรถระยะไกล นิยมใช้ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระแสสลับชนิดสามเฟสเหนือศีรษะที่รับแรงดันไฟฟ้าสามเฟสจากระบบส่ง จ่ายกำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเชื่อมต่อทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลัง (traction transformer) ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้า เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าและแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็น แรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวม (co-phase) เชื่อมต่อกับโหลดรถไฟความเร็วสูงชนิดหลายหน่วย (Electric

Multiple Unit high-speed train: EMU high-speed train) ดังนั้น ระบบไฟฟ้าทางด้านทฤษฎีของหม้อแปลงกำลัง สามารถเรียกได้ว่า “ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ” การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าพิจารณาสองส่วน คือ การปรับปรุงคุณภาพแรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสรวม (แรงดันไฟฟ้าทางด้านทฤษฎีของหม้อแปลงกำลัง) ให้มีลักษณะสมดุล ซึ่งส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับ การเชื่อมต่อหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ และส่วนที่สอง เป็นการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสามเฟส (กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลัง) ให้มีรูปสัญญาณใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์และมีลักษณะสมดุล ซึ่งทำได้โดยการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าทางด้านเฟสรวม (กระแสไฟฟ้าทางด้านทฤษฎีของหม้อแปลงกำลัง) ให้มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์และสมดุล การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าที่ทำการพิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการเลือกใช้หม้อแปลงเลอบลองค์ (Le-Blanc transformer) เป็นหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ เนื่องจากหม้อแปลงดังกล่าว ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสรวมที่มีลักษณะสมดุล (G. Firat, et al., 2015) นอกจากนี้ ได้ทำการติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟทางด้านเฟสรวมเพื่อปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า ภาพรวมระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้แสดงได้ ดังรูปที่ 1.1

สมรรถนะที่ดีในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน ประกอบด้วย โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การคำนวณกระแสอ้างอิง ระบบควบคุมกระแสชดเชย และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง สำหรับในส่วนที่หนึ่ง คือ โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยไปยังจุดต่อร่วมของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างแบบอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบตัวเก็บประจุร่วม (Voltage Source Inverters: VSIs) จุดเด่นของโครงสร้างดังกล่าว คือ มีค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงที่น้อย มีต้นทุนต่ำ และมีประสิทธิภาพที่ดีในการฉีดกระแสชดเชย ส่วนที่สองเป็นการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ (Enhanced Synchronous Detection: ESD) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณกระแสอ้างอิง ที่นำเอาจุดเด่นของการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์ วินโดว์เลื่อน (M. El-Habrouk, et al., 2001) และการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน (H. Akag, et al., 2007) มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวิธีการตรวจจับซิงโครนัส (Synchronous Detection: SD) ที่ได้นำเสนอโดย Chen และคณะ ในปี ค.ศ. 1994 สำหรับในส่วนที่สาม คือ ระบบควบคุมกระแสชดเชย ตัวควบคุมในระบบควบคุมกระแสชดเชยมีนัยสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อสมรรถนะ การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ ตัวควบคุมในระบบควบคุมกระแสชดเชยจึงต้องมีความเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานโหลดรถไฟในระบบรางไฟฟ้าที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด (L. Yu-quan, et al., 2011) ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำการควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว (Adaptive Modulated Model Predictive Control: AM²PC) ในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เนื่องจากการควบคุมด้วยวิธีดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว และในส่วนสุดท้าย เป็นระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง การทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟส่งผลให้แรงดันบัสไฟตรงไม่คงตัวตามจุดการทำงานที่

เหมาะสม ผลกระทบดังกล่าวส่งผลต่อสมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่พด้วยเหตุนี้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง เนื่องด้วยตัวควบคุมพีไอเป็นตัวควบคุมแบบเชิงเส้น สามารถออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้ง่ายไม่ซับซ้อน และให้ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ดีเพียงพอตามวัตถุประสงค์



รูปที่ 1.1 การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและค้นคว้าองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องทางด้านการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

1.2.2 เพื่อพัฒนาวิธีการคำนวณกระแสอ้างอิงวิธีใหม่ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อศึกษาและออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลในระบบรางไฟฟ้า

1.2.4 เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ สำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล ภายใต้สภาวะโหลดรถไฟฟ้ามมีการเปลี่ยนแปลงด้วยตัวควบคุมเชิงปรับตัว

1.2.5 เพื่อสร้างระบบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

1.2.6 เพื่อสร้างชุดต้นแบบการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับยืนยันความถูกต้องขององค์ความรู้ต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ มุ่งเน้นการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล โดยพิจารณาที่กระแสไฟฟ้าสามเฟสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังเป็นสำคัญ

1.3.2 ระบบที่พิจารณาเป็นระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม โดยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสมีขนาดสมดุล และไม่มีการพิจารณาพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า

1.3.3 วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่พิจารณาเป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.3.4 ลักษณะกระแสโหลดรถไฟฟ้ายที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ เป็นข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกที่ประกอบด้วยองค์ประกอบกระแสมูลฐานและกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าของประเทศไต้หวัน (H. Sy-Ruen, et al., 2002) ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้ข้อมูลดังกล่าวเป็นลักษณะของกระแสโหลดรถไฟความเร็วสูงในระบบรางไฟฟ้า โดยจะแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติ

1.3.5 การสร้างชุดต้นแบบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟในห้องปฏิบัติการ จะปรับลดพิกัดจากระบบรางไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ และในส่วนของ

โพลตรถความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้าจะแทนด้วยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน

1.3.6 การจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

1.3.7 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อ้างอิงค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (Current Total Harmonic Distortion: % THD_i) ตามมาตรฐาน IEEE Std.519-2014

1.3.8 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor: PF) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE Std.1459-2010

1.3.9 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อ้างอิงค่าตัวประกอบความไม่สมดุลของกระแส (Current Unbalanced Factor: % CUF) ตามมาตรฐาน IEEE Std.141-1993

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล โดยพิจารณาที่กระแสไฟฟ้าสามเฟสทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลัง

1.4.2 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับการจำลองสถานการณ์ จะพิจารณาในกรณีแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ และผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ในขณะทำการทดสอบจริงกับชุดต้นแบบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการจะพิจารณาเฉพาะในกรณีแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์เท่านั้น

1.5 ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์

การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ มีรายละเอียดการดำเนินงานในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 สํารวจและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า

ขั้นที่ 2 สํารวจและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านปัญหาของคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้า พร้อมทั้งสรุปปัญหาดังกล่าวเพื่อตีกรอบการทำวิจัยวิทยานิพนธ์

ขั้นที่ 3 สํารวจและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า

ขั้นที่ 4 ศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟความเร็วสูง

ขั้นที่ 5 ศึกษาและพัฒนาองค์ความรู้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้า

ขั้นที่ 6 ศึกษาและออกแบบวงจรรองกำลังแอกทีฟสำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลในระบบรางไฟฟ้า พร้อมทั้งจำลองสถานการณ์ระบบดังกล่าวด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

ขั้นที่ 7 ศึกษาและพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ ในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลัง แยกทีฟ สำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุลด้วยตัวควบคุมเชิงปรับตัว

ขั้นที่ 8 สร้างชุดต้นแบบเพื่อทดสอบการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุลในห้องปฏิบัติการ เพื่อยืนยันความถูกต้องขององค์ความรู้ต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า

1.6.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุลด้วยวงจรรองกำลังแยกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้า

1.6.3 ได้วิธีการใหม่สำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรองกำลังแยกทีฟในระบบรางไฟฟ้า

1.6.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ ของวงจรรองกำลังแยกทีฟ สำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุลในระบบรางไฟฟ้า

1.6.5 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแยกทีฟด้วยตัวควบคุมเชิงปรับตัวปรับตัว เพื่อให้มีสมรรถนะการควบคุมที่ดีในสถานะโหลดรถความเร็วสูงมีการเปลี่ยนแปลง

1.6.6 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

1.6.7 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างชุดต้นแบบการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุลไฟฟ้าด้วยวงจรรองกำลังแยกทีฟ

1.7 การจัดรูปเล่มรายงาน

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 10 บท 1 ภาคผนวก ซึ่งในแต่ละส่วนมีสาระสำคัญดังต่อไปนี้

บทที่ 1 คือ บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ลักษณะของงานวิจัยที่ศึกษา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า การคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรองกำลังแยกทีฟ รวมถึงระบบควบคุมกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแยกทีฟ

บทที่ 3 นำเสนอโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม พร้อมทั้งวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ และลักษณะของโพลตรถไฟความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้า

บทที่ 4 นำเสนอการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอองค์ความรู้ในการพัฒนาสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิง โดยมีการประยุกต์ใช้งานร่วมกันระหว่างการตรวจจับซึ่งโครนัสกับหลักการวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน และการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐาน การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีดั้งเดิมและวิธีที่พัฒนาขึ้นใหม่ได้รับการเปรียบเทียบสมรรถนะด้านการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ

บทที่ 5 นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ และพิกัดของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วย การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ และการออกแบบพิกัดของโอจีบีที อีกทั้งได้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอได้รับการออกแบบด้วยวิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมกับพหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน การทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอได้ดำเนินการโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ

บทที่ 6 นำเสนอตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลองสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ พร้อมทั้งทำการทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ นอกจากนี้ ได้มีการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลอง

บทที่ 7 นำเสนอระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับมอดูเลต ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่น่าจุดเด่นของตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลองมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการสร้างสัญญาณการสวิตช์ด้วยวิธีสเปกเตอร์มอดูเลเตอร์ ตัวควบคุมดังกล่าวได้ดำเนินการทดสอบสมรรถนะการควบคุมโดยอาศัยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ อีกทั้งได้มีการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลอง และตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับมอดูเลต

บทที่ 8 นำเสนอตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับมอดูเลตเชิงปรับตัว โดยใช้ตัวควบคุมพีซีลจิกเป็นกลไกการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับมอดูเลต และในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีซีลจิกเพื่อให้เหมาะสมกับตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับมอดูเลตสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยตัวควบคุมดังกล่าว ได้รับการทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ

บทที่ 9 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ และผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า เพื่อยืนยันความถูกต้องขององค์ความรู้ต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 10 กล่าวถึงบทสรุปของการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อการ
พัฒนางานวิจัยวิทยานิพนธ์ในอนาคต
ภาคผนวก นำเสนอบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระหว่างการศึกษา



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ เนื่องจากการวิจัยทางการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้าได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยประเด็นที่สำคัญต่อการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเด็น ประกอบด้วย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟ ผลการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมในประเด็นข้างต้นได้ถูกนำเสนอไว้ในหัวข้อ 2.2 ถึง 2.5 ตามลำดับ รายละเอียดการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย ปีที่ตีพิมพ์ คณะผู้วิจัย และสาระสำคัญที่ได้รับจากงานวิจัย นอกจากนี้ ได้นำเสนอภาพรวมปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งหมดตามที่ผู้วิจัยได้ศึกษา

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า

ระบบรางไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามมีโครงสร้างที่แตกต่างกันหลายรูปแบบ แต่ละโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้ ะยะทางการเดินรถ และโหลดรถไฟฟ้ เป็นต้น ผลการสำรวจงานวิจัยในหัวข้อที่ 2.2 แสดงได้ดังตารางที่ 2.1 จากตารางดังกล่าว พบว่า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าสามารถจำแนกได้เป็น 2 ระบบ ได้แก่ ระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ละระบบมีพิกัดกำลังไฟฟ้า ลักษณะการจ่ายไฟฟ้า ระยะทางการเดินรถ และกลุ่มประเทศที่ใช้งานที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1987	L. Denning	นำเสนอโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าที่มีระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง พิกัดแรงดัน 750 โวลต์ และ 1500 โวลต์ โดยมีการจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดรถไฟฟ้แบบรางที่สาม ซึ่งเป็นการจ่ายไฟให้การเดินรถไฟฟ้ในตัวเมือง นอกจากนี้

ตารางที่ 2.1 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ในบทความนี้ได้กล่าวถึงระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาดพิกัดแรงดัน 3000 โวลต์ ที่มีลักษณะการจ่ายไฟแบบเหนื่อศีรษะให้กับรถไฟ
1990	B. Mellitt, J. Allan, Z. Shao, W. Johnston and C. Goodman	นำเสนอแบบจำลองโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส โดยมีการจ่ายไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟแบบเหนื่อศีรษะให้กับรถไฟ ด้วยระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส พิกัดแรงดัน 25 กิโลโวลต์ ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้างดกล่าว เกิดแรงดันตกน้อยกว่าระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
1996	B. Chen and B. Guo	กล่าวถึงแบบจำลองการเชื่อมต่อหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าและแปลงแรงดันไฟฟ้าจากสามเฟสเป็นหนึ่งเฟส เพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเหนื่อศีรษะให้กับรถไฟ โดยมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงกำลังแบบหนึ่งเฟส แบบวี-วี แบบสก็อต แบบเลอบลองค์ และแบบวูดบริดจ์ ซึ่งผลการศึกษา พบว่า การเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบหลายขดลวด คือ แบบวี-วี แบบสก็อต แบบเลอบลองค์ และแบบวูดบริดจ์ สามารถลดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าได้
2001	L. Battistelli, D. Lauria and P. Vernillo	นำเสนอระบบรางไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงสก็อตที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟเพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าและแปลงจากแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟส การเชื่อมต่อหม้อแปลงกำลังดังกล่าว ส่งผลให้แรงดันที่โหลดรถไฟมีเสถียรภาพตามค่าที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และลดผลกระทบจากการรบกวนของระบบส่งจ่ายไปยังโหลดรถไฟ เป็นผลให้โหลดรถไฟทำงานได้อย่างเต็มสมรรถนะ โดยทำการพิจารณาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 25 กิโลโวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์
2002	H. Sy-Ruen and C. Bing-Nan	นำเสนอระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมในประเทศไต้หวัน ที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 69 กิโลโวลต์ ความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ ต่อผ่านหม้อแปลงเลอบลองค์ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟเพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าและแปลงแรงดันไฟฟ้าจากสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสพิกัดแรงดัน 25 กิโลโวลต์ ความถี่ 60 Hz

ตารางที่ 2.1 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		จำนวน 2 เฟส หรือเรียกว่า แรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวม(co-phase) โดยมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้าแบบเหนื่อศีรษะ ซึ่งเป็นการเดินรถไฟฟาระหว่างเมือง
2005	J. Dixon and L. Moran	นำเสนอระบบรางไฟฟ้ากระแสตรง มีการเชื่อมต่อวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแบบ 3 ชั้น 27 ระดับ ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้ โดยระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีขนาด 750 โวลต์ สำหรับจ่ายโพลตรถไฟฟ้าแบบรางที่สาม การใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดังกล่าวช่วยลดการเกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
2010	M. Brenna, F. Foiadelli and D. Zaninelli	กล่าวถึงโครงสร้างระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม พิกัดแรงดัน 25 กิโลโวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ โครงสร้างดังกล่าวนิยมใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟความเร็วสูง โดยกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟความเร็วสูง มีค่าเท่ากับ 1- 2 เมกะวัตต์ต่อกิโลเมตร นอกจากนี้ ยังกล่าวถึงการเกิดแรงดันฮาร์มอนิกทางด้านเฟสรวมของระบบรางไฟฟ้า
2011	นคร จันทสร	หนังสือเล่มนี้นำเสนอความรู้ทั่วไปทางด้านวิศวกรรมรถไฟ ซึ่งส่วนหนึ่งของหนังสือได้อธิบายถึงโครงสร้างระบบรางไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้ในแต่ละประเทศ
2012	A. Steimel	กล่าวถึงวิวัฒนาการของระบบรางไฟฟ้าและโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าที่ใช้งานในทวีปยุโรป ซึ่งพบว่า โครงสร้างระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับขนาดพิกัดแรงดัน 25 กิโลโวลต์ 50/60 เฮิร์ตซ์ มีระยะทางการเดินรถมากที่สุดในทวีปยุโรป
2016	I. Krastev, P. Tricoil, S. Hillmansen and M. Chen	นำเสนอผลการสำรวจบริษัทวิศวกรรมเกี่ยวกับความเป็นมาของระบบรางไฟฟ้าในอดีตจนถึงปัจจุบัน รวมทั้งระบบรางไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ซึ่งรายละเอียดในบทความได้นำเสนอ พัฒนาการของโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าที่ช่วยลดปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้า
2018	A. Verdicchio, P. Ladoux, H. Caron and S. Sanchez	นำเสนอระบบรางไฟฟ้าในตัวเมืองของประเทศฝรั่งเศส มีระยะทางการเดินรถรวมทั้งสิ้น 6,000 กิโลเมตร โดยเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงพิกัด 1,500 โวลต์ มีการส่งจ่ายไฟฟ้าแบบเหนื่อศีรษะ ระบบไฟฟ้าดังกล่าวมีข้อจำกัดในการใช้งานโพลตรถไฟฟ้า จึงได้นำเสนอระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงพิกัด 9,000 โวลต์ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

ตารางที่ 2.1 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2020	K. Valeriy, S.Viktor, H. Petro, S. Myamlin, K. Yevhen and L. Vitalij	นำเสนอระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของรถไฟความเร็วสูงในประเทศยูเครน ซึ่งเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไฮบริดจ์ โดยมีการทำงานร่วมกันระหว่างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ เพื่อรองรับกำลังไฟฟ้าของโพลตรถไฟความเร็วสูงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟในแต่ละประเทศ

ระบบไฟฟ้า		ระยะทางการเดินรถและกลุ่มประเทศที่ใช้งาน		
		ระยะทางเดินรถ (km)	ลักษณะการจ่ายไฟ	กลุ่มประเทศที่ใช้งาน
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง	ต่ำกว่า 1500 V	5,106	รางที่สาม, รางที่สี่	เยอรมัน สหราชอาณาจักร สวิตเซอร์แลนด์ ไทย สหรัฐอเมริกา
	1500 V	78,276	เหนือศีรษะ	รัสเซีย โปแลนด์ อิตาลี สเปน อเมริกาใต้ สหราชอาณาจักร
	1500 V – 3000 V	22,138		ฝรั่งเศส เนเธอร์แลนด์
แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส	ต่ำกว่า 20 kV, 50-60 Hz	245	เหนือศีรษะ	สหรัฐอเมริกา
	20 kV, 50-60 Hz	3,741		-
	25 kV, 50-60 Hz	343,761		ฝรั่งเศส ญี่ปุ่น จีน อิตาลี สหราชอาณาจักร ไต้หวัน อินเดีย โรมานี ไทย
	50 kV, 50-60 Hz	1,173		สหรัฐอเมริกา แคนาดา สวิตเซอร์แลนด์
	6 kV-13kV, 25 Hz	1,469		สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย
	11 kV, 16(2/3) Hz	120		สวิตเซอร์แลนด์
	15 kV, 16(2/3) Hz	35,461		เยอรมัน สวีเดน นอร์เวย์ สวิตเซอร์แลนด์
แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส		43	เหนือศีรษะ	สวิตเซอร์แลนด์

ที่มา: “ช่วงรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ,” นคร จันทร, 2011, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

การศึกษางานวิจัยในอดีตที่ได้อธิบายในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ผู้วิจัยสังเกตเห็นว่า โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสมีระยะทางการเดินทางมากที่สุด เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวเหมาะสมกับระบบรถไฟฟ้ามอเตอร์ไฟฟ้าที่มีระยะการเดินทางไกล นิยมใช้งานกับรถไฟความเร็วสูง อีกทั้งโครงสร้างดังกล่าวมีกำลังงานสูญเสียต่ำเมื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระยะทางไกล มีต้นทุนต่อกิโลเมตรที่ต่ำกว่าระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และมีความปลอดภัยสูง นอกจากนี้ โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสยังสอดคล้องกับความต้องการของงานวิจัยในประเทศไทยตามแผนยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปีของรัฐบาล ที่ระบุไว้ว่า ประเทศไทยมีแผนที่จะดำเนินการสร้างระบบขนส่งทางรางไฟฟ้าให้ครอบคลุมทั่วประเทศ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสสำหรับพิจารณาการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า

ระบบรางไฟฟ้าประกอบด้วยสองส่วนที่สำคัญ คือ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ และโวลตรถไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส และอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในตู้โดยสาร เป็นต้น การใช้งานโวลตรถไฟฟ้าส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้าขึ้นในระบบรางไฟฟ้า การศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ามีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสำรวจงานวิจัย พบว่า การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ามีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ คือ การปรับปรุงความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ การกำจัดกระแสฮาร์โมนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่ภาวะสมดุล ด้วยเหตุนี้ วัตถุประสงค์ของการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าที่นำเสนอข้างต้นจึงถูกนำมาใช้เป็นประเด็นสำหรับการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมในส่วนนี้ ผลการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1994	C. Tsai-Hsiang	นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าและแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุล เป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสร่วมที่มีขนาดสมดุล และมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา โดยใช้หม้อแปลงสก็อตและหม้อแปลงเลอบลองก์ ซึ่งการใช้หม้อแปลงทั้งสองประเภทนี้สามารถแก้ปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1996	C. Bin-Kwie and G. Bing-Song	กล่าวถึงการเชื่อมต่อหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้า เพื่อลดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า โดยหม้อแปลงกำลังที่มีสมรรถนะที่ดีในการปรับปรุงความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้ามี 3 ชนิด ได้แก่ หม้อแปลงสก็อต หม้อแปลงเลอบลองก์ และหม้อแปลงวูดบริดจ์
1998	K. Hung-Yuan and C. Tsai- Hsiang	นำเสนอการประเมินค่าความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากการใช้งานโพลตรถไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพแรงดันไฟฟ้า โดยทำการเปรียบเทียบการเชื่อมต่อหม้อแปลงหนึ่งเฟส หม้อแปลงวี-วี หม้อแปลงสก็อต และหม้อแปลงเลอบลองก์ ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ซึ่งพบว่า หม้อแปลงสก็อต และหม้อแปลงเลอบลองก์ มีสมรรถนะดีที่สุดในการปรับปรุงค่าความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า
2002	H. Sy-Ruen, and C. Bing-Nan	นำเสนอระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสร่วม โดยมีหม้อแปลงเลอบลองก์เป็นหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสร่วมมีลักษณะสมดุล และได้ทำการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter: PPF)
2004	S. Zhuo, J.Xinjian, Z. Dongqi and Z. Guixin	นำเสนอการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วมโดยใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟ (Active Power Filter: APF) แบบขนานสามเฟสต่อผ่านหม้อแปลงสก็อต เพื่อฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบที่จุดต่อร่วมทางด้านเฟสร่วม
2004	C. Shi-Lin, R. Li and H. Pao- Hsiang	นำเสนอปัญหาที่เกิดขึ้นจากความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า และได้แนะนำแนวทางในการแก้ปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสก็อตและหม้อแปลงเลอบลองก์ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้า รวมทั้งได้นำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าโดยทำการฉีดกระแสชดเชยลำดับเฟสลบเข้าสู่ระบบที่จุดต่อร่วมทางด้านระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2006	S. Rahmani and K. Al-Haddad	นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าพิกัด 25 กิโลโวลต์ โดยวงจรกรองกำลังไฮบริดจ์ (Hybrid Power Filter: HPF) สำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง
2009	A. Bueno, M. Gimenez, J. Restrepo and J. Aller	กล่าวถึงวิธีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกและการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุลของกระแสที่แหล่งจ่ายของระบบรางไฟฟ้าหนึ่งเฟสด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
2010	A. Bueno, J. Aller, J. Restrepo and T. Habetler	นำเสนอระบบรางไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงวี-วี และหม้อแปลงสก็อตที่สถานีขับเคลื่อนรถไฟ โดยมุ่งเน้นการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุลของระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งพบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟมีประสิทธิภาพที่ดีในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงกระแสไหลที่ไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุล
2011	S. Zeliang, X. Shaofeng and L. Qunzhan	นำเสนอการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุลของระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวมที่มีการจ่ายโหลดรถไฟทั้งสองเฟส ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม
2011	A. Luo, C. Wu, J. Shen, Z. Shuai and F. Ma	นำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม โดยโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าใช้หม้อแปลงวี-วี เป็นหม้อแปลงกำลังเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสรวมมีขนาดสมดุล และมีการเชื่อมต่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมเข้าสู่ระบบรางไฟฟ้าทางด้านแบบเฟสรวม สำหรับปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย อีกทั้งได้สร้างชุดทดสอบที่ลดพิกัดจากระบบจริงเพื่อยืนยันสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า
2012	W. Chuanping, L. An, J. Shen, M. Fu Jun and P. Shuangjian	นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า โดยทำการพิจารณาระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวมที่มีลักษณะการจ่ายโหลดรถไฟเพียงเฟสเดียวเท่านั้น ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไม่สมดุล วิธีการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าที่ได้นำเสนอ

ตารางที่ 2.3 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟสามเฟสต่อผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าจากระบบสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวม โดยทางด้านเฟสรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าจะต่อกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าเพื่อฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบ
2015	K. Lao, M. Wong, N. Dai, C. Wong and C. Lam	นำเสนอการออกแบบวงจรรอกกำลังไฮบริดจ์สำหรับการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การออกแบบดังกล่าวมุ่งเน้นการวิเคราะห์ค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังไฮบริดจ์ที่เหมาะสมในการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า รวมทั้งได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ปรับลดพิกัดจากระบบรางไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ เพื่อยืนยันสมรรถนะการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการที่นำเสนอ
2015	G. Firat, G. Yang and H. Hussain	นำเสนอสมรรถนะการทำงานของหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ ในกรณีระดับแรงดันไฟฟ้าและแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุลเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวมที่มีขนาดสมดุล ซึ่งประกอบด้วย หม้อแปลงหนึ่งเฟส หม้อแปลงสก็อต หม้อแปลงเลอบลองค์ หม้อแปลงวี-วี หม้อแปลงวาย-เดลต้า และหม้อแปลงเดลต้า-เดลต้า ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะดังกล่าว พบว่า หม้อแปลงเลอบลองค์ มีค่าดัชนีชี้วัดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด ซึ่งแสดงได้ว่า หม้อแปลงเลอบลองค์ มีสมรรถนะที่ดีในการลดระดับแรงดันไฟฟ้าและแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุลเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวมที่มีขนาดสมดุล
2015	S. Gazafredi, A. Langerudy, E. Fuchs and K. Al-Haddad	กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหาคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ อาทิเช่น การเกิดกระแสฮาร์มอนิก ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ค่าตัวประกอบกำลังที่ต่ำกว่ามาตรฐาน เป็นต้น โดยรายละเอียดในบทความบางส่วนได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพแรงดันไฟฟ้าด้วยการใช้หม้อแปลงสมดุล เช่น หม้อแปลงเลอบลองค์ หม้อแปลงสก็อต และหม้อแปลงวี-วี เป็นต้น สำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้ 5 วิธี ประกอบด้วย การชดเชยกำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟแบบคงตัว

ตารางที่ 2.3 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		(Static VAR Compensators: SVCs) วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (PPF) การชดเชยซิงโครนัสแบบคงตัว (Static Synchronous Compensator: STATCOM) วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (APF) และวงจรกรองกำลังไฮบริดจ์ (HPF) ซึ่งแต่ละวิธีมีจุดเด่นที่แตกต่างกัน
2016	Z. He, Z. Zheng and H. Hu	นำเสนอการงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้าในระบบรถไฟความเร็วสูง ซึ่งส่วนหนึ่งของบทความได้อธิบายถึงวิธีการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี คือ การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบคงตัว วงจรกรองกำลังพาสซีฟ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ และวงจรกรองกำลังไฮบริดจ์
2017	L. Wu and W. Mingli	นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีลักษณะต่อร่วมหลายชั้น ซึ่งการต่อในลักษณะนี้จะช่วยลดขนาดของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ
2018	M. Tanta, V. Monteiro, T. Sousa, A. Martins, A. Carvalho and J. L. Afonso	นำเสนอปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ พร้อมทั้งวิธีการปรับปรุงคุณภาพแรงดันไฟฟ้าด้วยการใช้โหลดรถไฟฟ้สามเฟส เทคนิคการเลื่อนเฟส (หม้อแปลงกระแสสลับคู่เฟส) และการใช้หม้อแปลงสมดุส สำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าได้นำเสนอวิธี การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบคงตัว การชดเชยซิงโครนัสแบบคงตัว วงจรกรองกำลังพาสซีฟ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ และวงจรกรองกำลังไฮบริดจ์ โดยเนื้อหาส่วนหนึ่งของบทความได้ทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะต่าง ๆ ของวิธีการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าที่นำเสนอข้างต้น
2020	L. Zhao, M. Wu, Q. Liu, P. Peng and J. Li	นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการเชื่อมต่อหม้อแปลงสก็อตที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้ด้วยวงจรกรองกำลังไฮบริดจ์ นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะต่าง ๆ ของการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบคงตัว วงจรกรองกำลังแอกทีฟ และวงจรกรองกำลังไฮบริดจ์

ตารางที่ 2.3 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	T. Trongjai, T. Narongrit, K-L. Areerak and S. Janpong	นำเสนอการเปรียบเทียบโครงสร้างของวงจรรองกำลัง แยกทีฟสำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า กระแสสลับแบบเฟสรวม ซึ่งพบว่า โครงสร้างวงจรรองกำลัง แยกทีฟแบบตัวเก็บประจุร่วมมีสมรรถนะที่ดีในการกำจัด กระแสฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า ตามตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ามีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเด็นที่สำคัญ คือ การปรับปรุงคุณภาพแรงดันไฟฟ้าและการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า

หม้อแปลงกำลัง	สมรรถนะการปรับปรุงความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า
1. หม้อแปลงหนึ่งเฟส	ต่ำ
2. หม้อแปลงวาย-เดลต้า	ปานกลาง
3. หม้อแปลงเดลต้า-เดลต้า	ปานกลาง
4. หม้อแปลงวี-วี	ดี
5. หม้อแปลงสก็อต	ดีมาก
6. หม้อแปลงเลอบลองค์	ดีมาก
7. หม้อแปลงวูดบริดจ์	ดีมาก

การปรับปรุงคุณภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ มุ่งเน้นการปรับปรุงความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดรถไฟ โดยเลือกใช้โครงสร้างการส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวมสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีในการปรับปรุงความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า การปรับปรุงความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับประเภทของหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้าและแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวมสำหรับจ่ายโหลดรถไฟ จากผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการปรับปรุงความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ได้แสดงดังตารางที่ 2.4 พบว่า หม้อแปลงสก็อต หม้อแปลงเลอบลองค์ และหม้อแปลงวูดบริดจ์ มีสมรรถนะดีมากสำหรับการปรับปรุงความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาโครงสร้าง พิกัดการใช้งาน กำลังงานสูญเสีย และราคา ดังตารางที่ 2.5 ปรากฏว่า หม้อแปลง

เลอบลองค์มีความเหมาะสมกับระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณา ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้หม้อแปลงเลอบลองค์เป็นหม้อแปลงกำลังที่สถานีขับเคลื่อนรถไฟฟ้าสำหรับลระดับแรงดันไฟฟ้าและแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวม

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

คุณสมบัติ	ประเภทของหม้อแปลงกำลัง		
	สก็อต	เลอบลองค์	วูดบริดจ์
โครงสร้าง	ปานกลาง	ซับซ้อน	ซับซ้อน
พิักัดการใช้งาน	High Voltage (HV) 1 kV – 230 kV	High Voltage (HV) 1 kV – 230 kV	Extra High Voltage (EHV) 230 kV – 765 kV
กำลังงานสูญเสีย	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ
ราคา	ปานกลาง	ต่ำ	สูง
จุดเด่น	มีโครงสร้างการต่อ ขดลวดไม่ซับซ้อน	มีกำลังงานสูญเสียต่ำ และมีราคาถูก	เหมาะสมกับระบบส่งจ่าย กำลังไฟฟ้า EHV
จุดด้อย	ขดลวดของหม้อแปลงมี ขนาดใหญ่	มีโครงสร้างการต่อ ขดลวดที่ซับซ้อน	การใช้งานของหม้อแปลง จะต้องต่อร่วมกับหม้อแปลง อ้อได้ทางฝั่งทุติยภูมิ

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้า

วิธีการปรับปรุง คุณภาพไฟฟ้า	สมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้า		
	กระแสฮาร์มอนิก	ค่าตัวประกอบกำลัง	ค่าตัวประกอบความไม่สมดุล
1. SVC	-	ดี	ดี
2. STATCOM	ดี	ดี	ดีมาก
3. PPF	ดี	ดี	-
4. APF	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก
5. HPF	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก

การกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลของกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลัง เป็นอีกประเด็นที่สำคัญสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ วิธีการที่มีสมรรถนะที่ดีมากในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล ประกอบด้วยวงจรกรองกำลัง แอ็กทีฟ และวงจรกรองกำลังไฮบริดจ์ แสดงได้ดังตารางที่ 2.6 ซึ่งทั้งสองวิธีมีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.7 จากตารางดังกล่าว พบว่า การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าด้วยวงจร

กรองกำลังแอกทีฟ มีความยืดหยุ่นในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีที่โหลดรฟไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่า ระบบรางไฟฟ้ามีพฤติกรรมการใช้งานโหลดรฟไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง และวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถพัฒนาต่อยอดวิธีการควบคุม โครงสร้างของตัวควบคุม และแนวทางการออกแบบค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการใหม่ เพื่อรองรับสภาวะการเปลี่ยนแปลงของโหลดรฟไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม สำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลในระบบรางไฟฟ้า

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวิธีการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า

คุณสมบัติ	วิธีการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า	
	APF	HPF
จำนวนอุปกรณ์การสวิตช์	8	8
พิกัดของอุปกรณ์การสวิตช์	สูง	ปานกลาง
จำนวนตัวเก็บประจุ	1	2
จำนวนตัวเหนี่ยวนำ	1	2
ราคา	สูง	ปานกลาง
โครงสร้าง	อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบตัวเก็บประจุร่วม	อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบตัวเก็บประจุร่วมต่ออนุกรมกับวงจรกรองกำลังพาสซีฟ
จุดเด่น	มีความยืดหยุ่นในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า เมื่อโหลดรฟไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง	มีราคาต่ำกว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เนื่องจากพิกัดของอุปกรณ์การสวิตช์มีขนาดต่ำ
จุดด้อย	มีราคาสูงกว่าวงจรกรองกำลังไฮบริดจ์	ไม่มีความยืดหยุ่น เหมาะสมกับระบบที่โหลดรฟไฟฟ้าคงตัว

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

การคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งจากการสำรวจงานวิจัย พบว่า การคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีขั้นตอนพื้นฐานที่สำคัญ 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 คือ การตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลด และแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม

ขั้นตอนที่ 2 คือ การคำนวณค่าทางไฟฟ้าที่พิจารณา เช่น ค่ากระแสไฟฟ้าบนแกนดีคิว ค่ากระแสไฟฟ้าบนแกนแอลฟา-เบตา ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 คือ การแยกปริมาณฮาร์มอนิกที่พิจารณาออกจากปริมาณมูลฐาน การคำนวณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการคำนวณกำลังไฟฟ้าแอกทีฟสำหรับการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุลของกระแสที่แหล่งจ่าย

ขั้นตอนที่ 4 คือ การคำนวณกระแสอ้างอิงโดยใช้ค่าทางไฟฟ้าที่ได้จากการพิจารณาตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 3

ขั้นตอนการคำนวณกระแสอ้างอิงทั้ง 4 ขั้นตอน มีนัยสำคัญต่อสมรรถนะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุล ผู้วิจัยจึงได้นำทั้ง 4 ขั้นตอนมาใช้เป็นประเด็นในการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ แสดงได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1984	H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae	นำเสนอานิยามต่าง ๆ ของทฤษฎีกำลังไฟฟ้า โดยได้อธิบายถึงทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง (Instantaneous Power theory: PQ) ที่ใช้สำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล
1988	M. Takeda, K. Ikeda, A. Teramoto and T. Aritsuka	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบสามเฟสสมดุลด้วยวิธีแกนหมุนดีคว (วิธี DQ) สำหรับการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยมีวัตถุประสงค์ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยให้โหลดมีลักษณะสมดุล
1990	T. Furuhashi, S. Okuma and Y. Uchikawa	กล่าวถึงการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งของวงจรรอกกำลังแอกทีฟในระบบสามเฟสสี่สาย ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าดังกล่าว
1992	C. Chen, C. Lin and C. Huang	นำเสนอการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง โดยใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยการตรวจจับซิงโครนัส (Synchronous Detection: SD) ในระบบสามเฟสไม่สมดุล ซึ่งมีรูปแบบการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ 3 รูปแบบ ประกอบด้วย การตรวจจับซิงโครนัสแบบกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 2.8 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรอกกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		เท่ากัน การตรวจจับซิงโครนัสแบบกระแสไฟฟ้าเท่ากัน และ การตรวจจับซิงโครนัสแบบอิมพีแดนซ์เท่ากัน
1995	H-L. Jou	กล่าวถึงการเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิง สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบ ขนานด้วยวิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง การตรวจจับซิงโครนัสแบบ กระแสไฟฟ้าเท่ากัน และการตรวจจับซิงโครนัสแบบ กำลังไฟฟ้าเท่ากัน ซึ่งทั้งสามวิธีให้สมรรถนะการกำจัดกระแส ฮาร์มอนิกที่ใกล้เคียงกันในระบบสามเฟสสมดุลที่แหล่งจ่าย แรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์
1997	M. Aredes, J. Hafner and K. Heumann	กล่าวถึงระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สายที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่ สมดุล ซึ่งส่งผลให้การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีกำลังไฟฟ้า ขณะหนึ่ง มีความคลาดเคลื่อนจากกระแสอ้างอิงที่ควรจะเป็น เพื่อแก้ปัญหาในส่วนนี้ จึงได้พิจารณาส่วนประกอบลำดับศูนย์ (zero sequence components) ของ กระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี กำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ กระแสอ้างอิง
2001	M. El-Habrouk and M. Darwish	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis: SWFA) เพื่อใช้ในการ คำนวณค่ากระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟในระบบ สามเฟสสามสาย โดยวิธีดังกล่าวเป็นการคำนวณกระแสอ้างอิง ด้วยการวิเคราะห์สมการอนุกรมฟูรีเยร์ของกระแสโหนด สำหรับการใช้งานแบบเรียลไทม์ ส่งผลให้มีความเร็วในการ คำนวณและมีสมรรถนะที่ดีในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงใน สภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว
2001	M.Rukonuzzaman and M. Nakaoka	นำเสนอการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ด้วยวิธีโครงข่ายประสาทแบบปรับตัว (adaptive neural network) ในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งวิธีการดังกล่าวมี สมรรถนะที่ดีในการคำนวณกระแสอ้างอิง ซึ่งพิจารณาได้จาก ผลการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกภายหลังการชดเชย

ตารางที่ 2.8 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรอกกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2002	G. Chang and T. Shee	นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง วิธีแกนหมุนตีคว วิธี การตรวจจับซิงโครนัส และวิธีกรอบอ้างอิง $a-b-c$ ($a-b-c$ reference frame) ซึ่งผลการเปรียบเทียบ พบว่า ทั้ง 4 วิธีให้สมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าสามเฟส สมดุลสำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ใกล้เคียงกัน แต่ในระบบไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุล วิธีแกนหมุนตีคว และวิธี การตรวจจับซิงโครนัสให้สมรรถนะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง และวิธีกรอบอ้างอิง $a-b-c$
2003	M. Saitou, N. Matsui and T. Shimizu	กล่าวถึงการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยแกนหมุนตีควสำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสเพื่อคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย
2007	K. Mahesh, G. Arindam, J. Avinash and M. Hiralal	นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลในสภาวะที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส ทั้ง 3 รูปแบบประกอบด้วย กรณีกระแสไฟฟ้าเท่ากัน กรณีกำลังไฟฟ้าเท่ากัน และกรณีอิมพีแดนซ์เท่ากัน ซึ่งวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบกระแสไฟฟ้าเท่ากันให้สมรรถนะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกดีที่สุด และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบกำลังไฟฟ้าเท่ากันให้สมรรถนะดีที่สุดในการปรับปรุงค่าตัวประกอบความไม่สมดุลของกระแสที่แหล่งจ่าย
2007	S. Sujitjorn, K-L. Areerak and T.Kulworawanichpong	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีแกนหมุนตีคว ร่วมกับการวิเคราะห์ฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน หรือเรียกว่า “วิธี DQF” สำหรับระบบสามเฟสไม่สมดุล ซึ่งมีการเปรียบเทียบสมรรถนะกับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีแกนหมุนตีควและวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน โดยพบว่า วิธี DQF ให้สมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงที่

ตารางที่ 2.8 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรอกกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ดีกว่าวิธีแกมมุนติควและวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน
2009	V. Khadkikar, A. Chandra, and B. Singh	กล่าวถึงการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลัง แอกทีฟด้วยวิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งร่วมกับเทคนิคการ ตรวจจับสนุมเฟส (Phase Lock Loop: PLL) ในระบบไฟฟ้า หนึ่งเฟส เพื่อแก้ปัญหาคำนวณกระแสอ้างอิงที่ผิดพลาดใน สถานะที่แหล่งจ่ายแรงดันผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์
2011	N. Dai, K. Lao, M-C. Wong and C. Wong	นำเสนอการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรอกกำลัง ไฮบริดจ์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบราง ไฟฟ้าแบบเฟสรวม ด้วยวิธีการตัดออกฮาร์มอนิกแบบสมบูรณ์ (Perfect Harmonic Cancellation: PHC) โดยวิธีดังกล่าวมี สมรรถนะที่ดีในการคำนวณกระแสอ้างอิงเพื่อกำจัดกระแส ฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า
2012	C. Wu, A. Luo, J. Shen, F. Ma, and S. Peng	นำเสนอตัวตรวจจับสนุมลำดับเฟสลบ (Negative Sequence Current Detector: NSCD) สำหรับการคำนวณ กระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟเพื่อปรับปรุงโหลด ไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุลในระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวม และมีการจ่ายโหลดรถไฟหนึ่งเฟส การคำนวณกระแส อ้างอิงด้วยแนวทางดังกล่าว มีสมรรถนะที่ดีในการชดเชย กระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุลของ กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามเฟส
2013	K-W. Lao, N. Dai, W. Liu and M. Wong	นำเสนอการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับการปรับปรุง คุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟส รวมด้วยวิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง โดยอธิบายถึงคุณลักษณะ ของกระแสโหลดทางด้านเฟสรวมมีค่าเท่ากับปริมาณทาง ไฟฟ้าบนแกนแอลฟา-เบตา
2014	S. Tiyarachakun, K-L. Areerak and K-N. Areerak	กล่าวถึงการตรวจจับสนุมด้วยวิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง ร่วมกับการตรวจจับสนุมลำดับเฟสบวกหรือเรียกว่า “วิธี PQF” สำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลและสามเฟสไม่ สมดุล ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า วิธีดังกล่าวให้สมรรถนะการ คำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกใน ระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลและระบบไฟฟ้าสามเฟสไม่สมดุลที่ ดีกว่าวิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง

ตารางที่ 2.8 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรอกกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2015	P. Santiprapan, K-L. Areerak and K-N. Areerak	นำเสนอวิธีการใหม่สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบสามเฟสสี่สายด้วยวิธี DQF ร่วมกับการตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวก เรียกว่า “วิธี DQFP” การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการนี้ ให้สมรรถนะที่ดีในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในสถานะที่แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ และผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์
2016	H. Kaleybar and S. Farshad	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสำหรับคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟเพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิก และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม
2018	T. Narongrit, P. Santiprapan, and S. Janpong	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยการตรวจจับซิงโครนัส ร่วมกับการวิเคราะห์ฟูริเยร์วินโดว์เลื่อนหรือเรียกว่า “วิธี SDFA” สำหรับระบบไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส โดยมีการเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงโดยพิจารณาจากผลการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งพบว่า “วิธี SDFA” ให้สมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธีการตรวจจับซิงโครนัส
2020	L. Wang, Y. Pang, K-W. Lao, M-C. Wong, F. Ma and X. Zhou	เนื้อหาส่วนหนึ่งในบทความได้นำเสนอการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการจ่ายโหลดตรงไฟฟ้าหนึ่งเฟส ด้วยวิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง

ผลการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ตามตารางที่ 2.8 พบว่า วิธีการคำนวณกระแสอ้างอิงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยวิธีการคำนวณกระแสอ้างอิงที่มีสมรรถนะที่ดีและนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ วิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง (PQ) วิธีการตรวจจับซิงโครนัส (SD) วิธีแกนหมุนดีคว (DQ) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าวิธีการรอบอ้างอิงซิงโครนัส (SRF) วิธีการตัดออกฮาร์มอนิกแบบสมบูรณ์ (PHC) และวิธีตัวตรวจจับกระแสมูลฐานลำดับเฟสลบ (NSCD) ซึ่งแต่ละวิธีมีการคำนวณกระแสอ้างอิงที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาถึงความซับซ้อนของการคำนวณ สังเกตได้ว่า วิธีการตรวจจับซิงโครนัสมีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยกว่าวิธีการอื่น ส่งผลให้มีความรวดเร็วในการคำนวณ อีกทั้งจุดเด่นของวิธีการตรวจจับซิงโครนัสยังมีรูปแบบการคำนวณที่หลากหลาย ได้แก่ รูปแบบ

กระแสไฟฟ้าเท่ากัน (CSD) รูปแบบกำลังไฟฟ้าเท่ากัน (PSD) และรูปแบบอิมพีแดนซ์เท่ากัน (ZSD) ซึ่งสามารถเลือกรูปแบบการคำนวณได้ตามวัตถุประสงค์การชดเชยที่ต้องการ ด้วยเหตุผลนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการตรวจจับซิงโครนัสในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟเพื่อปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส รวมทั้ง วิธีการกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง วิธีแกนหมุนดีคิว วิธีการตัดออกฮาร์มอนิกแบบสมบูรณ์ และวิธีตัวตรวจจับกระแสมูลฐานลำดับเฟสลบ มีจุดด้อยในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกออกจากปริมาณมูลฐาน ผู้วิจัยจึงได้นำการวิเคราะห์ฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (SWFA) ที่มีจุดเด่นในด้านการแยกปริมาณฮาร์มอนิกออกจากปริมาณหลักมูลมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวิธีการตรวจจับซิงโครนัส เพื่อเพิ่มสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ นอกจากนี้ จากการสำรวจบริษัทนวัตกรรมกรรมในงานวิจัยของ Haitao และคณะ (H. Haitao, et al., 2018) พบว่า ระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมที่ใช้สำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟความเร็วสูงเกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นในระบบส่งจ่าย ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสรวมมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ด้วยเหตุนี้ การคำนวณค่ากระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟจึงเกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการพัฒนาการคำนวณกระแสอ้างอิงเพื่อให้สามารถรองรับสภาวะที่แหล่งจ่ายแรงดันมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ โดยนำเทคนิคการตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวก (PSVD) มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวิธีการตรวจจับซิงโครนัส และการวิเคราะห์ฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการที่พัฒนาขึ้นใหม่ เรียกว่า “การตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ (Enhanced Synchronous Detection: ESD)”

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแสดงได้ดังตารางที่ 2.9 จากตารางดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมกระแสชดเชยจำแนกออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นตัวควบคุมเชิงเส้น ได้แก่ ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมพีไอดี ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมทำซ้ำ ตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ ตัวควบคุมเดดบิต และตัวควบคุมทำนาย เป็นต้น สำหรับกลุ่มที่สองเป็นตัวควบคุมไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก และตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม เป็นต้น ในส่วนการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟถูกนำมาใช้งานร่วมกับระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมที่หลากหลาย เช่น ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมฟuzzyลอจิก และตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม และตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลอง เป็นต้น ผลการสำรวจงานวิจัยในประเด็นของการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง แสดงได้ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.9 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกกำลัง แยกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1998	N. Zargari and G. Joos	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสำหรับวงจรรอกกำลังแยกทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอ ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM (Pulse Width Modulation) โดยตัวควบคุมพีไอได้รับการออกแบบด้วยการเทียบสัมพันธ์พหุนามอันดับสองมาตรฐาน ผลการทดสอบพบว่า ตัวควบคุมดังกล่าวให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุมค่ากระแสชดเชยให้มีค่าใกล้เคียงกระแสอ้างอิง
2000	N. Mendalek and K. Al-Haddad	กล่าวถึงการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ โดยวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมกระแสชดเชยในระบบสามเฟสสมดุล โดยตัวควบคุมดังกล่าวประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบ SVM (Space Vector Modulator) การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ได้นำเสนอ ให้สมรรถนะที่ดีในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก
2001	S. Fukuda and T.Yoda	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอที่ได้รับการพัฒนาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้มีสมรรถนะการควบคุมที่ดีขึ้นในช่วงเวลาชั่วครู่ โดยทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์อัตราขยาย (K_s) เพิ่มเติม ซึ่งเรียกวธีการควบคุมดังกล่าวว่า “วิธีพีไอเอส”
2002	N. Mendalek, F. Fnaiech, K. Al-Haddad and L. Dessaint	นำเสนอการทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกกำลังแยกทีฟ โดยใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (Sliding Mode Control: SMD) ซึ่งพบว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยให้มีค่าใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิงทั้งในสภาวะชั่วครู่และสภาวะอยู่ตัว
2003	J. Mossoba and P. Lehn	กล่าวถึงการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมเดดบิต (deadbeat control) ในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยตัวควบคุมดังกล่าวให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วในสภาวะชั่วครู่ ส่งผลให้มีสมรรถนะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ดี
2004	Z. Sun, X. Jiang, D. Zhu and G. Zhang	นำเสนอระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแยกทีฟสำหรับปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า โดยใช้ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส ผลการทดสอบ พบว่า ตัวควบคุม

ตารางที่ 2.9 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรองกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		อีสเตอริซีส สามารถควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟได้ตามต้องการ ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณรูปไซน์
2005	Y. Dongmei, G. Qingding and H. Qing	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมพีชซีลอจิกสำหรับการปรับขนาดแถบอีสเตอริซีส ของตัวควบคุมอีสเตอริซีส ซึ่งการปรับแถบอีสเตอริซีส ส่งผลให้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟดีขึ้นทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว
2008	W. Xiao-gang, X. Yun-xiang and S. Ding-xin	นำเสนอตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลอง (Model Predictive Control: MPC) สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวช่วยเพิ่มสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยในสภาวะชั่วคราว
2009	L. Limongi, R. Bojoi, G. Griva and A. Tenconi	กล่าวถึงการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ ตัวควบคุมเดบิต และตัวควบคุมทำซ้ำ โดยทำการทดสอบด้วยวิธีทางดิจิทัล ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ตัวควบคุมทั้ง 4 วิธี ให้สมรรถนะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ดีใกล้เคียงกัน
2010	V. Khadkikar, M. Singh, A. Chandra and B. Singh	นำเสนอตัวควบคุมอีสเตอริซีสสำหรับควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส โดยทำการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมด้วยการสร้างชุดทดสอบแบบแอนะล็อก ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า ตัวควบคุมอีสเตอริซีสให้สมรรถนะที่ดีในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา
2012	C. Wu, A. Luo, J. Shen, F. Ma, and S. Peng	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟหนึ่งเฟสที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบรางไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมอีสเตอริซีส
2015	T. Narongrit, K-L. Areerak and K-N. Areerak	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมพีชซี โดยมีการนำเสนอวิธีการออกแบบค่าฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมด้วยวิธีการใหม่ ผลการทดสอบ พบว่า ตัวควบคุมพีชซีมีสมรรถนะที่ดีในการ

ตารางที่ 2.9 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรกรองกำลัง แอ็กทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		กำจัดกระแสฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังสำหรับระบบสามเฟสสมดุล
2016	T. Narongrit, K-L. Areerak, and K-N. Areerak	นำเสนอตัวควบคุมพีซีซีเชิงปรับตัวสำหรับ การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนาน ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีค่าใกล้เคียงกระแสอ้างอิงในสถานะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดโดยไม่จำเป็นต้องออกแบบค่าฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมใหม่
2016	H. Kaleybar and S. Farshad	กล่าวถึงการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟสำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิส ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมพีซีซี ผลการจำลองทดสอบพบว่า ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสและตัวควบคุมพีซีซี ให้สมรรถนะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าได้ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ
2016	K. Antoniewicz, M. Jasinski, M. Kazmierkowski and M.Malinowsk	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟสามเฟสสี่สายด้วยตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลอง โดยกำหนดความถี่การสวิตซ์ให้คงตัว ซึ่งเป็นการแก้ไขจุดด้อยของตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลอง ส่งผลให้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยเพิ่มขึ้น
2017	L. Tarisciotti, A. Formentini, A. Gaeta, M. Degano, P. Zanchetta, R. Rabbeni and M. Pucci	นำเสนอระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล ด้วยตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการควบคุมความถี่การสวิตซ์ ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ได้รับการพัฒนาจากตัวควบคุมทำนายโดยใช้แบบจำลอง จากผลการทดสอบ พบว่า จุดเด่นของตัวควบคุมดังกล่าว คือ ความเร็วในการลู่เข้ากระแสอ้างอิงและลดการกระเพื่อมของกระแสชดเชย ส่งผลให้ตัวควบคุมดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก
2017	P. Santiprapan, K-L. Areerak and K-N. Areerak	นำเสนอระบบฮาร์ดแวร์ของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟสำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบสามเฟสสี่สายโดยใช้ตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ ผลการทดสอบ พบว่า

ตารางที่ 2.9 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรกรองกำลัง แอ็กทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ตัวควบคุมดังกล่าวให้สมรรถนะดีในการควบคุมกระแสชดเชยให้มีค่าใกล้เคียงกระแสอ้างอิง
2017	K.Rameshkumara, V.Indragandhib, K.Palanisamy and T. Arunkumaria	กล่าวถึงการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลัง แอ็กทีฟหนึ่งเฟสด้วยตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลอง ตัวควบคุมดังกล่าวสามารถชดเชยความล่าช้าทางดิจิทัล ส่งผลให้มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยทั้งในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว
2018	W. Jiang, X. Ding, Y. Ni, J. Wang, L. Wang and W. Ma	นำเสนอการปรับปรุงตัวควบคุมเดดบิตให้มีความสามารถในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟให้ดียิ่งขึ้น โดยทำการพิจารณากับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล ผลการทดสอบ ปรากฏว่า ตัวควบคุมเดดบิต ที่ได้รับการปรับปรุง สามารถชดเชยความล่าช้าทางดิจิทัล ส่งผลให้มีสมรรถนะที่ดีสำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก
2020	P. Santiprapan, A. Booranawong, K-L. Areerak and H. Saito	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลัง แอ็กทีฟในระบบสามเฟสสี่สายด้วยตัวควบคุมทำนายแบบปรับตัว โดยกลไกการปรับด้วยอาศัยตัวควบคุมพีซีซีลอจิก ผลการทดสอบปรากฏว่า ตัวควบคุมดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยแม้ในกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น

จากผลการสำรวจงานวิจัย ตามตารางที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟที่นำเสนอข้างต้น มีโครงสร้างของระบบควบคุม กระบวนการควบคุม และแนวทางการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟหนึ่งเฟสแบบตัวเก็บประจุร่วมในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว อีกทั้งสามารถรองรับการควบคุมกระแสชดเชยเมื่อโหลดกรณีไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต (Modulated Model Predictive Control: M²PC) จึงมีความเหมาะสมกับระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบแรงไฟฟ้า เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าว มีจุดเด่นในด้านผลตอบแทนที่รวดเร็ว ลดการกระเพื่อม (ripple) ของกระแสชดเชย มีความยืดหยุ่นในการควบคุม และผู้วิจัยเล็งเห็นว่า ตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตสามารถพัฒนา

เพื่อต่อยอดเป็นตัวควบคุมเชิงปรับตัวเพื่อให้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลัง แยกที่ฟดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.10 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับวงจรรองกำลัง แยกที่ฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1996	J-C. Wu and H-L. Jou	นำเสนอระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับวงจรรองกำลัง แยกที่ฟในระบบไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันบัลไฟตรงให้มีค่าใกล้เคียงแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง ส่งผลให้วงจรรองกำลังแยกที่ฟมีสมรรถนะที่ดีในการฉีดกระแสชดเชย
2000	N. Mendalek and K. Al-Haddad	กล่าวถึงการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยทำการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงบนแกนดีคิว
2004	Z. Sun, X. Jiang, D. Zhu, and G. Zhang	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแยกที่ฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งผลการทดสอบ พบว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแยกที่ฟให้มีใกล้เคียงค่าที่ออกแบบไว้ ส่งผลให้วงจรรองกำลังแยกที่ฟมีสมรรถนะที่ดีในการฉีดกระแสชดเชย
2010	I. Colak and R. Bayindir	นำเสนอตัวควบคุมพีซีลอจิกสำหรับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแยกที่ฟ ซึ่งผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุม พบว่า ตัวควบคุมพีซีลอจิกให้สมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอในด้านความเร็วในการลู่เข้าค่ากระแสอ้างอิง
2011	A. Luo, C. Wu, J. Shen, Z. Shuai and F. Ma	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแยกที่ฟที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุล การในระบบรางไฟฟ้า โดยพิจารณาโหลดรถไฟความเร็วสูง ผลการทดสอบ พบว่า ตัวควบคุมพีไอมีสมรรถนะที่ดี และเพียงพอสำหรับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแยกที่ฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า

ตารางที่ 2.10 ผลสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับวงจรรอกกำลัง แยกทีฟ (ต่อ)

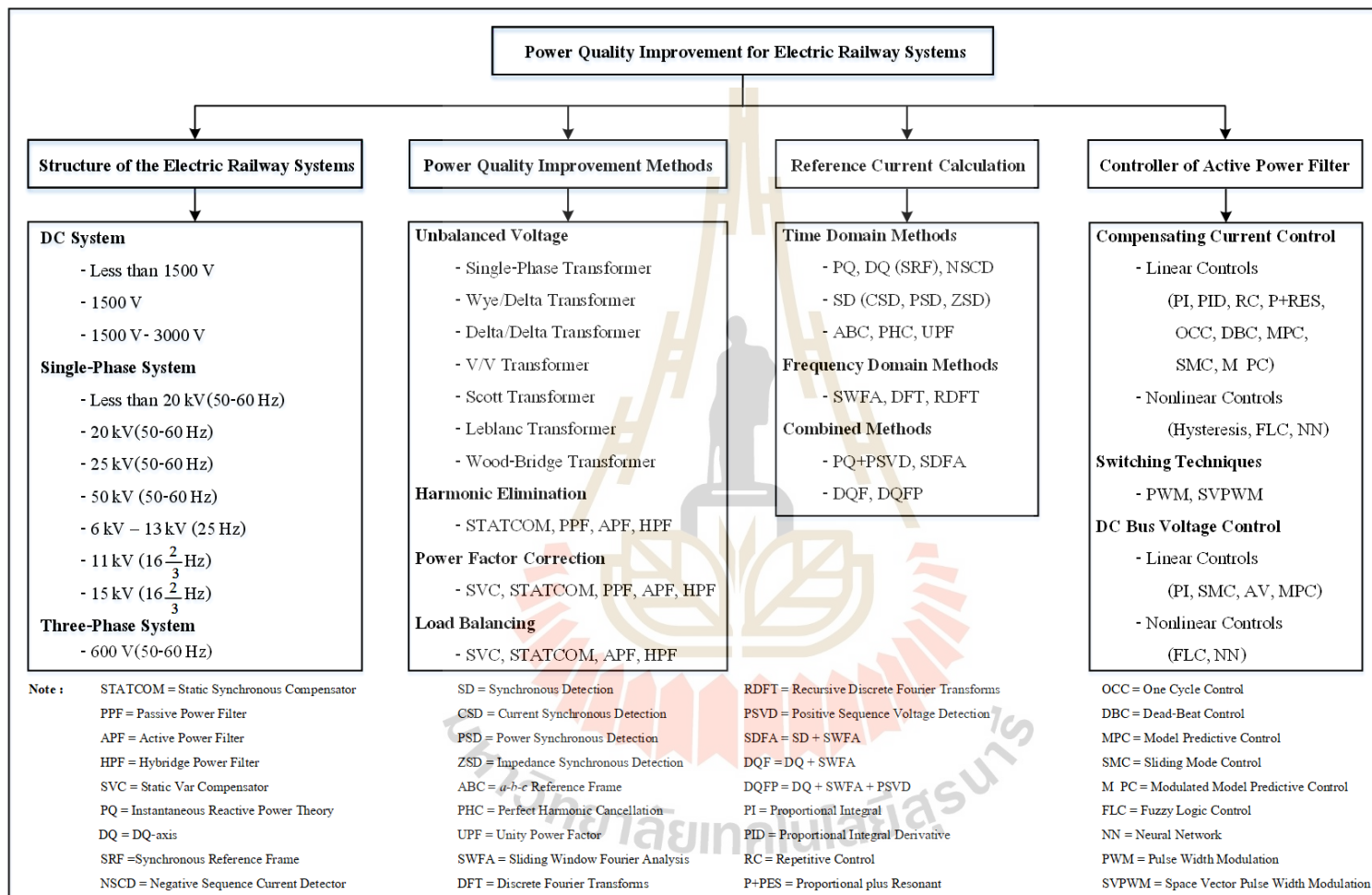
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2015	R. Ribeiro, T. Rocha, R. Sousa, E. Santos and A. Lima	นำเสนอระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ ร่วมกับตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยที่ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนทำหน้าที่คำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ โดยสามารถเรียกตัวควบคุมดังกล่าวว่า ตัวควบคุมไฮบริดจ์ การทำงานของตัวควบคุมไฮบริดจ์จะช่วยลดการกระเพื่อมของแรงดันบัลไฟตรง เป็นการเพิ่มสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงให้กับวงจรรอกกำลังแยกทีฟ
2016	T. Mannen and H. Fujita	กล่าวถึงระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ แบบปรับตัว โดยการควบคุมดังกล่าวจะทำการวิเคราะห์ค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัลไฟตรงเพื่อใช้สำหรับการควบคุม ซึ่งเป็นการควบคุมที่เหมาะสมกับระบบที่ตัวเก็บประจุมีค่าน้อย
2019	S. Janpong, T. Narongrit, M. Puangpool and N.Suthikarnnarunai	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแยกทีฟ โดยใช้ตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม ผลการทดสอบ พบว่า ตัวควบคุมดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง
2020	J. Zhou, Y. Yuan, and H. Dong	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแยกทีฟด้วยตัวควบคุมทำนายที่ใช้แบบจำลอง เพื่อปรับปรุงผลตอบสนองของแรงดันบัลไฟตรงในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด

ผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับวงจรรอกกำลังแยกทีฟ ตามตารางที่ 2.10 พบว่า ตัวควบคุมพีไอนิยมนำมาใช้สำหรับระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแยกทีฟ เนื่องจากตัวควบคุมพีไอให้สมรรถนะที่ดีในการควบคุม มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนทำให้ง่ายต่อการออกแบบ และเพียงพอต่อระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแยกทีฟที่ใช้สำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรอกกำลังแยกทีฟในระบบรางไฟฟ้า

2.6 สรุป

ผลการสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้ง 4 ประเด็น ที่ได้นำเสนอในบทนี้ สามารถแสดงได้ดังรูป 2.1 ภาพรวมของการสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในบทนี้เป็น ประโยชน์และสำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัย เนื่องจากการสำรวจงานวิจัยดังกล่าวเป็นพื้นฐานที่สำคัญ สำหรับแนวทางการดำเนินงานวิจัย และการพัฒนางานวิจัยสำหรับนำไปต่อยอดในอนาคต





รูปที่ 2.1 ภาพรวมปรัทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3

โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า

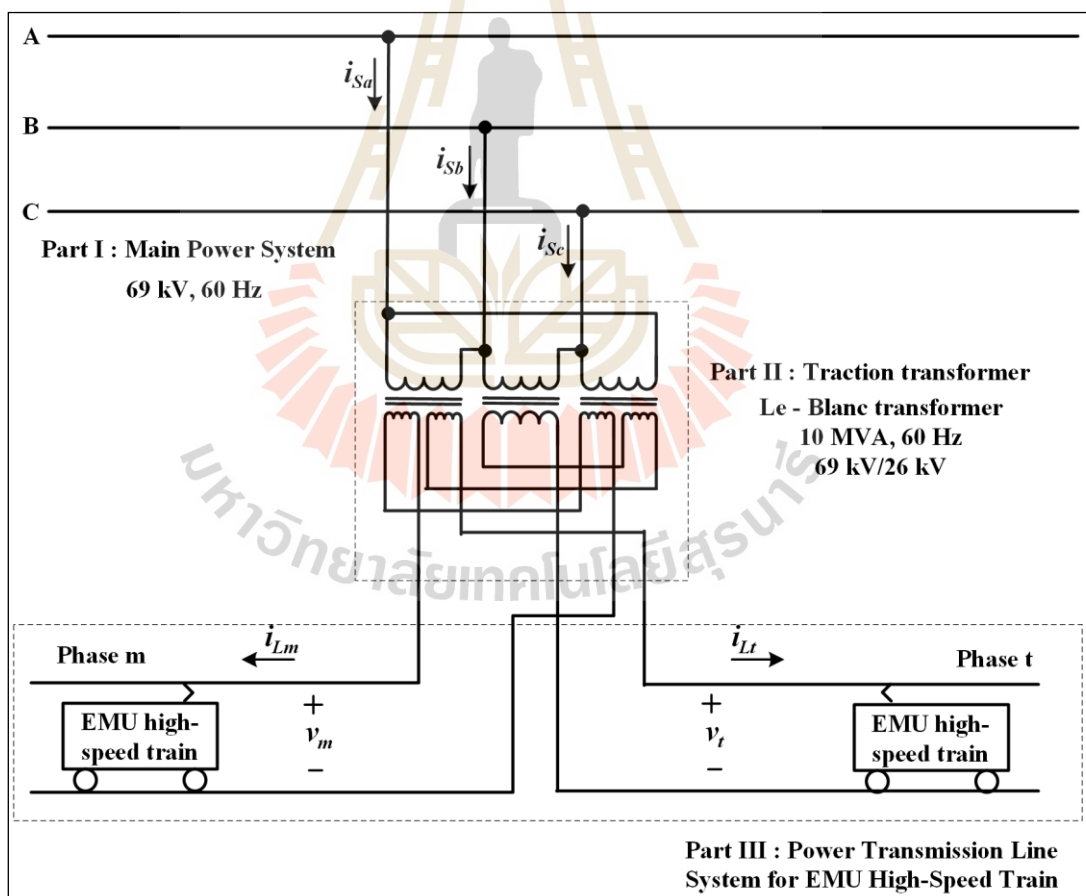
3.1 บทนำ

โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าประกอบด้วยสองส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ และโหลดของระบบรางไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ สามารถจำแนกออกเป็น 3 ระบบ คือ ระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส และระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส (นคร จันทคร, 2011) จากผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2 พบว่า การเลือกใช้งานระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับระยะทางการเดินรถ และโหลดรถไฟ โดยระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสนิยมใช้งานกับโหลดรถไฟความเร็วสูง เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวเหมาะสมกับระบบรถไฟที่มีระยะการเดินรถระยะทางไกล นอกจากนี้ ตามแผนยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปีของรัฐบาล ประเทศไทยมีแผนที่จะดำเนินการสร้างระบบขนส่งทางรางไฟฟ้าสำหรับการขับเคลื่อนรถไฟความเร็วสูงระหว่างภูมิภาคของประเทศ ซึ่งระบบรางไฟฟ้างกล่าวว่ามีโครงสร้างเป็นระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส เพื่อให้งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สอดคล้องกับแผนการพัฒนาประเทศในอนาคต ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส โดยพิจารณารถไฟความเร็วสูง (Electric Multiple Unit high-speed train: EMU high-speed train) เป็นโหลดของระบบรางไฟฟ้า โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าที่กล่าวมาข้างต้นจะถูกนำเสนออย่างละเอียดในบทนี้

3.2 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ

ระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสนิยมใช้เป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟความเร็วสูง มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าในช่วง 25 kV - 27.5 kV และมีความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz ตามระบบการผลิตไฟฟ้าของแต่ละประเทศ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าดังกล่าวมีระดับแรงดันไฟฟ้าสูง ส่งผลให้สถานีไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟมีพิธีการจ่ายไฟฟ้าได้ระยะทางไกล โดยระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ประกอบด้วย ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้า หม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ และระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส โดยพิจารณาลักษณะเฉพาะของโหลดรถไฟความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้าจากงานวิจัยของ H. Sy-Ruen และคณะ ซึ่งเป็นโครงสร้างระบบรางไฟฟ้าสำหรับรถไฟความเร็วสูงของประเทศไต้หวัน (H. Sy-Ruen, and C. Bing-Nan, 2002) งานวิจัยดังกล่าว มีข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับใช้เป็นพื้นฐานในการทำวิจัย อาทิเช่น พิกัดระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้า หม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ พิกัดระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ และข้อมูลองค์ประกอบของกระแส

มูลฐานและกระแสฮาร์มอนิกของโหลดรถไฟไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้า โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งสังเกตได้ว่า สถานีไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้ารับแรงดันไฟฟ้าสามเฟส พิกัด 69 kV, 60 Hz จากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าต่อผ่านหม้อแปลงกำลังที่มีการเชื่อมต่อแบบเลอบลองก์ หรือเรียกว่า หม้อแปลงเลอบลองค์ (Le-Blanc transformer) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 69 kV เป็น 26 kV และแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสร่วม (co-phase system) การใช้หม้อแปลงเลอบลองค์เป็นหม้อแปลงกำลังที่สถานีขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้าเป็นการปรับปรุงความไม่ สมดุลของแรงดันไฟฟ้าทางด้านระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้า (ด้านเฟสร่วม) การขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้าใช้แรงดันไฟฟ้าพิกัด 26 kV, 60 Hz แบบเฟสร่วม (เฟส m และ เฟส t) ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเหนื่อศีรษะ โดยรถไฟไฟฟ้าจะใช้แหวนรับไฟหรือสายลี (pantograph) สัมผัสกับสายส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อรับกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ตัวรถไฟฟ้าภายในรถไฟไฟฟ้าจะมีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสม และส่งจ่ายไปยังส่วนต่าง ๆ ของโหลดรถไฟไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้า

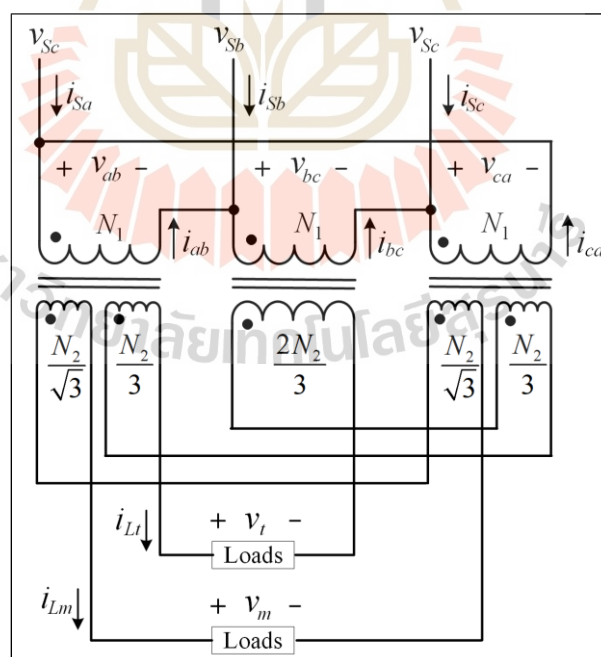
3.2.1 การวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ

การวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟจะพิจารณาบริเวณหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ใช้หม้อแปลงเลอบลองค์เป็นหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ เนื่องจากหม้อแปลงดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีสำหรับการปรับปรุงความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า มีกำลังงานสูญเสียน้อย และมีต้นทุนต่ำ ดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในระบบรางไฟฟ้า โครงสร้างของหม้อแปลงเลอบลองค์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 จากรูปดังกล่าว พบว่า ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงรับแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุล (v_{Sa}, v_{Sb}, v_{Sc}) มีคุณสมบัติเป็นค่าทางไฟฟ้าลำดับเฟสบวก (positive sequence) จากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้า แสดงได้ดังสมการที่ (3.1) ถึง (3.3)

$$v_{Sa} = V_m \sin(\omega t) = V_m \angle 0^\circ \quad (3.1)$$

$$v_{Sb} = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) = V_m \angle -120^\circ \quad (3.2)$$

$$v_{Sc} = V_m \sin(\omega t + 120^\circ) = V_m \angle 120^\circ \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของหม้อแปลงเลอบลองค์

เมื่อพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ ลักษณะการต่อขดลวด และอัตราส่วนของขดลวด ($N_1 : N_2$) ของหม้อแปลง ดังรูปที่ 3.2 สามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ ได้ดังนี้

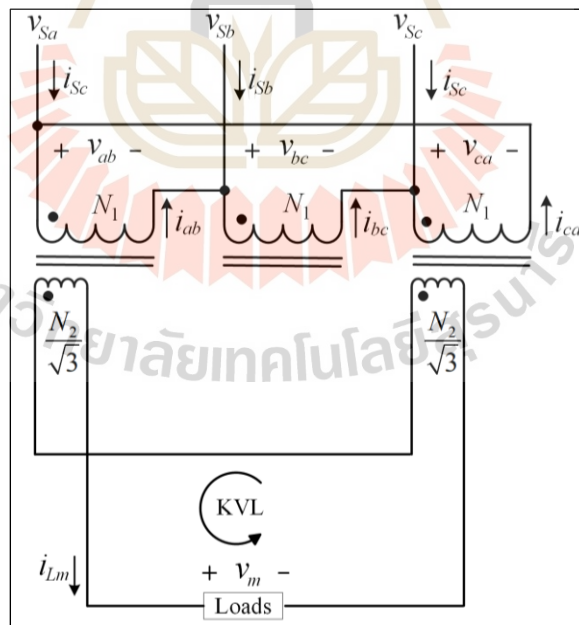
- พิจารณาแรงดันไฟฟ้าเฟส m (v_m)

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าเฟส m ผ่านวงจรสมมูลเฟส m ของหม้อแปลง แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 เนื่องจากต้องการให้การวิเคราะห์มีความเข้าใจที่ง่ายขึ้น จากรูปที่ 3.3 ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ทางด้านเฟส m เพื่อหาสมการแรงดันไฟฟ้าเฟส m ได้ดังสมการที่ (3.4)

$$v_m - \frac{N_2}{N_1\sqrt{3}}v_{ca} + \frac{N_2}{N_1\sqrt{3}}v_{ab} = 0 \quad (3.4)$$

จัดรูปสมการที่ (3.4) ได้ดังสมการที่ (3.5)

$$v_m = \frac{N_2}{N_1\sqrt{3}}(v_{ca} - v_{ab}) \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลเฟส m ของหม้อแปลงเลอบลองค์

พิจารณาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง เมื่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้ามีการต่อแบบวาย แสดงได้ดังสมการที่ (3.6) ถึง (3.8)

$$v_{ab} = v_{an} - v_{bn} \quad (3.6)$$

$$v_{bc} = v_{bn} - v_{cn} \quad (3.7)$$

$$v_{ca} = v_{cn} - v_{an} \quad (3.8)$$

นำสมการที่ (3.6) และ (3.8) แทนในสมการที่ (3.5) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.9)

$$v_m = \frac{N_2}{N_1\sqrt{3}} [(v_{cn} - v_{an}) - (v_{an} - v_{bn})] \quad (3.9)$$

จัดรูปสมการที่ (3.9) ได้ดังสมการที่ (3.10)

$$v_m = \frac{N_2}{N_1\sqrt{3}} (v_{cn} + v_{bn} - 2v_{an}) \quad (3.10)$$

เมื่อกำหนดให้ $v_{an} = v_{Sa}$, $v_{bn} = v_{Sb}$ และ $v_{cn} = v_{Sc}$ จะได้ดังสมการที่ (3.11)

$$v_m = \frac{N_2}{N_1\sqrt{3}} (v_{Sc} + v_{Sb} - 2v_{Sa}) \quad (3.11)$$

นำสมการที่ (3.1) และ (3.2) แทนลงในสมการที่ (3.11) ได้ดังนี้

$$v_m = \frac{N_2}{N_1\sqrt{3}} (V_m \angle 120^\circ + V_m \angle -120^\circ - 2V_m \angle 0^\circ)$$

$$= \frac{N_2}{N_1\sqrt{3}} V_m (1\angle 120^\circ + 1\angle -120^\circ - 2\angle 0^\circ)$$

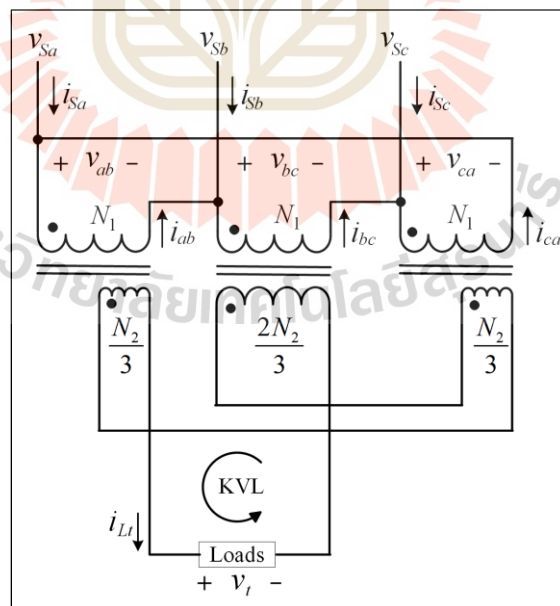
$$= \frac{N_2}{N_1\sqrt{3}} V_m [(-0.5 + j0.866) + (-0.5 - j0.866) - 2]$$

$$= -\frac{3}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} V_m = -\sqrt{3} V_m \frac{N_2}{N_1}$$

$$\therefore v_m = \sqrt{3} V_m \frac{N_2}{N_1} \angle 180^\circ \quad (3.12)$$

- พิจารณาแรงดันไฟฟ้าเฟส t (v_t)

การพิจารณาแรงดันไฟฟ้าเฟส t จะทำการวิเคราะห์ด้วยวงจรสมมูลเฟส t ดังรูปที่ 3.4 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่เฟส t เพื่อวิเคราะห์สมการแรงดันไฟฟ้าเฟส t แสดงได้ดังสมการที่ (3.13)



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลเฟส t ของหม้อแปลงเลอบลองค์

$$v_t - \frac{2N_2}{3N_1}v_{bc} + \frac{N_2}{3N_1}v_{ca} + \frac{N_2}{3N_1}v_{ab} = 0 \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.13) สามารถจัดรูปได้ดังสมการที่ (3.14)

$$v_t = \frac{N_2}{3N_1}(2v_{bc} - v_{ca} - v_{ab}) \quad (3.14)$$

นำสมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าในสมการที่ (3.6) ถึง (3.8) แทนลงในสมการที่ (3.14) จะได้ดังสมการที่ (3.15)

$$v_t = \frac{N_2}{3N_1}[2(v_{bn} - v_{cn}) - (v_{cn} - v_{an}) - (v_{an} - v_{bn})] \quad (3.15)$$

จัดรูปสมการที่ (3.15) ได้ดังสมการที่ (3.16)

$$v_t = \frac{N_2}{N_1}(v_{bn} - v_{cn}) \quad (3.16)$$

แทนค่า $v_{bn} = v_{sb}$ และ $v_{cn} = v_{sc}$ ลงในสมการที่ (3.16) ได้ดังสมการที่ (3.17)

$$v_t = \frac{N_2}{N_1}(v_{sb} - v_{sc}) \quad (3.17)$$

นำสมการที่ (3.2) และ (3.3) แทนลงในสมการที่ (3.17) แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$v_t = \frac{N_2}{N_1}(V_m \angle -120^\circ - V_m \angle 120^\circ)$$

$$= \frac{N_2}{N_1}V_m(1 \angle -120^\circ - 1 \angle 120^\circ)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{N_2}{N_1} V_m [(-0.5 - j0.866) - (-0.5 + j0.866)] \\
&= \frac{N_2}{N_1} V_m (-j1.732) \\
&= \sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} V_m (-j) \\
\therefore v_t &= \sqrt{3} V_m \frac{N_2}{N_1} \angle -90^\circ = \sqrt{3} V_m \frac{N_2}{N_1} \angle 270^\circ \quad (3.18)
\end{aligned}$$

จากการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเลอบลองค์ สามารถแสดงแรงดันไฟฟ้าเฟส m และเฟส t ได้ดังสมการที่ (3.12) และ (3.18) ตามลำดับ จากสมการดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า แรงดันไฟฟ้าเฟส m และเฟส t มีแอมพลิจูดเท่ากัน โดยมีค่าเท่ากับ $\sqrt{3} V_m \frac{N_2}{N_1}$ สำหรับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าทั้งสองเฟสมีค่าต่างกัน 90° โดยแรงดันไฟฟ้าเฟส m มีมุมเฟสเท่ากับ 180° ส่วนแรงดันไฟฟ้าเฟส t มีค่ามุมเฟสเท่ากับ 270° จากความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดที่มีขนาดเท่ากัน สามารถยืนยันได้ว่า การใช้หม้อแปลงเลอบลองค์เป็นหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟทำให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟ (ด้านเฟสรวม) มีลักษณะสมดุล ซึ่งเป็นการปรับปรุงความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการจ่ายโหลดของหม้อแปลง โดยกำหนดให้เป็นโหลดอิมพีแดนซ์ (Z) สามารถคำนวณกระแสโหลดเฟส m (i_{Lm}) และเฟส t (i_{Lt}) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง ได้ดังสมการที่ (3.19) และ (3.20) ตามลำดับ จากสมการกระแสไฟฟ้างกล่าวสังเกตได้ว่า ในกรณีที่โหลดมีค่าเท่ากัน กระแส i_{Lm} และ i_{Lt} จะมีแอมพลิจูดเท่ากัน แต่ในทางกลับกัน ถ้าโหลดมีค่าไม่เท่ากัน ส่งผลให้แอมพลิจูดของกระแส i_{Lm} และ i_{Lt} มีค่าไม่เท่ากันด้วย

$$\begin{aligned}
i_{Lm} &= \frac{\sqrt{3} V_m \frac{N_2}{N_1} \angle 180^\circ}{Z} \\
&= \sqrt{3} I_m \frac{N_2}{N_1} \angle 180^\circ \quad (3.19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_{L_t} &= \frac{\sqrt{3}V_m \frac{N_2}{N_1} \angle 270^\circ}{Z} \\
 &= \sqrt{3}I_m \frac{N_2}{N_1} \angle 270^\circ
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

โดยที่ $I_m = \frac{V_m}{Z}$

การจ่ายโหลดของหม้อแปลงส่งผลต่อโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ ($i_{S_a}, i_{S_b}, i_{S_c}$) โดยสามารถหาสมการความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้างกล่าวด้วยการพิจารณาความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.21) ถึง (3.23)

$$i_{ab} = -\frac{N_2}{N_1\sqrt{3}}i_{L_m} - \frac{N_2}{3N_1}i_{L_t} \tag{3.21}$$

$$i_{bc} = \frac{2N_2}{3N_1}i_{L_t} \tag{3.22}$$

$$i_{ca} = \frac{N_2}{N_1\sqrt{3}}i_{L_m} - \frac{N_2}{3N_1}i_{L_t} \tag{3.23}$$

พิจารณาความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าเมื่อต่อขดลวดของหม้อแปลงด้านปฐมภูมิแบบเดลตา ดังสมการที่ (3.24) ถึง (3.26) ตามลำดับ เพื่อหาสมการกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ

$$i_{S_a} = i_{ab} - i_{ca} \tag{3.24}$$

$$i_{S_b} = i_{bc} - i_{ab} \tag{3.25}$$

$$i_{S_c} = i_{ca} - i_{bc} \tag{3.26}$$

นำสมการที่ (3.21) และ (3.23) แทนลงในสมการที่ (3.24) จะได้กระแสไฟฟ้าเฟส a ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (i_{Sa}) แสดงได้ดังสมการที่ (3.27)

$$\begin{aligned}
 i_{Sa} &= i_{ab} - i_{ca} \\
 &= \left(-\frac{N_2}{N_1\sqrt{3}} i_{Lm} - \frac{N_2}{3N_1} i_{Lt} \right) - \left(\frac{N_2}{N_1\sqrt{3}} i_{Lm} - \frac{N_2}{3N_1} i_{Lt} \right) \\
 \therefore i_{Sa} &= -\frac{2N_2}{\sqrt{3}N_1} i_{Lm} \tag{3.27}
 \end{aligned}$$

กระแสไฟฟ้าเฟส b ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (i_{Sb}) ในสมการที่ (3.28) พิจารณาได้ โดยนำสมการที่ (3.21) และ (3.22) แทนลงในสมการที่ (3.25)

$$\begin{aligned}
 i_{Sb} &= i_{bc} - i_{ab} \\
 &= \left(\frac{2N_2}{3N_1} i_{Lt} \right) - \left(-\frac{N_2}{N_1\sqrt{3}} i_{Lm} - \frac{N_2}{3N_1} i_{Lt} \right) \\
 \therefore i_{Sb} &= \frac{N_2}{\sqrt{3}N_1} i_{Lm} + \frac{N_2}{N_1} i_{Lt} \tag{3.28}
 \end{aligned}$$

สำหรับกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเฟส c (i_{Sc}) สามารถพิจารณาได้จากการนำสมการที่ (3.22) และ (3.23) แทนลงในสมการที่ (3.26) ดังนั้น กระแส i_{Sc} แสดงได้ดังสมการที่ (3.29)

$$\begin{aligned}
 i_{Sc} &= i_{ca} - i_{bc} \\
 &= \left(\frac{N_2}{N_1\sqrt{3}} i_{Lm} - \frac{N_2}{3N_1} i_{Lt} \right) - \left(\frac{2N_2}{3N_1} i_{Lt} \right)
 \end{aligned}$$

$$\therefore i_{sc} = \frac{N_2}{\sqrt{3}N_1} i_{Lm} - \frac{N_2}{N_1} i_{Lt} \quad (3.29)$$

จากสมการ (3.27) ถึง (3.29) สามารถอธิบายกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเลอบลองค์ ได้ว่า กระแสไฟฟ้าเฟส a (i_{sa}) จะปรากฏเมื่อมีการจ่ายโหลดทางด้านทุติยภูมิที่เฟส m ในส่วนของกระแสไฟฟ้าเฟส b (i_{sb}) และเฟส c (i_{sc}) ค่าส่วนนี้จะปรากฏเมื่อมีการจ่ายโหลดที่เฟสใดเฟสหนึ่งทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง หรือมีการจ่ายโหลดพร้อมกันทั้งเฟส m และเฟส t นอกจากนี้ สามารถพิจารณาการจ่ายโหลดของหม้อแปลงเลอบลองค์ในลักษณะโหลดสมดุลและโหลดไม่สมดุล ได้ดังนี้

- พิจารณาการจ่ายโหลดเฟส m และเฟส t แบบสมดุล

กำหนดให้กระแสโหลดเฟส m และเฟส t มีแอมพลิจูดเท่ากัน และมุมต่างกัน 90 องศา แสดงได้ดังสมการที่ (3.30) และ (3.31) ตามลำดับ

$$i_{Lm} = \sqrt{3}I_m \angle 180^\circ \quad (3.30)$$

$$i_{Lt} = \sqrt{3}I_m \angle 270^\circ \quad (3.31)$$

นำสมการที่ (3.30) และ (3.31) แทนในสมการกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ ดังสมการ (3.27) ถึง (3.29) ได้ดังนี้

$$i_{sa} = \left(-\frac{2N_2}{\sqrt{3}N_1} \right) \times (\sqrt{3}I_m \angle 180^\circ)$$

$$\therefore i_{sa} = 2I_m \frac{N_2}{N_1} \angle 0^\circ \quad (3.32)$$

$$i_{sb} = \left[\left(\frac{N_2}{\sqrt{3}N_1} \right) \times (\sqrt{3}I_m \angle 180^\circ) \right] + \left[\left(\frac{N_2}{N_1} \right) \times (\sqrt{3}I_m \angle 270^\circ) \right]$$

$$= \left[\frac{N_2}{N_1} I_m \angle 180^\circ \right] + \left[\sqrt{3}I_m \frac{N_2}{N_1} \angle 270^\circ \right]$$

$$= \frac{N_2}{N_1} I_m \left[(1 \angle 180^\circ) + (\sqrt{3} \angle 270^\circ) \right]$$

$$= \frac{N_2}{N_1} I_m (2 \angle -120^\circ)$$

$$\therefore i_{sb} = 2I_m \frac{N_2}{N_1} \angle -120^\circ \quad (3.33)$$

$$i_{sc} = \left[\left(\frac{N_2}{\sqrt{3}N_1} \right) \times (\sqrt{3}I_m \angle 180^\circ) \right] - \left[\left(\frac{N_2}{N_1} \right) \times (\sqrt{3}I_m \angle 270^\circ) \right]$$

$$= \left[\frac{N_2}{N_1} I_m \angle 180^\circ \right] - \left[\sqrt{3}I_m \frac{N_2}{N_1} \angle 270^\circ \right]$$

$$= \frac{N_2}{N_1} I_m \left[(1 \angle 180^\circ) - (\sqrt{3} \angle 270^\circ) \right]$$

$$= \frac{N_2}{N_1} I_m (2 \angle 120^\circ)$$

$$\therefore i_{sc} = 2I_m \frac{N_2}{N_1} \angle 120^\circ \quad (3.34)$$

กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ในสมการที่ (3.32) ถึง (3.34) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เมื่อกระแสไหลตเฟส m และเฟส t มีลักษณะสมดุล และมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีขนาดเท่ากันทั้งสามเฟส และมีมุมเฟสต่างกัน 120° ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเลอบลองค์มีลักษณะสมดุล และมีคุณสมบัติเป็นค่าทางไฟฟ้าลำดับเฟสบวก เมื่อกระแสไหลตมีลักษณะสมดุล

- พิจารณาการจ่ายไหลตเฟส m และเฟส t แบบไม่สมดุล

กำหนดให้กระแสไหลตเฟส m มีแอมพลิจูดเป็นสองเท่าของกระแสไหลตเฟส t โดยกระแส i_{Lm} แสดงได้ดังสมการที่ (3.35) และกระแส i_{Lt} แสดงได้ดังสมการที่ (3.31)

$$i_{Lm} = 2\sqrt{3}I_m \angle 180^\circ \quad (3.35)$$

เมื่อแทนค่ากระแสโวลต์ทั้งสองเฟสจากสมการที่ (3.35) และ (3.31) ลงในสมการกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ ดังสมการ (3.27) ถึง (3.29) จะได้

$$\begin{aligned} i_{Sa} &= \left(-\frac{2N_2}{\sqrt{3}N_1} \right) \times (2\sqrt{3}I_m \angle 180^\circ) \\ &= -4 \frac{N_2}{N_1} I_m \angle 180^\circ \\ \therefore i_{Sa} &= 4I_m \frac{N_2}{N_1} \angle 0^\circ \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} i_{Sb} &= \left[\left(\frac{N_2}{\sqrt{3}N_1} \right) \times (2\sqrt{3}I_m \angle 180^\circ) \right] + \left[\left(\frac{N_2}{N_1} \right) \times (\sqrt{3}I_m \angle 270^\circ) \right] \\ &= \left[2 \frac{N_2}{N_1} I_m \angle 180^\circ \right] + \left[\sqrt{3} I_m \frac{N_2}{N_1} \angle 270^\circ \right] \\ &= \frac{N_2}{N_1} I_m \left[(2 \angle 180^\circ) + (\sqrt{3} \angle 270^\circ) \right] \\ &= \frac{N_2}{N_1} I_m (2.65 \angle -140^\circ) \\ \therefore i_{Sb} &= 2.65 I_m \frac{N_2}{N_1} \angle -140^\circ \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$i_{Sc} = \left[\left(\frac{N_2}{\sqrt{3}N_1} \right) \times (2\sqrt{3}I_m \angle 180^\circ) \right] - \left[\left(\frac{N_2}{N_1} \right) \times (\sqrt{3}I_m \angle 270^\circ) \right]$$

$$\begin{aligned}
&= \left[2 \frac{N_2}{N_1} I_m \angle 180^\circ \right] - \left[\sqrt{3} I_m \frac{N_2}{N_1} \angle 270^\circ \right] \\
&= \frac{N_2}{N_1} I_m \left[(2 \angle 180^\circ) - (\sqrt{3} \angle 270^\circ) \right] \\
&= \frac{N_2}{N_1} I_m (2.65 \angle 140^\circ) \\
\therefore i_{sc} &= 2.65 I_m \frac{N_2}{N_1} \angle 140^\circ \tag{3.38}
\end{aligned}$$

การพิจารณาการจ่ายโหลดแบบไม่สมดุล พบว่า เมื่อกระแสโหลดเฟส m และเฟส t มีลักษณะไม่สมดุล ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีขนาดไม่เท่ากันทั้งสามเฟส ส่วนมุมเฟสต่างกันไม่เท่ากับ 120° ดังแสดงในสมการที่ (3.26) ถึง (3.28) ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่า เมื่อกระแสโหลดมีลักษณะไม่สมดุล จะส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้า i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะไม่สมดุลด้วยเช่นกัน

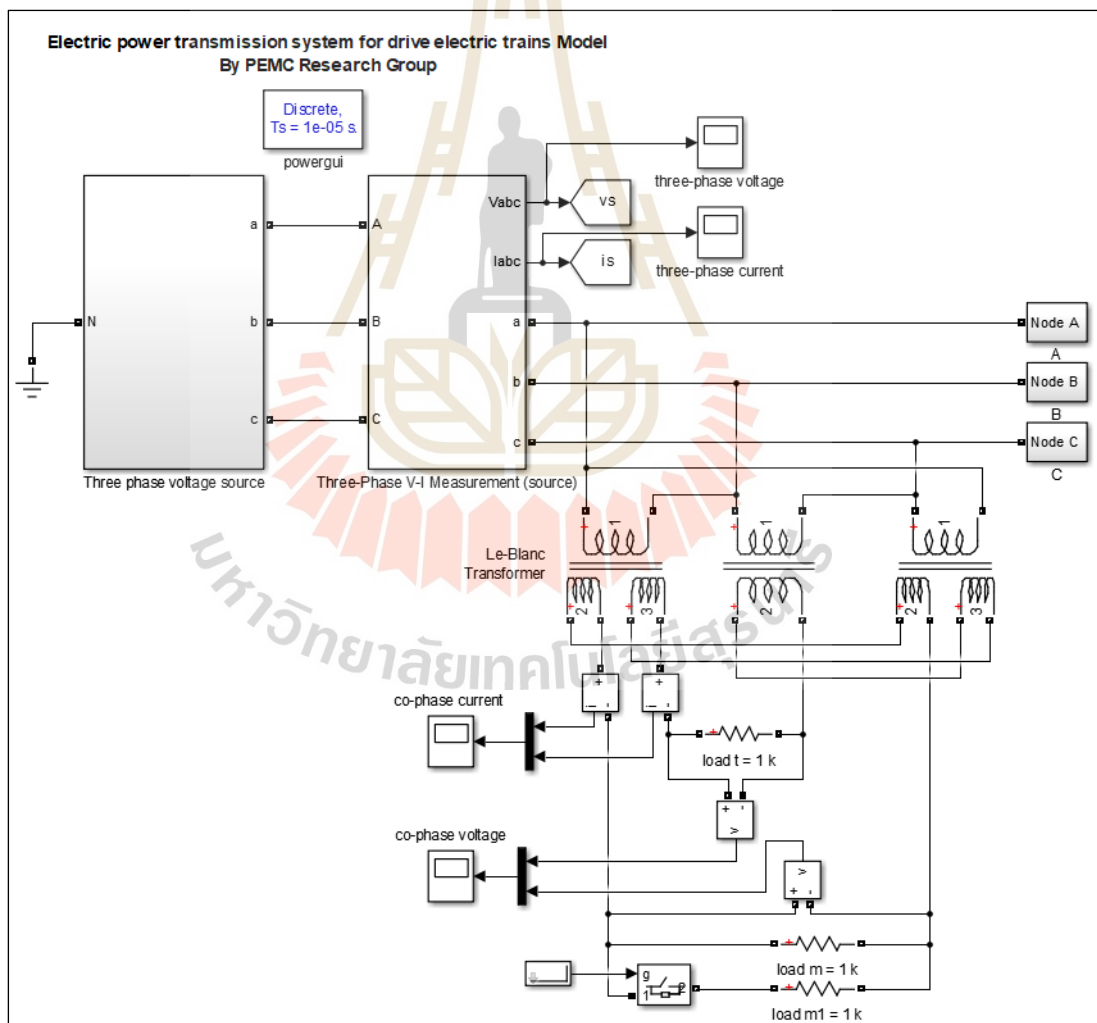
การวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้างานต้น แสดงให้เห็นว่า การใช้หม้อแปลงเลอบลองค์ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้างานต้นช่วยลดปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าด้านเฟสร่วม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้า v_m มีแอมพลิจูดเท่ากับ v_t ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sqrt{3} V_m \frac{N_2}{N_1}$ และมีมุมเฟสต่างกัน 90° ในส่วนของกระแสไฟฟ้า i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} จะมีค่าขึ้นอยู่กับ การจ่ายกระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้า ในกรณีที่กระแสโหลดมีแอมพลิจูดเท่ากัน จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีลักษณะสมดุล โดยมีแอมพลิจูดเท่ากับ $2 I_m \frac{N_2}{N_1}$ และมุมเฟสต่างกัน 120° แต่ในกรณีที่กระแสโหลดมีแอมพลิจูดแตกต่างกัน จะทำให้กระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีลักษณะไม่สมดุล การแก้ปัญหาค่าความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะได้รับการพิจารณาในบทต่อไป

3.2.2 การจำลองสถานการณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้างานต้น

การวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้างานต้น ที่ได้ดำเนินการมาทั้งหมดในข้างต้น สามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมการแรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสร่วม (v_m , v_t) รวมทั้งกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้างานต้น (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) เพื่อให้สมการมีความน่าเชื่อถือ สำหรับนำไปใช้พิจารณาการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย การกำจัดกระแสฮาร์โมนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และ

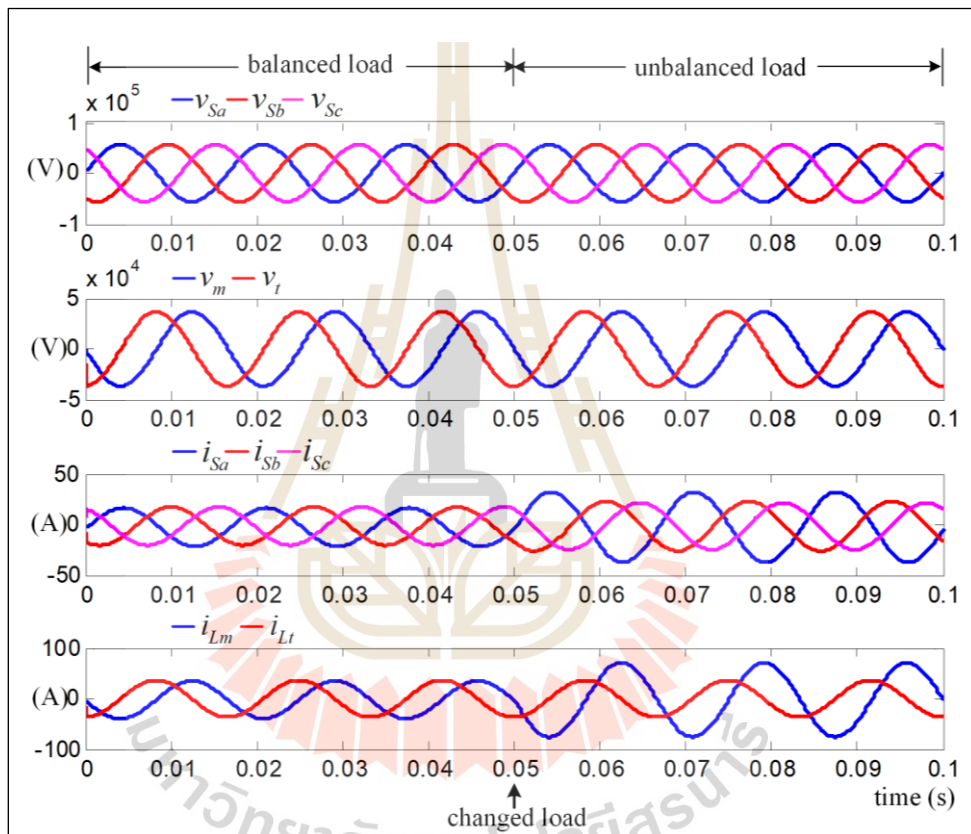
การชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล โดยการจำลองสถานการณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟด้วยคอมพิวเตอร์ ที่ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ผ่านชุดบล็อก simpower systems เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากการที่ได้นำเสนอข้างต้น โดยมีรายละเอียดการตรวจสอบ ดังนี้

การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 จากรูปดังกล่าว ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุลพิกัด 69 kV ความถี่ 60 Hz มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าลำดับเฟสบวก ทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหม้อแปลงเลอบลองค์ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ โดยมีอัตราส่วนของขดลวด ($N_1 : N_2$) เท่ากับ 69:26 เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้า 69 kV เป็น 26 kV และแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวมสำหรับโหลดของ



รูปที่ 3.5 การจำลองสถานการณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ระบบรางไฟฟ้ากำหนดให้ใช้โพลดิอิมพีแดนซ์ (Z) แทนโพลครลไฟความเร็วสูง (EMU high-speed train) ซึ่งทำการทดสอบแบ่งออกเป็นสองสถานการณ์ ประกอบด้วย สถานการณ์ที่หนึ่งตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.05 วินาที คือ พิจารณาโพลสมดุล โดยกำหนดให้โพลดิอิมพีแดนซ์เฟส m และเฟส t มีค่าเท่ากับ $1 \text{ k}\Omega$ ($Z_m = Z_t = 1 \text{ k}\Omega$) และสถานการณ์ที่สองตั้งแต่เวลา 0.05 ถึง 0.1 วินาที คือ พิจารณาโพลไม่สมดุล โดยกำหนดให้โพลดิอิมพีแดนซ์เฟส m และเฟส t มีค่าเท่ากับ $0.5 \text{ k}\Omega$ และ $1 \text{ k}\Omega$ ($Z_m = 0.5 \text{ k}\Omega, Z_t = 1 \text{ k}\Omega$) ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 ผลการจำลองสถานการณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขบวนรถไฟฟ้า

ผลการจำลองสถานการณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขบวนรถไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 จากรูปดังกล่าว พบว่า เมื่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุลให้กับหม้อแปลงลอบล็อกที่สถานีไฟฟ้าขบวนรถไฟฟ้า ทำให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขบวนรถไฟฟ้ามีแรงดันไฟฟ้าเฟส m และเฟส t เท่ากับ $26\angle 180^\circ \text{ kV}$ และ $26\angle 270^\circ \text{ kV}$ ตามลำดับ ทั้งในกรณีโพลสมดุลและกรณีโพลไม่สมดุล ซึ่งสังเกตได้ว่าแรงดันไฟฟ้าทั้งสองเฟสมีขนาดเท่ากัน และมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา ค่าดังกล่าวสอดคล้องกับสมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้

ดังสมการที่ (3.12) และ (3.18) ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่า การเชื่อมต่อหม้อแปลงเลอบลองค์ที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้าส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าด้านเฟสรวมนี้อาจมีลักษณะสมดุล

ในส่วนของกระแสไฟฟ้า พบว่า กรณีโหลดสมดุล แอมพลิจูดของกระแสโหลดเฟส m และเฟส t มีค่าเท่ากัน โดยกระแส i_{Lm} มีค่าเท่ากับ $26\angle 180^\circ$ A และ i_{Lt} มีค่าเท่ากับ $26\angle 270^\circ$ A ตามลำดับ ทำให้กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีลักษณะสมดุล โดยค่ากระแส i_{Sa}, i_{Sb} และ i_{Sc} ได้เท่ากับ $13.33\angle 0^\circ$ A, $13.33\angle -120^\circ$ A, $13.33\angle 120^\circ$ A ตามลำดับ และในกรณีโหลดไม่สมดุลกระแสโหลดที่เฟส m มีแอมพลิจูดมากกว่ากระแสโหลดที่เฟส t สองเท่า โดยกระแส i_{Lm} มีค่าเท่ากับ $52\angle 180^\circ$ A และ i_{Lt} มีค่าเท่ากับ $26\angle 270^\circ$ A เมื่อพิจารณากระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง พบว่า กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงมีลักษณะไม่สมดุล โดยกระแส i_{Sa}, i_{Sb} และ i_{Sc} มีค่าเท่ากับ $24.59\angle 0^\circ$ A, $17.38\angle -140^\circ$ A, $16.33\angle 140^\circ$ A ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว สามารถแสดงตารางเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และผลการคำนวณจากสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ข้างต้น ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบผลจากการจำลองสถานการณ์และผลจากการคำนวณ

แรงดันไฟฟ้า		ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการคำนวณ
แรงดันไฟฟ้า ทางด้านปฐมภูมิ	เฟส a	$69\angle 0^\circ$ kV	$69\angle 0^\circ$ kV
	เฟส b	$69\angle -120^\circ$ kV	$69\angle -120^\circ$ kV
	เฟส c	$69\angle 120^\circ$ kV	$69\angle 120^\circ$ kV
แรงดันไฟฟ้า ทางด้านเฟสรวม	เฟส m	$26\angle 180^\circ$ kV	$26\angle 180^\circ$ kV
	เฟส t	$26\angle 270^\circ$ kV	$26\angle 270^\circ$ kV
กรณีโหลดสมดุล			
กระแสไฟฟ้า		ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการคำนวณ
กระแสไฟฟ้า ด้านปฐมภูมิ	เฟส a	$13.33\angle 0^\circ$ A	$11.32\angle 0^\circ$ A
	เฟส b	$13.33\angle -120^\circ$ A	$11.32\angle -120^\circ$ A
	เฟส c	$13.33\angle 120^\circ$ A	$11.32\angle 120^\circ$ A
กระแสไฟฟ้า ทางด้านเฟสรวม	เฟส m	$26\angle 180^\circ$ A	$26\angle 180^\circ$ A
	เฟส t	$26\angle 270^\circ$ A	$26\angle 270^\circ$ A
กรณีโหลดไม่สมดุล			
กระแสไฟฟ้า ทางด้านสามเฟส	เฟส a	$24.59\angle 0^\circ$ A	$22.63\angle 0^\circ$ A
	เฟส b	$17.38\angle -140^\circ$ A	$14.97\angle -140^\circ$ A
	เฟส c	$16.33\angle 140^\circ$ A	$14.97\angle 140^\circ$ A
กระแสไฟฟ้า ทางด้านเฟสรวม	เฟส m	$52\angle 180^\circ$ A	$52\angle 180^\circ$ A
	เฟส t	$26\angle 270^\circ$ A	$26\angle 270^\circ$ A

จากผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 3.1 สังเกตได้ว่า แรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสรวมที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และการคำนวณมีค่าเท่ากัน ส่วนกระแสไฟฟ้าจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองสถานการณ์มีผลของอิมพีแดนซ์ภายในหม้อแปลงมาเกี่ยวข้อง ส่วนผลการคำนวณไม่พิจารณาอิมพีแดนซ์ภายในหม้อแปลง แต่อย่างไรก็ตาม แนวโน้มความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิของหม้อแปลงจากการจำลองสถานการณ์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการคำนวณ ด้วยเหตุนี้ ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่า สมการแรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสรวมและกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ได้นำเสนอมีความถูกต้อง สามารถนำไปใช้ในการพิจารณาการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลของรางไฟฟ้าที่พิจารณา

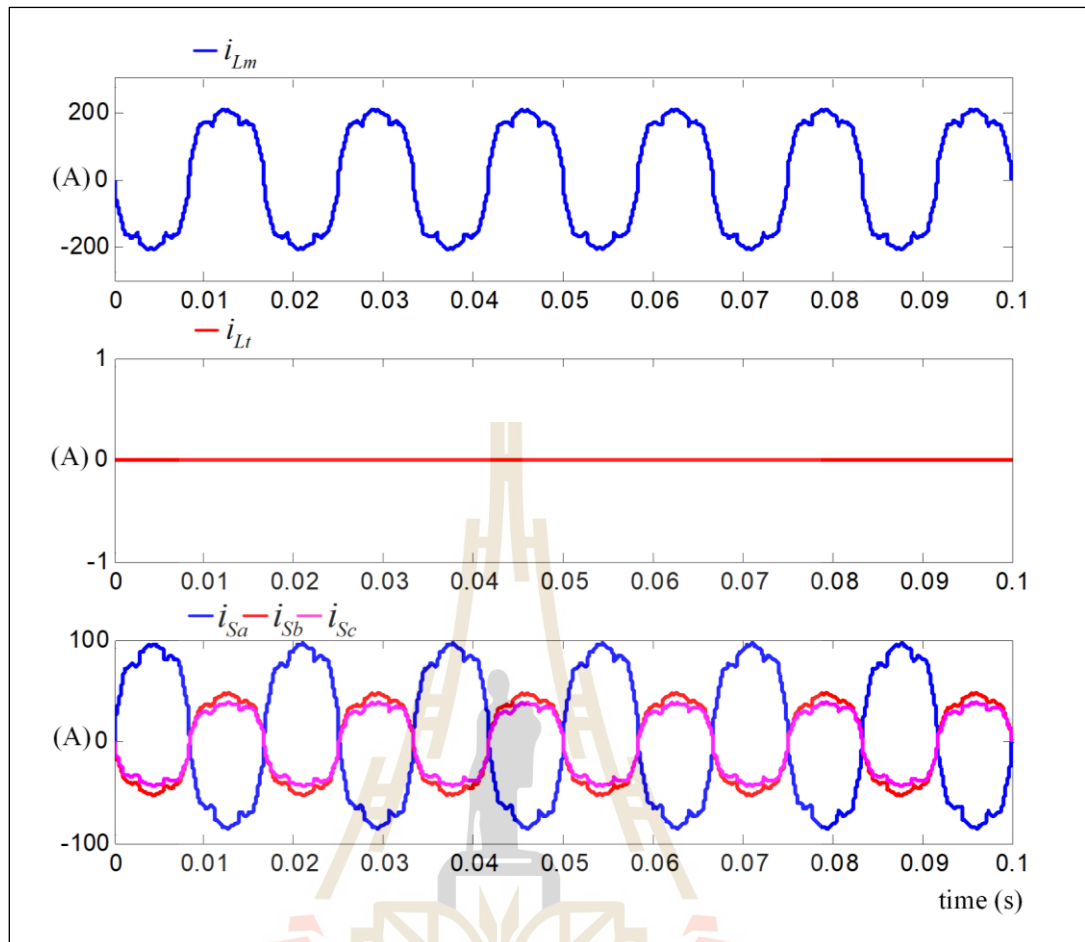
3.3 โหลดของระบบรางไฟฟ้า

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดของระบบรางไฟฟ้า นั่นก็คือ โหลดรถไฟความเร็วสูง ซึ่งประกอบด้วย วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟส ระบบอาณัติสัญญาณ และอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในตู้โดยสาร เป็นต้น การใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิก ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ และกระแสโหลดไม่สมดุล ซึ่งปัญหาเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อระบบรางไฟฟ้า เช่น ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า (L. Weijun, et al., 2016) (W. Song, et al., 2019) เกิดการรบกวนต่อระบบสื่อสารและระบบอาณัติสัญญาณสำหรับควบคุมรถไฟ (F. Foley, 2011) (H. Zhengyou, et al., 2016) เกิดปัญหาการรั่วแรงดันไฟฟ้าที่หม้อรับไฟฟ้า (L. Guo, et al., 2015) (Y. Song, et al., 2020) เกิดการรบกวนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าขณะใช้งาน (C. Charalambous, et al., 2018) อุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าทำงานผิดพลาดและทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ มีอายุการใช้งานที่สั้นลง (IEEE, 1993) (W. Brumsickle, et al., 2005) เป็นต้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ พิจารณาลักษณะเฉพาะของกระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้าจากงานวิจัยของ H. Sy-Ruen และคณะ (H. Sy-Ruen, and C. Bing-Nan, 2002) ซึ่งมีข้อมูลกระแสโหลดประกอบด้วย องค์ประกอบของกระแสมูลฐานและองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจริง ณ สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ ดังตารางที่ 3.2 ข้อมูลดังกล่าวได้จากการคำนวณค่าเฉลี่ยจากการบันทึกกระแสโหลดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟทุก ๆ หนึ่งชั่วโมง เป็นเวลาหนึ่งเดือน โดยผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลดังกล่าวเปรียบเสมือนโหลดรถไฟความเร็วสูงหนึ่งขบวน ซึ่งแทนข้อมูลกระแสมูลฐานและกระแสฮาร์มอนิกด้วยแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติ

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลกระแสไหลของระบบแรงไฟฟ้า

Harmonic order	26 kV Side (m-phase)	
	%	I_m (A)
1	100.000	221.000
3	18.100	39.900
5	11.820	26.110
7	2.610	5.760
11	1.910	4.224
13	1.303	2.880
17	1.911	4.224
19	2.260	4.992
23	1.010	2.230
25	0.566	1.250
29	0.740	1.630
31	1.130	2.496
35	0.521	1.152
37	0.521	1.152
41	0.475	1.050
43	0.390	0.860
47	0.475	1.050
49	0.566	1.250
$THD_{av,i}(\%)$	22.20	

จากข้อมูลกระแสไหลของระบบแรงไฟฟ้าในตารางที่ 3.2 สามารถแสดงรูปสัญญาณกระแสไหลที่เฟส m และเฟส t ของระบบแรงไฟฟ้า ได้ดังรูปที่ 3.7 จากรูปดังกล่าว พบว่า ระบบที่พิจารณา มีการใช้งานโหลดรูดความเร็วสูงเฉพาะเฟส m เท่านั้น ซึ่งรูปสัญญาณกระแส i_{Lm} มีลักษณะผิดเพี้ยนจากรูปสัญญาณไซน์ ส่วนรูปสัญญาณกระแส i_{Lt} มีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากไม่จ่ายโหลดรูดความเร็วสูงที่เฟส t นอกจากนี้ เมื่อทำการจำลองสถานการณ์โดยการจำลองสถานการณ์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้างวดรูปที่ 3.5 โดยใช้กระแสไหลของระบบแรงไฟฟ้าข้างต้น พบว่า กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเลอบลองค์ (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) มีรูปสัญญาณผิดเพี้ยนจากรูปสัญญาณไซน์ และมีลักษณะไม่สมดุล ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 รูปสัญญาณกระแสโหลดและกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณา

จากรูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} ดังรูปที่ 3.7 สามารถบ่งชี้คุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยการพิจารณาจากดัชนีชี้วัดคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่ประกอบด้วย ดัชนีชี้วัดแรก คือ ข้อกำหนดปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิก (total harmonic current distortion: %THD_i), อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ดังสมการที่ (3.39)

$$\%THD_n = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{50} I_{Sn,h}^2}{I_{Sn,1}^2}} \times 100\% \quad ; n = a, b, c \quad (3.39)$$

โดยที่ $I_{Sn,h}$ คือ แอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังที่สถานีขับเคลื่อน
รถไฟฟ้าอันดับฮาร์โมนิก (h) ใด ๆ

ดัชนีชี้วัดที่สอง คือ ข้อกำหนดความสมดุลของกระแสที่แหล่งจ่าย อ้างอิงตามมาตรฐาน
IEEE standard 141-1993 โดยค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบความไม่สมดุลของกระแส (current
unbalanced factor: %CUF) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.40) โดยที่ $I_{S1(-)}$ คือ แอมพลิจูด
ของกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังลำดับเฟสลบที่ความถี่มูลฐาน และ $I_{S1(+)}$ คือ
แอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังลำดับเฟสบวกที่ความถี่มูลฐาน

$$\%CUF = \frac{I_{S1(-)}}{I_{S1(+)}} \times 100\% \quad (3.40)$$

ดัชนีชี้วัดที่สาม คือ ค่าตัวประกอบกำลัง (power factor: PF) ดังสมการที่ (3.41) อ้างอิง
ตามมาตรฐาน IEEE standard 1459-2010 โดยที่ค่ากำลังไฟฟารวม (P) อธิบายได้ดังสมการที่
(3.42) และค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) แสดงได้ดังสมการที่ (3.43)

$$PF = \frac{P}{S} \quad (3.41)$$

$$P = \sum_n \sum_h V_{S,nh} I_{Sn,h} \cos(\phi_{nh}) \quad ; n = a, b, c \quad (3.42)$$

$$S = V_S \cdot I_S = \sqrt{V_{Sa}^2 + V_{Sb}^2 + V_{Sc}^2} \cdot \sqrt{I_{Sa}^2 + I_{Sb}^2 + I_{Sc}^2} \quad (3.43)$$

โดยที่ ϕ_{nh} คือ ผลต่างมุมเฟสเลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายและกระแสไฟฟ้าทางด้าน
ปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลัง

จากการคำนวณดัชนีชี้วัดคุณภาพกระแสไฟฟ้าของรูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} , และ i_{sc} ใน
รูปที่ 3.7 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.3 ซึ่งค่าเหล่านี้สูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นสามารถบ่ง
บอกได้ว่า การใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงทำให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า ประกอบ
ไปด้วย ปัญหาการเกิดกระแสฮาร์โมนิก ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ และโหลดไม่สมดุล ดังนั้น งานวิจัย
วิทยานิพนธ์นี้ จึงมุ่งเน้นการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า โดยพิจารณาการ

กำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุล ให้กลับสู่สภาวะสมดุล การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าดังกล่าวทำการพิจารณากระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้าเป็นสำคัญ

ตารางที่ 3.3 ดัชนีชี้วัดคุณภาพกระแสไฟฟ้า

%THD _i			%CUF	PF
เฟส a	เฟส b	เฟส c		
21.46	19.62	23.67	99.25	0.67

3.4 สรุป

โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าทั้ง 2 ส่วนที่ได้นำเสนอในบทนี้ มีพื้นฐานมาจากการพิจารณา ระบบรางไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟความเร็วสูง ซึ่งเป็นโครงสร้างระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบ เฟสรวม โครงสร้างระบบรางไฟฟ้าที่ผู้วิจัยทำการศึกษามีหม้อแปลงเลอบลอคค์เป็นหม้อแปลงกำลังที่ สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟไฟฟ้าทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านเฟสรวมมีลักษณะสมดุล ถือเป็นการปรับปรุง คุณภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า สำหรับกระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง หรือเรียกว่า กระแสไฟฟ้าด้านสามเฟส จะขึ้นอยู่กับกระแสไหลของระบบรางไฟฟ้าทางด้านเฟสรวม ดังนั้น การกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่ สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลของระบบรางไฟฟ้า ทำได้โดยการปรับปรุงกระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิ ของหม้อแปลงให้มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์และมีค่าลักษณะสมดุล ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพ กระแสไฟฟ้าทางด้านเฟสรวมจะใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบราง ไฟฟ้าทางด้านเฟสรวม รายละเอียดของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพ กระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าจะได้รับการนำเสนอในบทต่อไป

บทที่ 4

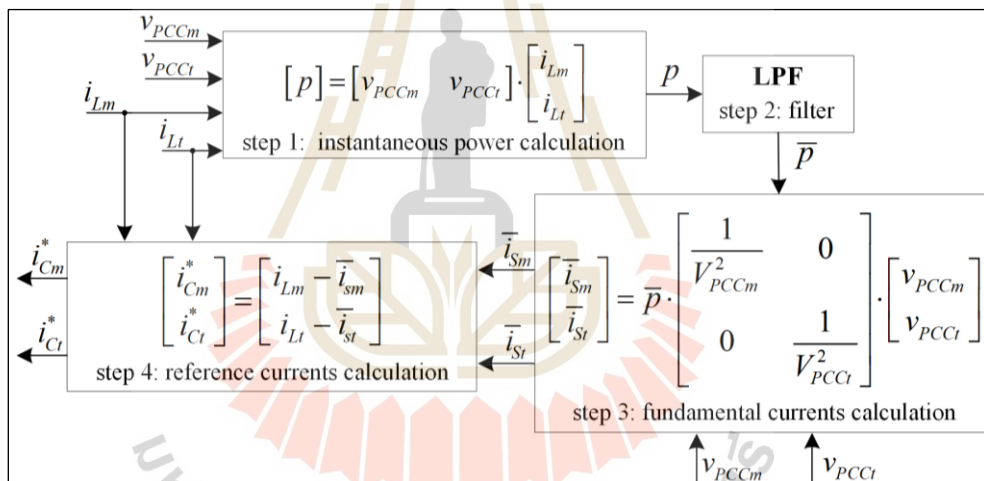
การคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้า

4.1 บทนำ

การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟจำเป็นต้องมีการตรวจจับฮาร์มอนิกและการตรวจจับค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการชดเชย เพื่อคำนวณหา ค่ากระแสอ้างอิงให้กับระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ จากการสำรวจ งานวิจัยในอดีต พบว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกแบบดั้งเดิมที่มีสมรรถนะที่ดีและนิยมใช้งานกันอย่าง แพร่หลายมีหลายวิธี เช่น วิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง (H. Akagi, et al., 1984) วิธีการตรวจจับซิงโครนัส (C. Chen, et al., 1992) วิธีแกนหมุนดีคิวหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าวิธีการรอบอ้างอิงซิงโครนัส (M. Takeda, et al., 1988) วิธีการรอบอ้างอิง $a-b-c$ (G. Chang and T. Shee, 2002) และวิธีการตัด ออกฮาร์มอนิกแบบสมบูร์น (N. Dai, et al., 2011) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีการคำนวณกระแสอ้างอิงที่ แตกต่างกัน ผู้วิจัยเล็งเห็นว่า การตรวจจับซิงโครนัสมีจุดเด่นในด้านรูปแบบการคำนวณที่หลากหลาย สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกและตรวจจับค่ากำลังไฟฟ้าตามวัตถุประสงค์ การชดเชยที่ต้องการ อีกทั้งการตรวจจับซิงโครนัสมีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยกว่าวิธีการอื่น ส่งผลให้มีความรวดเร็วในการคำนวณ อย่างไรก็ตาม การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับ ซิงโครนัส รวมทั้ง วิธีกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง วิธีแกนหมุนดีคิว และวิธีการตัดออกฮาร์มอนิกแบบสมบูร์น มีจุดด้อยในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกออกจากปริมาณมูลฐาน ผู้วิจัยจึงได้นำการวิเคราะห์ฟูริเยร์ วินโดว์เลื่อน (M. El-Habrouk and M. Darwish, 2001) ที่มีจุดเด่นในด้านการแยกปริมาณฮาร์มอนิ กออกจากปริมาณมูลฐานมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวิธีการตรวจจับซิงโครนัส เพื่อเพิ่มสมรรถนะการ คำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ นอกจากนี้ จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมใน งานวิจัยของ Haitao และคณะ (H. Haitao, et al., 2018) พบว่า ระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบ เฟสรวมที่ใช้สำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟความเร็วสูงเกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นในระบบส่งจ่าย ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสรวมมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ด้วยเหตุนี้ การ คำนวณค่ากระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟจึงเกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ ดำเนินการพัฒนาคำนวณกระแสอ้างอิงเพื่อให้สามารถรองรับสถานะที่แหล่งจ่ายแรงดันมีลักษณะ ผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ โดยนำเทคนิคการตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวก (M. Aredes, et al., 1997) มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับการตรวจจับซิงโครนัส และการวิเคราะห์ฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการที่พัฒนาขึ้นใหม่ เรียกว่า “การตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่ม สมรรถนะ (Enhanced Synchronous Detection: ESD)” ขั้นตอนการคำนวณ การออกแบบในส่วน ต่าง ๆ และการเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสและการ ตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะได้ถูกนำเสนออย่างละเอียดในบทนี้

4.2 การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส

การตรวจจับซิงโครนัส (synchronous detection) หรือเรียกว่า วิธี SD ถูกนำเสนอโดย Chen และคณะในปี ค.ศ. 1994 โดยการตรวจจับซิงโครนัส สามารถแบ่งรูปแบบการคำนวณออกเป็น 3 รูปแบบ คือ รูปแบบกระแสไฟฟ้าเท่ากัน หรือเรียกว่า วิธี CSD รูปแบบกำลังไฟฟ้าเท่ากัน หรือเรียกว่า วิธี PSD และรูปแบบอิมพีแดนซ์เท่ากัน หรือเรียกว่า วิธี ZSD ทั้งสามรูปแบบใช้อินพุตสำหรับการคำนวณที่เหมือนกัน คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling : PCC) และค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลด ส่วนเอาต์พุตของการคำนวณ คือ ค่ากระแสอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งเดิมวิธีการตรวจจับซิงโครนัสใช้สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบสามเฟส แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการตรวจจับซิงโครนัสสำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบแรงไฟฟ้าแบบเฟสรวม ไดอะแกรมการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส

ขั้นที่ 1 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง (p) จากผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (v_{PCCm} , v_{PCCt}) กับกระแสโหลด (i_{Lm} , i_{Lt}) ของเฟส m และเฟส t ดังสมการ (4.1) ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง ประกอบด้วย ผลรวมของค่ากำลังไฟฟ้าสัญญาณตรงเฟส m (\bar{p}_m) ค่ากำลังไฟฟ้าสัญญาณสลับเฟส m (\tilde{p}_m) ค่ากำลังไฟฟ้าสัญญาณตรงเฟส t (\bar{p}_t) และค่ากำลังไฟฟ้าสัญญาณสลับเฟส t (\tilde{p}_t) โดยที่ ส่วนที่เป็นค่าทางไฟฟ้าสัญญาณตรงเปรียบเสมือนปริมาณที่ความถี่มูลฐาน และส่วนที่เป็นค่าทางไฟฟ้าสัญญาณสลับเปรียบเสมือนปริมาณที่ความถี่ฮาร์มอนิก

$$p = (v_{PCCm} \times i_{Lm}) + (v_{PCCt} \times i_{Lt}) = \bar{p}_m + \tilde{p}_m + \bar{p}_t + \tilde{p}_t \quad (4.1)$$

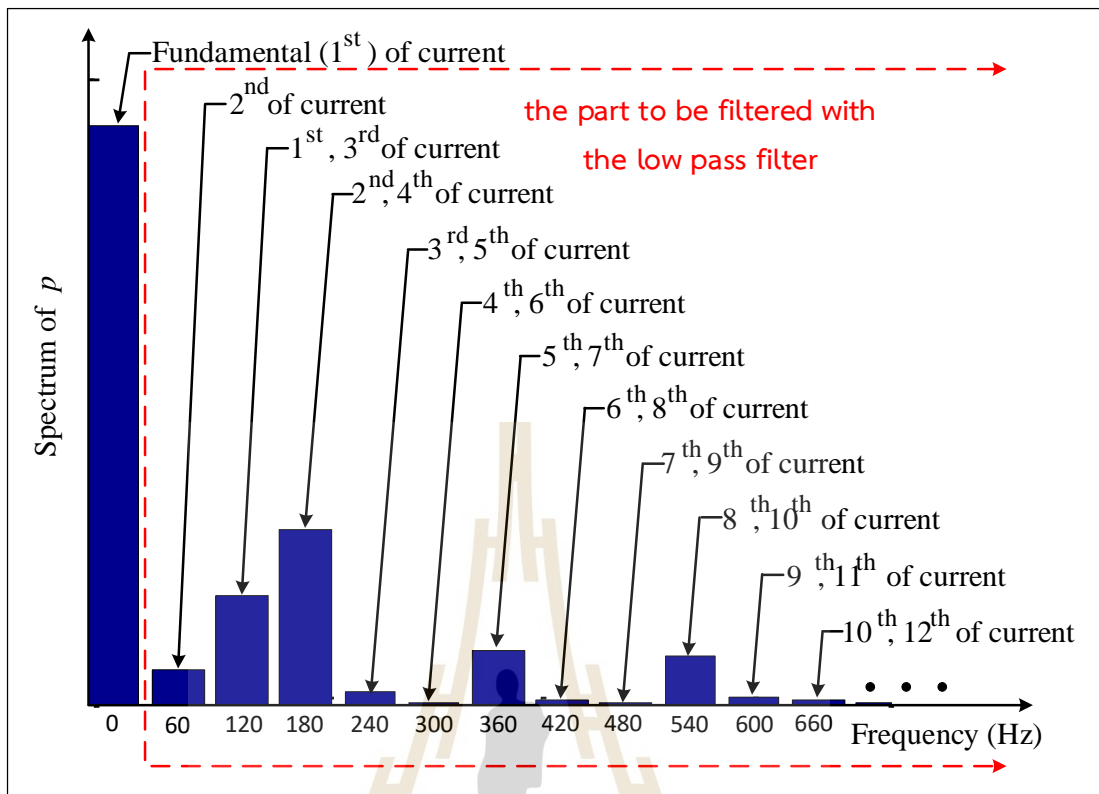
ขั้นที่ 2 พิจารณาเฉพาะค่าผลรวมของปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานเฟส m และเฟส t (\bar{p}) ดังสมการที่ (4.2) โดยอาศัยวงจรกรองผ่านต่ำ (Low Pass Filter : LPF) จากบล็อก “filter” เพื่อแยกค่าดังกล่าวออกจากค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง

$$p = \bar{p}_m + \bar{p}_t \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.1 ปริมาณฮาร์มอนิกที่ปรากฏในค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง

อันดับกระแสฮาร์มอนิก	ลำดับเฟส	ความถี่ฮาร์มอนิกที่ปรากฏในค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง
1 (60 Hz)	บวก	0, 120 Hz
2 (120 Hz)	ลบ	60, 120 Hz
3 (180 Hz)	ศูนย์	120, 240 Hz
4 (240 Hz)	บวก	180, 300 Hz
5 (300 Hz)	ลบ	240, 360 Hz
6 (360 Hz)	ศูนย์	300, 420 Hz
7 (420 Hz)	บวก	360, 480 Hz
8 (480 Hz)	ลบ	420, 540 Hz
9 (540 Hz)	ศูนย์	480, 600 Hz
10 (600 Hz)	บวก	540, 660 Hz
•	•	•
•	•	•
•	•	•

การเลือกใช้ความถี่ตัด (cutoff frequency : f_c) ของวงจรกรองผ่านต่ำ จะพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งของระบบรางไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าสมดุล ในส่วนกระแสไหลตมมีลักษณะไม่สมดุล และมีปริมาณฮาร์มอนิก ซึ่งสามารถแสดงปริมาณฮาร์มอนิกที่ปรากฏในค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งได้ดังตารางที่ 4.1 จากตารางดังกล่าว สามารถพล็อตกราฟสเปกตรัมค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง เพื่อพิจารณาปริมาณฮาร์มอนิกที่ปรากฏในค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง ดังรูปที่ 4.2 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่าความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านต่ำ จะต้องมืค่า $0 < f_c < 60 \text{ Hz}$ เพื่อให้สามารถแยกปริมาณฮาร์มอนิกของค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงกำหนดค่าความถี่ตัดของวงจรกรองผ่านต่ำให้มีค่าเท่ากับ 50 Hz



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมปริมาณฮาร์มอนิกที่ปรากฏในค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ

ขั้นที่ 3 การคำนวณหาค่ากระแสที่แหล่งจ่ายเฟส m และเฟส t (กระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลัง) ที่ความถี่มูลฐาน (\bar{i}_{sm} , \bar{i}_{st}) สามารถคำนวณได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ วิธีกระแสไฟฟ้าเท่ากัน วิธีกำลังไฟฟ้าเท่ากัน และวิธีอิมพีแดนซ์เท่ากัน ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล ดังนั้น จะต้องพิจารณาการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก การชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟ ผู้วิจัยได้เลือกใช้รูปแบบกำลังไฟฟ้าเท่า สำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้า เนื่องจากรูปแบบการคำนวณดังกล่าวสามารถพิจารณาการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกไปพร้อมกันกับการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟ ดังนั้น ในขั้นที่ 3 จึงเริ่มต้นจากการกำหนดให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยภายหลังการชดเชยของเฟส m และเฟส t (P_{AVGm} , P_{AVGt}) มีค่าเท่ากันทั้งสองเฟส ดังสมการที่ (4.3)

$$P_{AVGm} = P_{AVGt} = \frac{\bar{P}}{2} \quad (4.3)$$

จากนั้นคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของเฟส m และเฟส t ดังสมการที่ (4.4) และ (4.5) ตามลำดับ โดยที่ V_{PCCm} และ V_{PCCt} คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ของเฟส m และเฟส t ตามลำดับ ในส่วนของ I_{Sm} และ I_{St} คือ ค่ายอดของกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังเฟส m และเฟส t ตามลำดับ

$$P_{AVGm} = \frac{V_{PCCm}}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{Sm}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{PCCm} \cdot I_{Sm}}{2} \quad (4.4)$$

$$P_{AVGt} = \frac{V_{PCCt}}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{St}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{PCCt} \cdot I_{St}}{2} \quad (4.5)$$

นำสมการที่ (4.3) แทนลงในสมการที่ (4.4) และ (4.5) และจัดให้อยู่ในรูปของค่ายอดของกระแสทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังเฟส m และเฟส t แสดงได้ดังสมการที่ (4.6) และ (4.7) ตามลำดับ

$$I_{Sm} = \frac{\bar{P}}{V_{PCCm}} \quad (4.6)$$

$$I_{St} = \frac{\bar{P}}{V_{PCCt}} \quad (4.7)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส i_{Sm} กับค่าแรงดัน v_{PCCm} และค่ากระแส i_{St} กับค่าแรงดัน v_{PCCt} แสดงได้ดังสมการที่ (4.8) และ (4.9) ตามลำดับ สามารถจัดรูปสมการการคำนวณค่ากระแส \bar{i}_{Sm} และ \bar{i}_{St} ได้ดังสมการที่ (4.10) และ (4.11) ตามลำดับ

$$i_{Sm} = \frac{I_{Sm} \times v_{PCCm}}{V_{PCCm}} \quad (4.8)$$

$$i_{St} = \frac{I_{St} \times v_{PCCt}}{V_{PCCt}} \quad (4.9)$$

$$\bar{i}_{Sm} = \frac{\bar{P} \cdot v_{PCCm}}{V_{PCCm}^2} \quad (4.10)$$

$$\bar{i}_{St} = \frac{\bar{P} \cdot v_{PCCt}}{V_{PCCt}^2} \quad (4.11)$$

ขั้นที่ 4 คำนวณค่ากระแสอ้างอิงเฟส m และเฟส t สำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟ (i_{Cm}^*, i_{Ct}^*) แสดงได้ดังสมการที่ (4.12) และ (4.13) ตามลำดับ

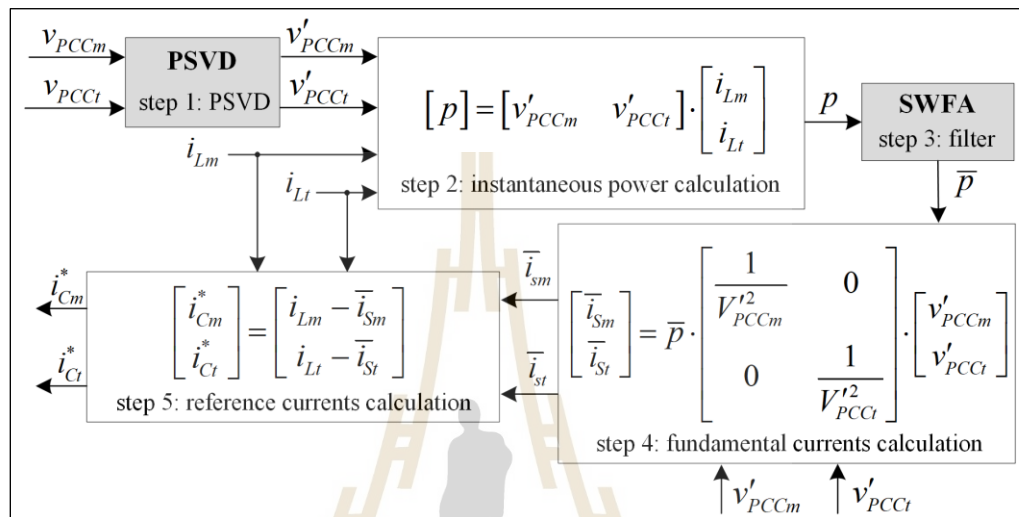
$$i_{Cm}^* = i_{Lm} - \bar{i}_{Sm} \quad (4.12)$$

$$i_{Ct}^* = i_{Lt} - \bar{i}_{St} \quad (4.13)$$

4.3 การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ

ในการศึกษาวิจัยของ Haitao และคณะ (H. Haitao, et al., 2018) พบว่า ระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมที่ใช้สำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟความเร็วสูง มีแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นในระบบส่งจ่าย ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ด้วยเหตุนี้ การคำนวณค่ากระแสอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสจึงเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากค่ากระแสอ้างอิงที่ควรจะเป็น เมื่อการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงไม่ถูกต้อง จะส่งผลเสียต่อสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า ดังนั้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาการคำนวณกระแสอ้างอิงเพื่อให้สามารถรองรับสถานการณ์ที่แหล่งจ่ายแรงดันมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ โดยนำเทคนิคการตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวก (Positive Sequence Voltage Detector : PSVD) มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวิธีการตรวจจับซิงโครนัสเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์สำหรับนำไปใช้ในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิง ส่งผลให้การคำนวณมีความถูกต้องและแม่นยำ นอกจากนี้ ได้นำหลักการวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis : SWFA) ที่มีจุดเด่นในด้านการแยกปริมาณฮาร์มอนิกออกจากปริมาณมูลฐานมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวิธีการตรวจจับซิงโครนัส เพื่อเพิ่มสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟให้ดียิ่งขึ้น การประยุกต์ใช้งานการวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน และการตรวจจับแรงดันลำดับเฟสบวกมูลฐานร่วมกับการตรวจจับซิงโครนัส สามารถเรียกว่า “การตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ (Enhanced Synchronous Detection: ESD)” การคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้าด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า การคำนวณขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนที่ 4 และขั้นตอนที่ 5 มีวิธีการคำนวณเช่นเดียวกับวิธีการตรวจจับซิงโครนัส ซึ่งได้

นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2 แต่ความแตกต่างระหว่างวิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ มีด้วยกันสองประเด็น คือ การตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวกในขั้นตอนที่ 1 และการแยกปริมาณฮาร์มอนิกด้วยการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อนในขั้นตอนที่ 3 ทั้งสองประเด็นสามารถ อธิบายได้ดังนี้

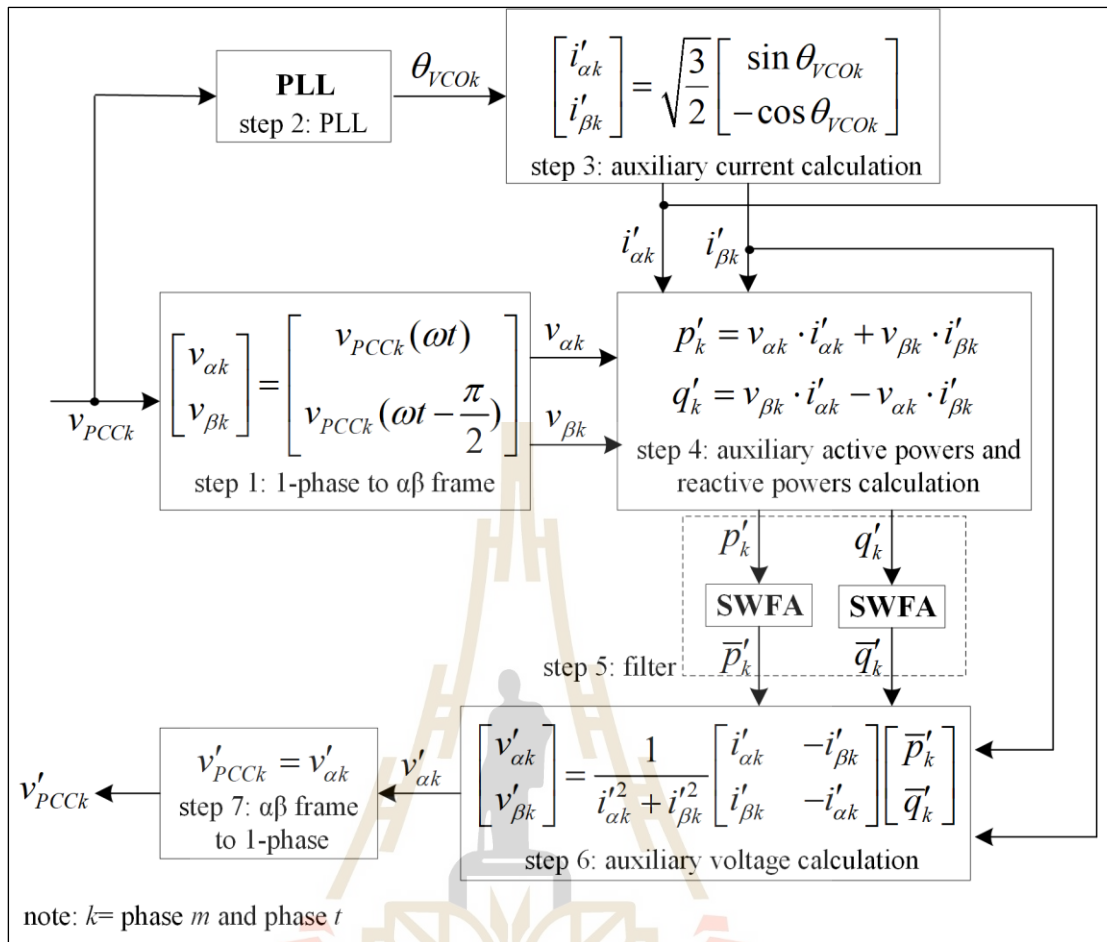


รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ

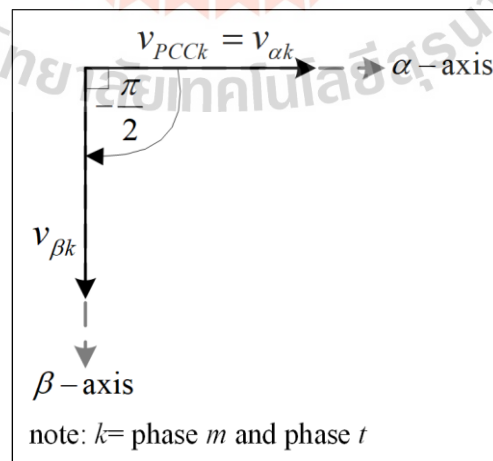
4.3.1 การตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวก

ประเด็นแรกของความแตกต่างระหว่างวิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ คือ มีการเพิ่มอัลกอริทึมการตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวกเพื่อคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ของเฟส m และเฟส t (v'_{PCCm} , v'_{PCCt}) เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC สำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ ทั้งในสถานการณ์ที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของระบบมีปริมาณฮาร์มอนิกและไม่มีฮาร์มอนิก โดยค่าแรงดัน v'_{PCCm} และ v'_{PCCt} จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง และค่ากระแส \bar{i}_{sm} และ \bar{i}_{st} ส่งผลให้การคำนวณค่ากระแส i^*_{Cm} และ i^*_{Ct} มีความถูกต้อง โดยโครงสร้างการคำนวณของอัลกอริทึมการตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวกแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 มีรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

ขั้นที่ 1 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (v_{PCCk}) ถูกแปลงให้อยู่บนแกนแอลฟา-เบตา ดังสมการในบล็อก “1-phase to $\alpha\beta$ frame” ซึ่งปริมาณบนแกนแอลฟาจะมีขนาดและมุมเฟสเท่ากับปริมาณบนแกนหนึ่งเฟส ส่วนปริมาณบนแกนเบต้ามักมีขนาดเท่ากับปริมาณบนแกนหนึ่งเฟส แต่ค่ามุมเฟสจะเลื่อนออกไป $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน แสดงได้ดังรูปที่ 4.5

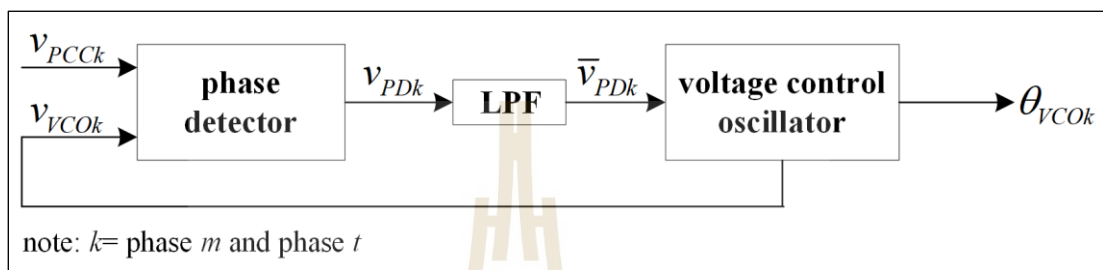


รูปที่ 4.4 ไดอะแกรมการตรวจจับแรงดันที่จุด PCC ด้วยวิธี PSVD สำหรับระบบแรงไฟฟ้า



รูปที่ 4.5 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันไฟฟ้าบนแกนแอลฟา-เบตา

ขั้นที่ 2 คำนวณค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (θ_{VCOk}) ด้วยวงจรเฟสล็อกกลุ่ (phase locked loop : PLL) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ วงจรเฟสล็อกกลุ่แบบเชิงเส้น (linear phase locked loop) เนื่องจากวงจรดังกล่าวมีสมรรถนะที่ดีในการคำนวณค่ามุมของปริมาณทางไฟฟ้า และเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งถูกนำเสนอโดย A. Gregene และคณะ ในปี ค.ศ. 1969 โครงสร้างการทำงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 โครงสร้างการทำงานของวงจรเฟสล็อกกลุ่แบบเชิงเส้น

การทำงานของวงจรเฟสล็อกกลุ่แบบเชิงเส้นในรูปที่ 4.6 พบว่า วงจร PLL มีลักษณะการทำงานเริ่มต้นจากการเปรียบเทียบระหว่างเฟสของแรงดัน v_{PCCk} กับเฟสของค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรควบคุมความถี่ (voltage control oscillator) หรือเรียกว่า วงจร VCO (v_{VCOk}) แสดงได้ดังบล็อก “phase detector” การเปรียบเทียบดังกล่าวจะได้ค่าแรงดันจากการเปรียบเทียบเฟสข้างต้น (v_{PDK}) ซึ่งค่าแรงดัน v_{PDK} จะถูกป้อนให้กับวงจรกรองผ่านต่ำ (LPF) เพื่อปรับค่าแรงดัน v_{PDK} ให้คงตัว จนได้ค่าแรงดัน \bar{v}_{PDK} สำหรับเป็นอินพุตให้กับวงจร VCO โดยวงจร VCO ทำหน้าที่ควบคุมเฟสของค่าแรงดัน \bar{v}_{PDK} ให้ตรงกับเฟสของค่าแรงดัน v_{PCCk} จากนั้นวงจร VCO จะสร้างค่าแรงดันป้อนกลับ คือ ค่า v_{VCOk} ให้กับตัวตรวจจับเฟสอีกครั้ง เพื่อที่ตัวตรวจจับเฟสจะได้ทำหน้าที่เปรียบเทียบเฟสต่อไป รายละเอียดการทำงานในแต่ละส่วนอธิบายได้ ดังนี้

- การทำงานของตัวตรวจจับเฟส (phase detector)

ค่าแรงดัน v_{PCCk} และแรงดัน v_{VCOk} ที่ใช้พิจารณาในการเปรียบเทียบ แสดงได้ดังสมการที่ (4.14) และ (4.15) ตามลำดับ

$$v_{PCCk}(t) = V_{PCCk} \sin(\omega_{PCCk}t + \phi_{PCCk}) \quad (4.14)$$

$$v_{VCOk}(t) = V_{VCOk} \sin(\omega_{VCOk}t + \phi_{VCOk}) \quad (4.15)$$

จากนั้นคำนวณหาค่าแรงดัน v_{PDk} ด้วยการคูณค่าแรงดัน v_{PCCk} และแรงดัน v_{VCOk} ดังสมการที่ (4.16) จากสมการที่ (4.16) สามารถจัดรูปได้ดังสมการที่ (4.17) โดยวัตถุประสงค์ของ วงจรเฟสล็อกคือ ต้องการให้ค่า ω_{PCCk} เท่ากับค่า ω_{VCOk} ดังนั้น สมการที่ (4.17) สามารถจัดรูป ใหม่ ได้ดังสมการที่ (4.18) โดยที่ $\omega = \omega_{PCCk} = \omega_{VCOk}$

$$v_{PDk}(t) = v_{PCCk}(t) \cdot v_{VCOk}(t) = V_{PCCk} \sin(\omega_{PCCk}t + \phi_{PCCk}) \cdot V_{VCOk} \sin(\omega_{VCOk}t + \phi_{VCOk}) \quad (4.16)$$

$$v_{PDk}(t) = \frac{V_{PCCk}V_{VCO}}{2} \cdot [-\cos(\omega_{PCCk}t + \phi_{PCCk} + \omega_{VCOk}t + \phi_{VCOk}) + \cos(\omega_{PCCk}t + \phi_{PCCk} - \omega_{VCOk}t - \phi_{VCOk})] \quad (4.17)$$

$$v_{PDk}(t) = \frac{V_{PCCk}V_{VCO}}{2} \cdot \underbrace{\cos(\phi_{PCCk} - \phi_{VCOk})}_{\text{DC component}} \underbrace{- \cos(2\omega t + \phi_{PCCk} + \phi_{VCOk})}_{\text{AC component}} \quad (4.18)$$

(\bar{v}_{PDk}) (\tilde{v}_{PDk})

- การทำงานของวงจรกรองผ่านต่ำ (LPF)

จากสมการ (4.18) สังเกตได้ว่า ค่า v_{PDk} มีองค์ประกอบเป็นแรงดันไฟฟ้าสัญญาณตรง (\bar{v}_{PDk}) และแรงดันไฟฟ้าสัญญาณสลับ (\tilde{v}_{PDk}) เพื่อให้ได้ค่า \bar{v}_{PDk} ดังสมการ (4.19) สำหรับเป็น อินพุตให้กับวงจร VCO จึงใช้วงจร LPF ทำหน้าที่แยกค่า \bar{v}_{PDk} ออกจากค่า v_{PDk}

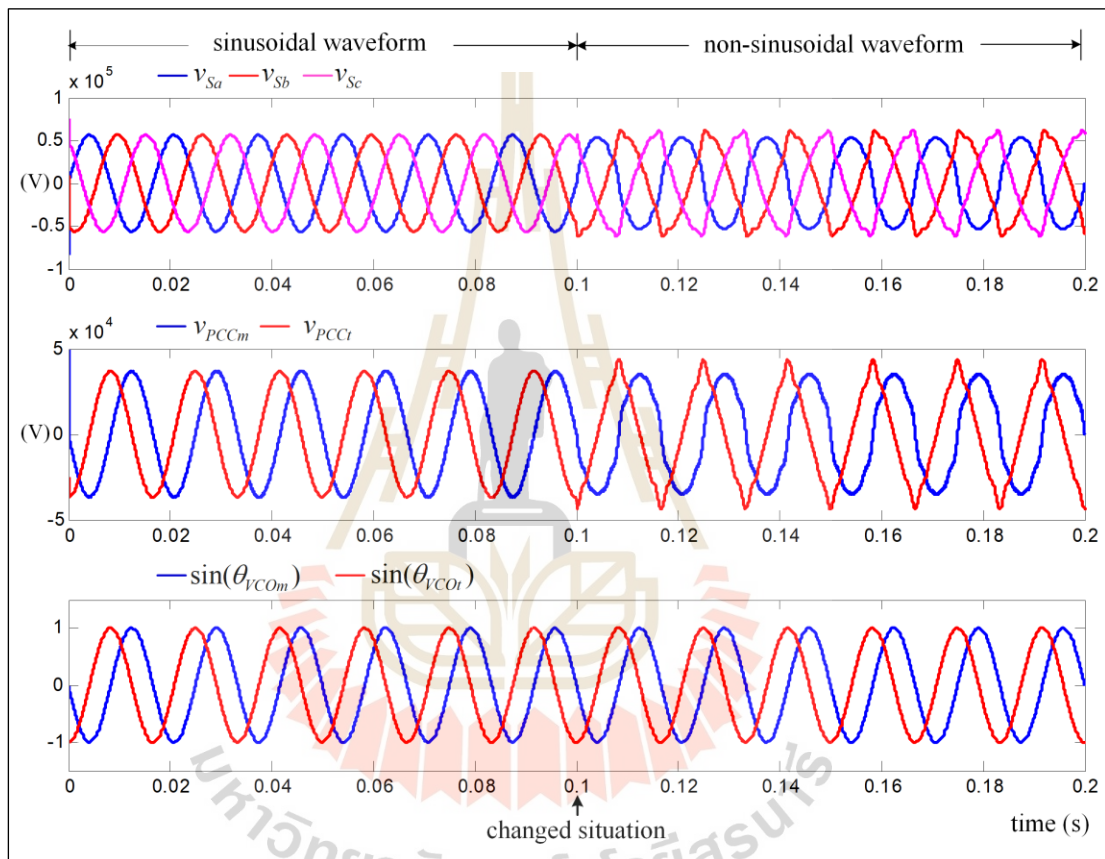
$$\bar{v}_{PDk}(t) = \frac{V_{PCCk}V_{VCO}}{2} \cdot \cos(\phi_{PCCk} - \phi_{VCOk}) \quad (4.19)$$

- การทำงานของวงจรควบคุมความถี่ (voltage control oscillator)

วงจร VCO ทำหน้าที่สร้างค่า v_{VCOk} สำหรับป้อนกลับแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวตรวจจับ เฟส ประกอบด้วย ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจร VCO (V_{VCO}) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ค่า ความเร็วเชิงมุมอิสระ (ω_{VCOk}) กำหนดค่าเริ่มต้นเท่ากับ 120π เรเดียนต่อวินาที และมุมเฟสอิสระ (ϕ_{VCOk}) กำหนดค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 เรเดียน เมื่อค่า \bar{v}_{PDk} มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ค่า θ_{VCOk} จะถูก ปรับเปลี่ยน ดังสมการที่ (4.20) และปรับค่าเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่า θ_{VCOk} ใกล้เคียงกับค่า θ_{PCCk} โดยค่า θ_{VCOk} จากวงจรเฟสล็อกแบบเชิงเส้นถูกนำไปใช้คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้า สันับสนุนบนแกนแอลฟา-เบตา ($i'_{\alpha k}, i'_{\beta k}$) ในขั้นตอนที่ 3

$$\theta_{VCOk} = \omega_{VCOk}t + \phi_{VCOk} = (2\pi k_c) \cdot \int_0^t \bar{v}_{PDK}(t) dt \quad (4.20)$$

โดยที่ k_c คือ ค่าความไวอินพุตของวงจร VCO (VCO input sensitivity) มีหน่วยเป็น Hz/V
ค่าในส่วนนี้ผู้วิจัยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.25 Hz/V



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบวงจรเฟสล็อกแบบเชิงเส้น

การทดสอบสมรรถนะของวงจรเฟสล็อกแบบเชิงเส้นเป็นส่วนหนึ่ง que ผู้วิจัยได้ ทำการศึกษา เพื่อยืนยันความถูกต้องของการคำนวณค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (θ_{VCOk}) ใน สถานการณ์ที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ และผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณ ไซน์ ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า มีการปรับเปลี่ยนลักษณะรูป สัญญาณของแรงดันไฟฟ้า (v_{Sa} , v_{Sb} , v_{Sc}) เป็นสองช่วง ได้แก่ ช่วงเวลา 0 วินาที ถึง 0.1 วินาที แรงดันไฟฟ้า v_{Sa} , v_{Sb} และ v_{Sc} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ และช่วงเวลา 0.1 วินาที ถึง 0.2

วินาที รูปสัญญาณ v_{Sa} , v_{Sb} และ v_{Sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ จากการวิเคราะห์โครงสร้างของหม้อแปลงกำลังในบทที่ 3 พบว่า รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้า v_{Sa} , v_{Sb} และ v_{Sc} มีผลโดยตรงต่อรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ของเฟส m และเฟส t (v_{PCCm} , v_{PCCt}) จากผลการทดสอบ พบว่า วงจรเฟสล็อกแบบเชิงเส้นมีสมรรถนะที่ดีในการคำนวณค่ามุม θ_{VCOm} และ θ_{VCOt} ถึงแม้ว่า ระบบที่พิจารณาอยู่ในสถานะที่รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์และผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์

ขั้นที่ 3 นำค่า θ_{VCOk} ที่ได้จากวงจรเฟสล็อกแบบเชิงเส้นมาคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้า $i'_{\alpha k}$ และ $i'_{\beta k}$ ดังสมการที่ (4.21) และ (4.22) ตามลำดับ

$$i'_{\alpha k} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sin \theta_{VCOk} \quad (4.21)$$

$$i'_{\beta k} = -\sqrt{\frac{3}{2}} \cos \theta_{VCOk} \quad (4.22)$$

ขั้นที่ 4 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟสนับสนุน (p'_k , q'_k) แสดงได้ดังบล็อก “auxiliary active powers and reactive powers calculation” ในรูปที่ 4.4

ขั้นที่ 5 ดำเนินการแยกองค์ประกอบค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟสนับสนุนสัญญาณตรง (\bar{p}'_k , \bar{q}'_k) ออกจากค่ากำลังไฟฟ้า p'_k และ q'_k ตามลำดับ โดยใช้วงจร SWFA แสดงได้จากบล็อก “filter” ดังรูปที่ 4.4 กระบวนการ SWFA เริ่มต้นจากการพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้า p'_k และ q'_k เป็นสัญญาณรายคาบ $p'_k(nT_s)$ และ $q'_k(nT_s)$ แสดงได้ดังสมการที่ (4.23) และ (4.24) ตามลำดับ จากนั้นกำหนดให้อัลกอริทึม SWFA คำนวณเฉพาะค่ากำลังไฟฟ้า \bar{p}'_k และ \bar{q}'_k จากขั้นตอนนี้ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสนับสนุนที่คำนวณได้ มีเฉพาะค่าทางไฟฟาลำดับเฟสบวกเท่านั้น (รายละเอียดการแยกปริมาณฮาร์มอนิกด้วยอัลกอริทึม SWFA จะได้รับการนำเสนออย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป)

$$p'_k(nT_s) = \underbrace{\frac{A_0}{2}}_{\text{DC active power component } (\bar{p}'_k)} + \underbrace{\sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega nT) + B_h \sin(h\omega nT)]}_{\text{AC active power component } (\tilde{p}'_k(nT_s))} \quad (4.23)$$

DC active power
component (\bar{p}'_k)

AC active power
component ($\tilde{p}'_k(nT_s)$)

$$q'_k(nT_s) = \underbrace{\frac{A_0}{2}}_{\text{DC reactive power component } (\bar{q}'_k)} + \underbrace{\sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega nT) + B_h \sin(h\omega nT)]}_{\text{AC reactive power component } (\tilde{q}'_k(nT_s))} \quad (4.23)$$

ขั้นที่ 6 ค่ากำลังไฟฟ้า \bar{p}'_k และ \bar{q}'_k ถูกใช้สำหรับการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้า สนิบสนุนบนแกนแอลฟา-เบตา ($v'_{\alpha k}, v'_{\beta k}$) แสดงได้ดังบล็อก “auxiliary voltage calculation” ในรูปที่ 4.4

ขั้นที่ 7 กำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้าลำดับเฟสบวกบนแกนหนึ่งเฟส (v'_{PCCk}) มีค่าเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้า $v'_{\alpha k}$ ดังสมการที่ (4.24) โดยค่า v'_{PCCk} ที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟพร้อมกับการตรวจจับซิงโครไนส์

$$v'_{PCCk} = v'_{\alpha k} \quad (4.24)$$

4.3.2 การวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน

การใช้การวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อนแทนการใช้วงจรกรองผ่านต่ำในส่วนของวงจรกรองความถี่ของกระบวนการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครไนส์ เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่สำคัญในการเพิ่มสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เนื่องจากการวิเคราะห์ฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อนมีจุดเด่นในด้านการแยกปริมาณฮาร์มอนิกของค่าทางไฟฟ้า ส่งผลให้มีความแม่นยำมากขึ้นในการแยกค่าทางไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานออกจากค่าทางไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิก การแยกค่าทางไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 โดยการวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อนมีแนวคิดจากการพิจารณาค่าทางไฟฟ้าเป็นสัญญาณรายคาบ ($f(nT_s)$) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของอนุกรมฟูรีเยร์ ดังสมการที่ (4.25) จากสมการดังกล่าว สังเกตได้ว่าองค์ประกอบของสมการอนุกรมฟูรีเยร์มีสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นค่าทางไฟฟ้าสัญญาณตรงซึ่งเปรียบเสมือนปริมาณที่ความถี่มูลฐาน (\bar{f}) และส่วนที่เป็นค่าทางไฟฟ้าสัญญาณสลับจะเปรียบเสมือนปริมาณที่ความถี่ฮาร์มอนิก ($\tilde{f}(nT_s)$) โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าทั้งสองส่วนสามารถนิยามได้เป็นค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งของแต่ละเฟส (p_k) ดังสมการที่ (4.26) เมื่อตัวแปร k กำหนดแทนด้วยเฟส m และเฟส t สมการดังกล่าวจะถูกอธิบายอยู่ในรูปของสัญญาณรายคาบ ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้า $p_k(nT_s)$ ประกอบด้วย ค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสัญญาณตรง (\bar{p}_k) และค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสัญญาณสลับ ($\tilde{p}_k(nT_s)$) ดังรูปที่ 4.9

$$f(nT_s) = \underbrace{\frac{A_0}{2}}_{\text{DC component } (\bar{f})} + \underbrace{\sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega nT) + B_h \sin(h\omega nT)]}_{\text{AC component } (\tilde{f}(nT_s))} \quad (4.25)$$

$$p_k(nT_s) = \underbrace{\frac{A_0}{2}}_{\text{DC instantaneous power component } (\bar{p}_k)} + \underbrace{\sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega nT) + B_h \sin(h\omega nT)]}_{\text{AC instantaneous power component } (\tilde{p}_k(nT_s))} \quad (4.26)$$



รูปที่ 4.8 การแยกปริมาณทางไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน



รูปที่ 4.9 การแยกปริมาณกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสัญญาณตรงและสัญญาณสลับ

จากการพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่ง พบว่า ค่าทางไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานจะมีลักษณะเป็นสัญญาณตรง ส่วนค่าทางไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิกเป็นสัญญาณสลับ ดังนั้น วัตถุประสงค์การคำนวณด้วยการวิเคราะห์แบบฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้สองแนวทาง คือ แนวทางแรก เป็นการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสัญญาณตรง (\bar{p}_k) และแนวทางที่สอง เป็นการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสัญญาณสลับ ($\tilde{p}_k(nT_s)$) โดยการนำค่า \bar{p}_k ที่ได้จากการคำนวณมาหักลบกับกับค่ากำลังไฟฟ้า $p_k(nT_s)$ การเลือกใช้งานในแต่ละแนวทางจะขึ้นอยู่กับวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก และวัตถุประสงค์การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า สำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ จะใช้แนวทางแรกโดยการพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสัญญาณตรง (\bar{p}_k)

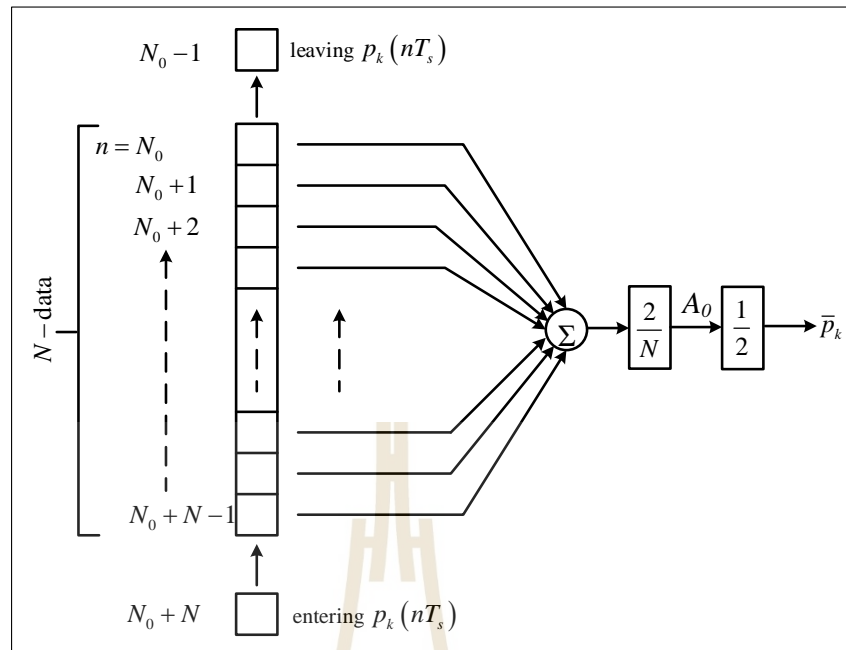
กระบวนการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า \bar{p}_k ด้วยการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน แสดงแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.10 โดยเริ่มต้นจากการเก็บค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งมาหนึ่งคาบ ($p_k(nT_s)$) ซึ่งมีจำนวน N ข้อมูล เพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า \bar{p}_k ดังสมการที่ (4.27) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ A_0 คำนวณได้จากสมการที่ (4.28) หลังจากเก็บค่ากำลังไฟฟ้า $p_k(nT_s)$ ได้ครบหนึ่งคาบจำนวน N ข้อมูล จะสามารถคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า \bar{p}_k มาใช้สำหรับการคำนวณค่ากระแสอ้างอิง การคำนวณในรอบต่อไปจะทำการดึงค่า N_0 ออกจากชุดข้อมูล N เป็น $N_0 - 1$ ในขณะเดียวกันจะรับข้อมูล $N_0 + N$ จากชุดข้อมูล $p_k(nT_s)$ ค่าใหม่มาอยู่ในชุดข้อมูล N เป็น $N_0 + N - 1$ เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ A_0 ค่าใหม่ ($A_0^{(new)}$) ดังสมการที่ (4.29) ซึ่งการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ $A_0^{(new)}$ ในทุก ๆ รอบของการรับข้อมูล p_k ค่าใหม่ ส่งผลให้ในแต่ละครั้งจะได้ค่ากำลังไฟฟ้า \bar{p}_k ค่าใหม่ในทุก ๆ รอบจากการคำนวณเสมอ โดยช่วงเวลาการรับข้อมูลในแต่ละรอบจะเท่ากับช่วงเวลาการซีกตัวอย่าง (sampling time: T_s) ซึ่งหลังจากได้ค่ากำลังไฟฟ้า \bar{p}_k ตามรูปแบบการคำนวณที่ได้นำเสนอมาเรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการคำนวณกระแสอ้างอิงในขั้นตอนต่อไป

$$\bar{p}_k = \frac{A_0}{2} \quad (4.27)$$

$$A_0 = \frac{2}{N} \sum_{n=N_0}^{N_0+N-1} p_k(nT_s) \quad (4.28)$$

$$A_0^{(new)} = A_0^{(old)} - \frac{2}{N} p_k[(N_0 - 1)T_s] + \frac{2}{N} p_k[(N_0 + N)T_s] \quad (4.29)$$

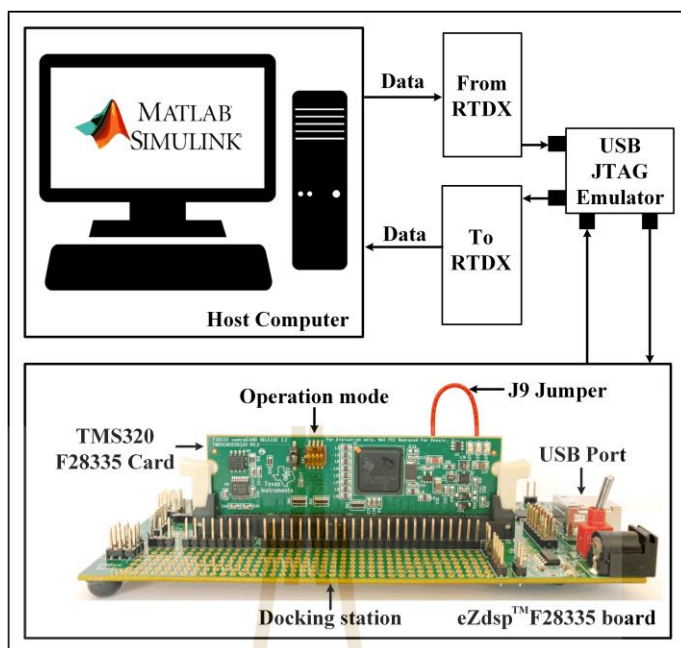
โดยที่ $A_0^{(old)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการคำนวณในรอบก่อนหน้านี้ ส่งผลให้การรับค่าข้อมูล $p_k(kT_s)$ ในแต่ละครั้งจะได้ค่า \bar{p}_k ใหม่ในทุกรอบของการรับข้อมูล



รูปที่ 4.10 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์และค่ากำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งที่มีความถี่มูลฐาน

4.4 การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (hard ware in the loop: HIL) เป็นเทคนิคการจำลองสถานการณ์ที่ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP ซึ่งมีจุดเด่นหลายประการ เช่น ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับระบบฮาร์ดแวร์จริง สามารถคาดการณ์ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นก่อนการทดสอบกับระบบฮาร์ดแวร์จริงในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้วิจัย และ ความเสียหายของอุปกรณ์ ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปมาใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์เพื่อพิจารณาสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า โดยระบบฮาร์ดแวร์ อาทิเช่นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ ระบบรางไฟฟ้า และวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ที่พิจารณาจะดำเนินการสร้างด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ส่วนระบบควบคุม เช่น การคำนวณกระแสอ้างอิง ระบบควบคุมกระแสชดเชย และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟถูกเขียนขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซีผ่านโปรแกรม Code Composer Studio เวอร์ชัน 3.3 (CCstudio v3.3) ลงบนบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™F28335 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับเทคนิคฮาร์ดแวร์

จากรูปที่ 4.11 สังเกตได้ว่า คอมพิวเตอร์หลัก (host computer) และบอร์ด eZdsp™F28335 เชื่อมต่อกันผ่านทางพอร์ต USB ด้วย JTAG (joint test action group) การรับส่งข้อมูลระหว่างกันมีลักษณะแบบ RTDX (real-time data exchange) โดยค่าที่ตรวจวัดได้จากระบบที่พิจารณาถูกเขียนขึ้นและส่งต่อจากโปรแกรม MATLAB/Simulink ผ่านบล็อก From RTDX (From real-time data exchange) ไปสู่การประมวลผลในบอร์ด eZdsp™F28335 ผ่านทางพอร์ต USB ซึ่งบนบอร์ด eZdsp™F28335 ได้เขียนชุดคำสั่งภาษาซีในการคำนวณกระแสอ้างอิง การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง เมื่อเสร็จสิ้นหนึ่งรอบการทำงาน บอร์ด eZdsp™F28335 จะทำการส่งค่าข้อมูลที่ได้จากกระบวนการประมวลผลไปยังโปรแกรม MATLAB/Simulink ผ่านบล็อก To RTDX (To real-time data exchange) เพื่อใช้ค่าดังกล่าวในกระบวนการควบคุมวงจรรองกำลังแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า

4.5 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า

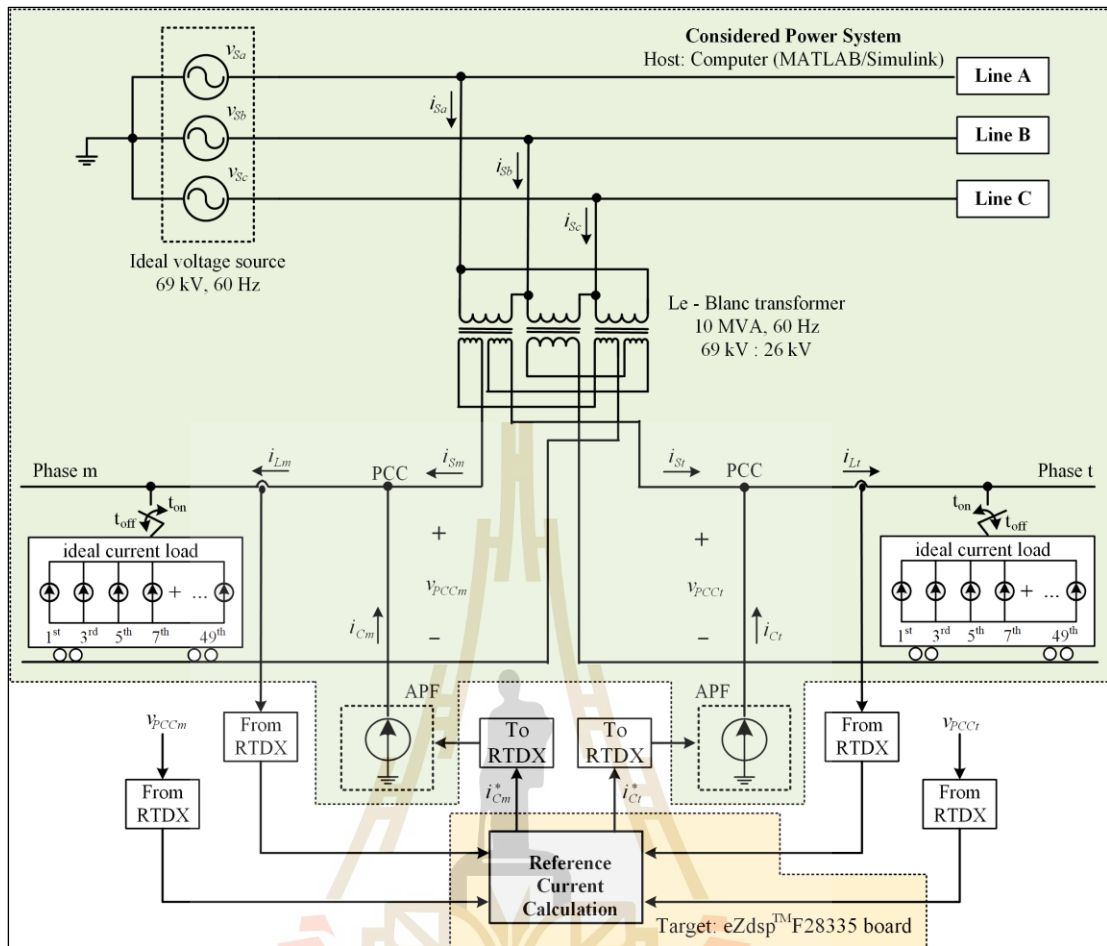
การจำลองสถานการณ์การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา เพื่อทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรองกำลังแอกทีฟแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 โดยโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา ประกอบด้วย ระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสจากการไฟฟ้า (v_{sa} , v_{sb} , v_{sc}) ที่มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันอุดมคติสามารถปรับค่ายอด ความถี่ และมุมเฟสได้ จากนั้นส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

รถไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงเลอบลองค์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวม (v_m, v_l) และยังทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้าอีกด้วย แรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสรวมเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าไปยังโวลตรถไฟความเร็วสูงที่มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติที่สามารถปรับค่ายอด ความถี่ และมุมเฟสได้ ผู้วิจัยใช้ข้อมูลกระแสโวลตรถไฟความเร็วสูงที่เป็นองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ของโวลตรถไฟความเร็วสูงที่ใช้งานจริงจากประเทศไต้หวัน ซึ่งได้ทำการอธิบายไว้ในบทที่ 3 ในหัวข้อ 3.3 ระบบที่พิจารณาข้างต้นก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิก ค่าตัวประกอบกำลังต่ำ และความไม่สมดุลของกระแสที่แหล่งจ่าย (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) ในบทนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงโดยไม่พิจารณาผลกระทบจากปัจจัยอื่น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติเป็นโครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟ เพื่อทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชย (i_{cm}, i_{cl}) ให้กับระบบอย่างสมบูรณ์ ซึ่งทำให้ค่ากระแสอ้างอิง (i_{cm}^*, i_{cl}^*) ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับกระแสชดเชย และจากการวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟในบทที่ 3 พบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (i_{sm}, i_{sl}) มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์และมีขนาดสมดุล จะส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่าย (ด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงกำลัง) มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์และมีขนาดสมดุลทั้งสามเฟส ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าข้างต้นจะทำการฉีดกระแสชดเชย เข้าสู่ระบบที่จุดต่อร่วม (PCC) ทางด้านเฟสรวมเพื่อปรับปรุงค่ากระแส i_{sm} และ i_{sl} ให้มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์และมีขนาดสมดุล โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส i_{sm} และ i_{sl} กระแสไฟฟ้าของโวลตรถไฟ (i_{lm}, i_{ll}) และกระแสชดเชย แสดงได้ดังสมการที่ (4.30) และ (4.31)

$$i_{sm} = i_{lm} - i_{cm} \quad (4.30)$$

$$i_{sl} = i_{ll} - i_{cl} \quad (4.31)$$

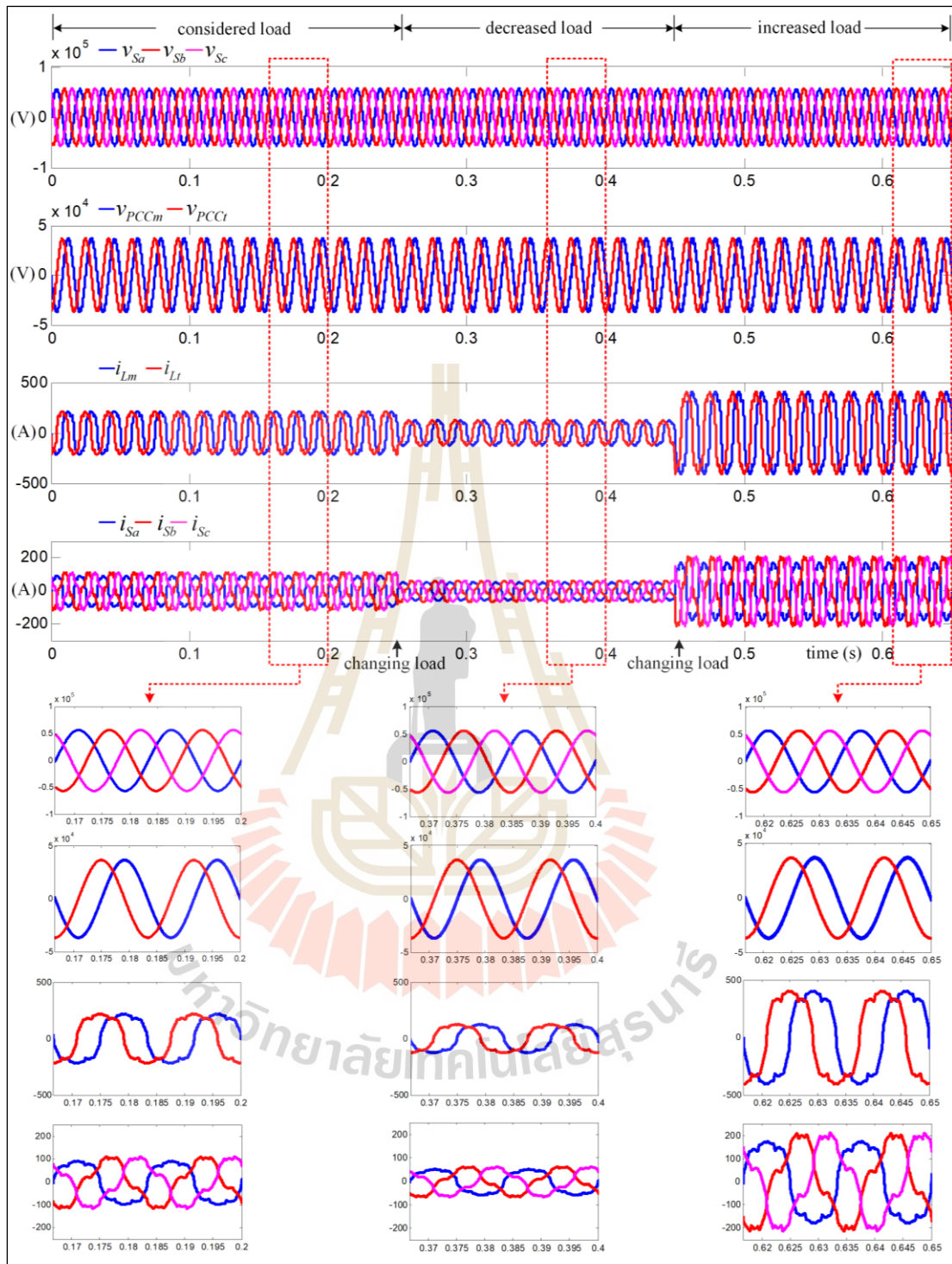
จากรูปที่ 4.12 ผู้วิจัยได้พิจารณากระบบรางไฟฟ้าออกเป็น 4 ระบบทดสอบ เพื่อใช้สำหรับการยืนยันสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า โดยใช้การคำนวณกระแสอ้างอิงที่ได้นำเสนอขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.12 ระบบทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

4.5.1 ระบบทดสอบที่หนึ่ง

ระบบทดสอบที่หนึ่ง คือ แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามเฟส (v_{Sa}, v_{Sb}, v_{Sc}) มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์และมีขนาดสมดุล ในส่วนของกระแสโหลดที่พิจารณาในระบบทดสอบที่หนึ่ง ทำการทดสอบออกเป็นสามช่วง ช่วงแรกตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.25 วินาที คือ ช่วงกระแสโหลดที่พิจารณา (ใช้ข้อมูลกระแสโหลดในบทที่ 3) ช่วงที่สองตั้งแต่เวลา 0.25 ถึง 0.45 วินาที คือ ช่วงที่กระแสโหลดลดลง (ลดแอมพลิจูดของกระแสโหลดลงครึ่งหนึ่งในแต่ละอันดับฮาร์มอนิกของกระแสโหลดในบทที่ 3) และช่วงสุดท้ายตั้งแต่เวลา 0.45 ถึง 0.65 วินาที คือ ช่วงที่มีการเพิ่มกระแสโหลด (เพิ่มแอมพลิจูดเป็นสองเท่าของกระแสโหลดในแต่ละอันดับฮาร์มอนิกของกระแสโหลดในบทที่ 3) โดยทั้งสามช่วงของการทดสอบกำหนดให้ กระแสโหลดของเฟส m และเฟส t (i_{Lm}, i_{Lt}) มีค่าแอมพลิจูดในแต่ละอันดับฮาร์มอนิกเท่ากัน ซึ่งสามารถเรียกโหลดในลักษณะนี้ว่า “โหลดสมดุล” รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายสามเฟสและกระแสโหลดที่พิจารณาในระบบทดสอบที่หนึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบทดสอบที่หนึ่ง

4.5.2 ระบบทดสอบที่สอง

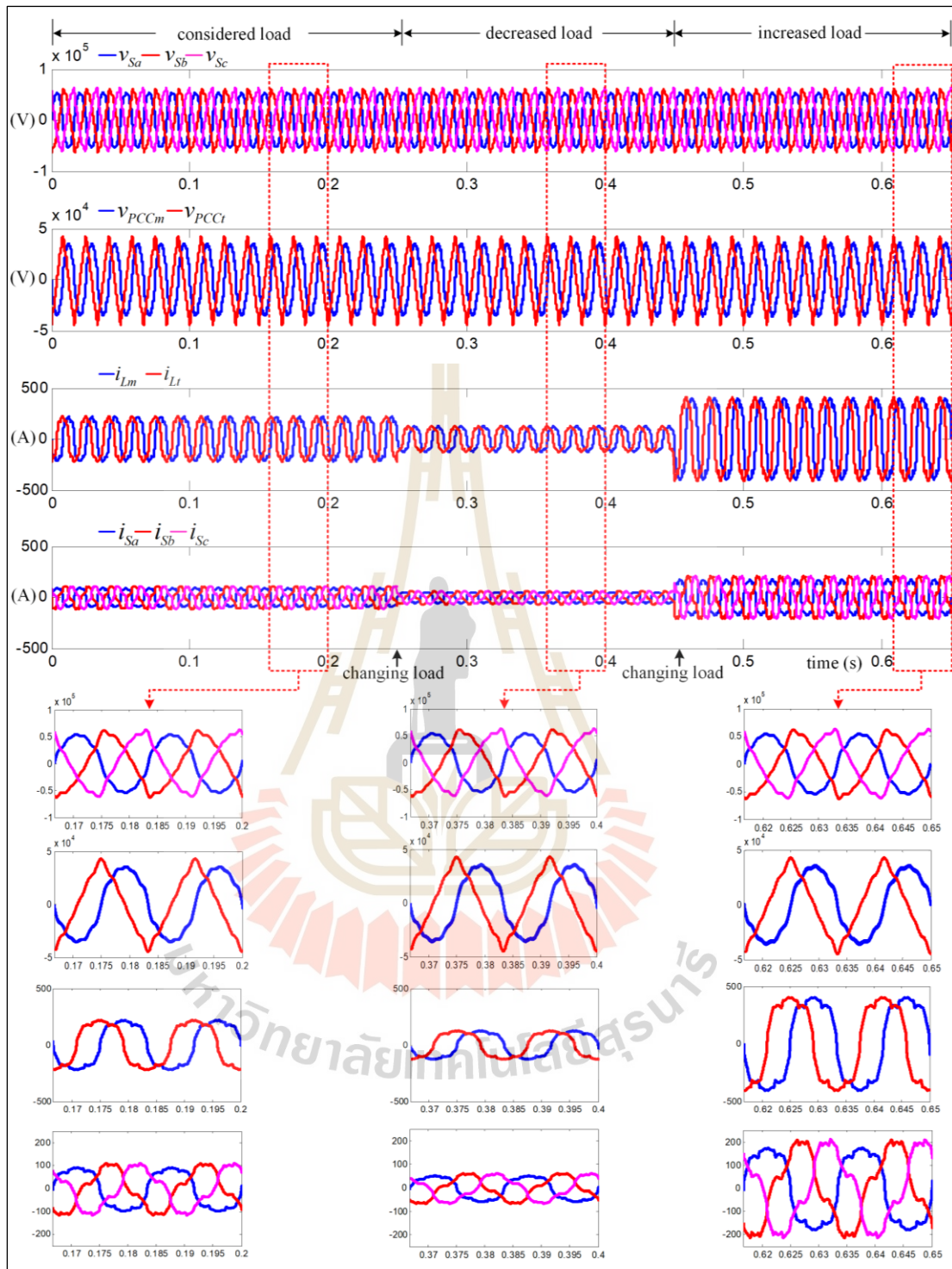
จากการศึกษางานวิจัยในอดีตของ Haitao และคณะ (H. Haitao, et al., 2018) พบว่า ระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมที่ใช้สำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟความเร็วสูง มีแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นในระบบส่งจ่าย ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ดังนั้นในระบบทดสอบที่สอง จึงได้พิจารณาแรงดันไฟฟ้า v_{sa} , v_{sb} และ v_{sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.14 โดยกำหนดให้ v_{sa} , v_{sb} และ v_{sc} มีแอมพลิจูดที่ความถี่มูลฐานเท่ากัน และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิก (total harmonic voltage distortion: %THD_v) เท่ากับ 10.3 เปอร์เซ็นต์ (อ้างอิงข้อมูลจากบทความของ Haitao และคณะ) ในส่วนของกระแสไหลในระบบทดสอบที่สองจะพิจารณาในกรณีโหลดสมดุล เช่นเดียวกับระบบทดสอบที่หนึ่ง

4.5.3 ระบบทดสอบที่สาม

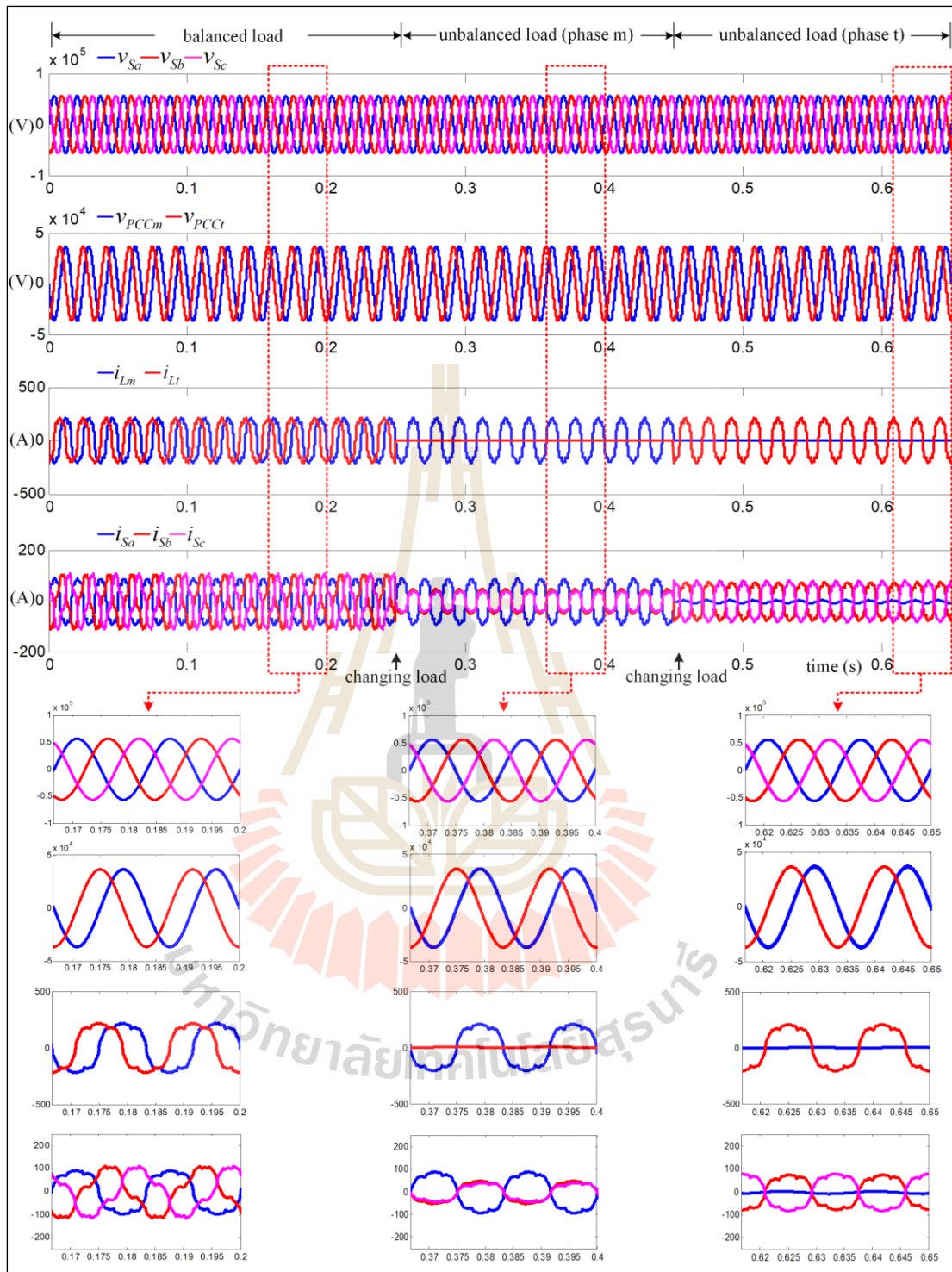
ระบบทดสอบที่สามพิจารณาแรงดันไฟฟ้า v_{sa} , v_{sb} และ v_{sc} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์และมีขนาดสมดุลเช่นเดียวกับระบบทดสอบที่หนึ่ง แต่ในส่วนกระแสไหลตรงไฟความเร็วสูงจะแตกต่างกัน โดยระบบทดสอบนี้แบ่งการทดสอบออกเป็นสามช่วง ประกอบด้วย ช่วงที่หนึ่งตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.25 วินาที คือ ช่วงกระแสไหลที่พิจารณาหรือโหลดสมดุล (ใช้ข้อมูลกระแสไหลในบทที่ 3) ช่วงที่สองตั้งแต่เวลา 0.25 ถึง 0.45 วินาที เป็นช่วงที่มีการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส m เท่านั้น ไม่มีการจ่ายโหลดเฟส t จะเรียกว่า “โหลดไม่สมดุลเฟส m ” และช่วงที่สามตั้งแต่เวลา 0.45 ถึง 0.65 วินาที จะทำการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส t เท่านั้น ไม่มีการจ่ายโหลดเฟส m ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า “โหลดไม่สมดุลเฟส t ” การจ่ายโหลดในลักษณะนี้ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า สามารถแสดงรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบที่สามได้ดังรูปที่ 4.15

4.5.4 ระบบทดสอบที่สี่

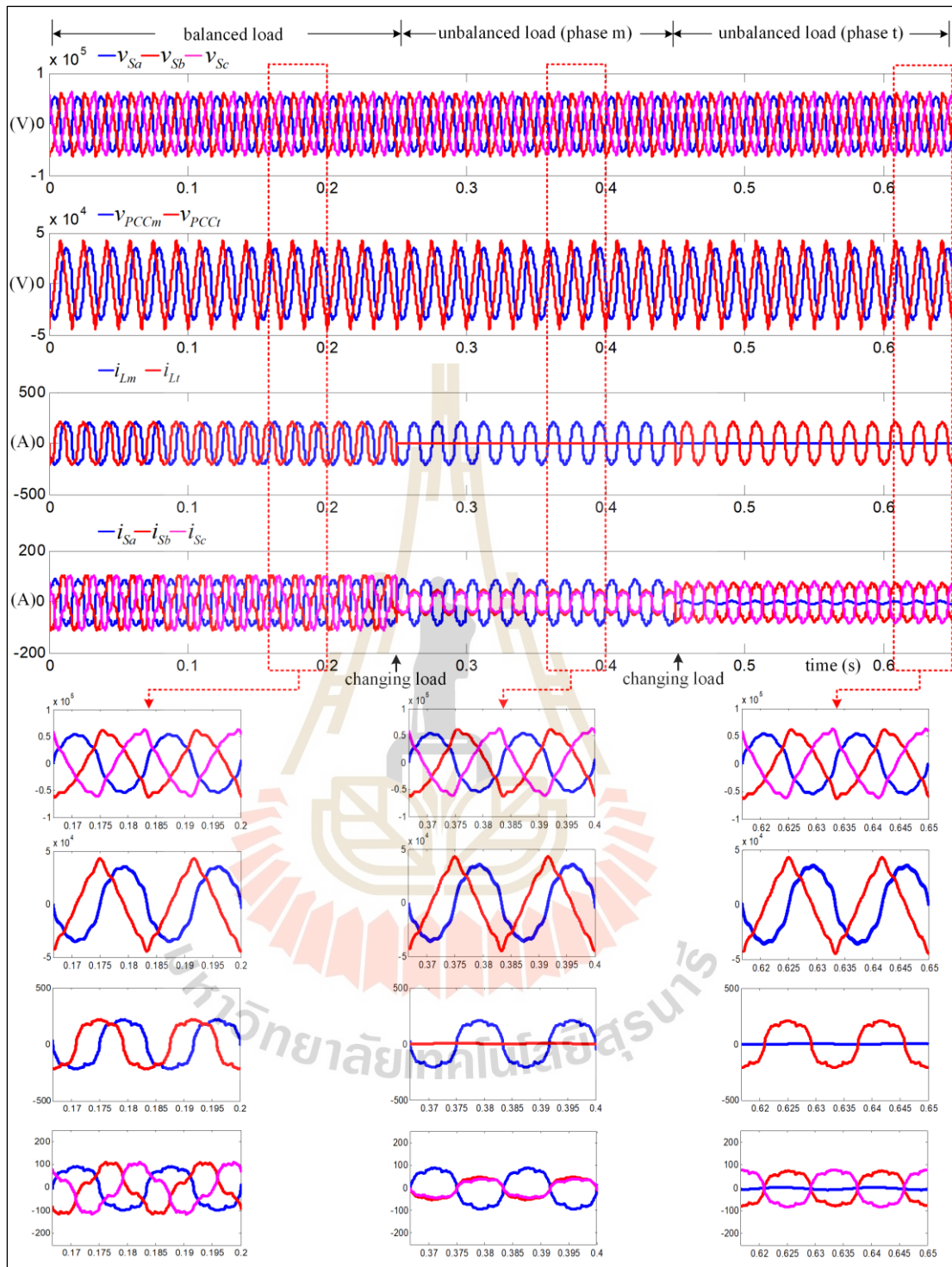
ระบบทดสอบที่สี่ พิจารณาในกรณี v_{sa} , v_{sb} และ v_{sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ซึ่งอ้างอิงได้จากระบบทดสอบที่สอง นอกจากนี้กระแสไหลของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาในระบบทดสอบที่สี่สามารถอ้างอิงโหลดไม่สมดุลที่มีลักษณะเช่นเดียวกับระบบทดสอบสามรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่พิจารณาในระบบทดสอบที่สี่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.14 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบทดสอบที่สอง



รูปที่ 4.15 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบทดสอบที่สาม



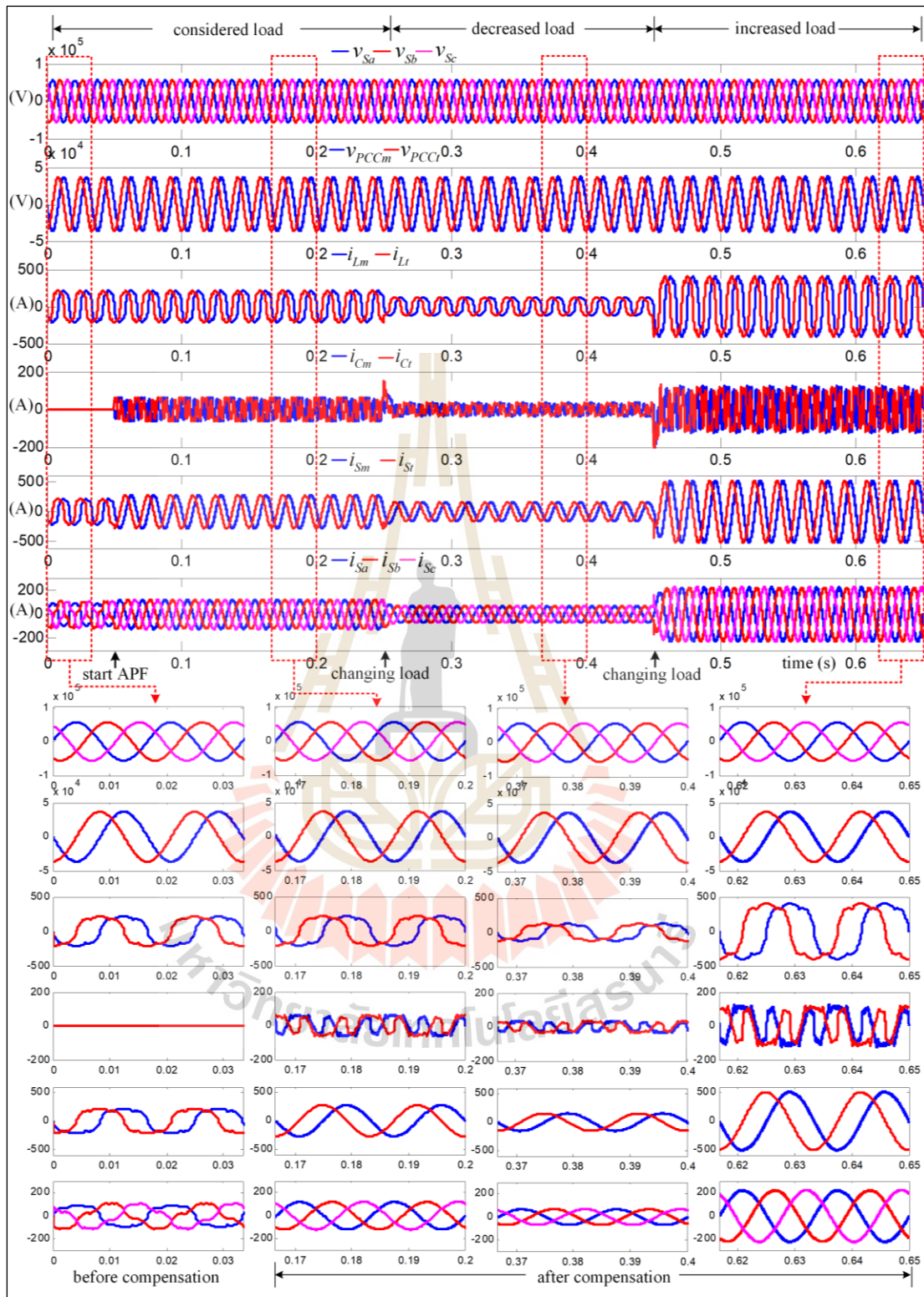
รูปที่ 4.16 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบทดสอบที่สี่

4.6 การทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิง

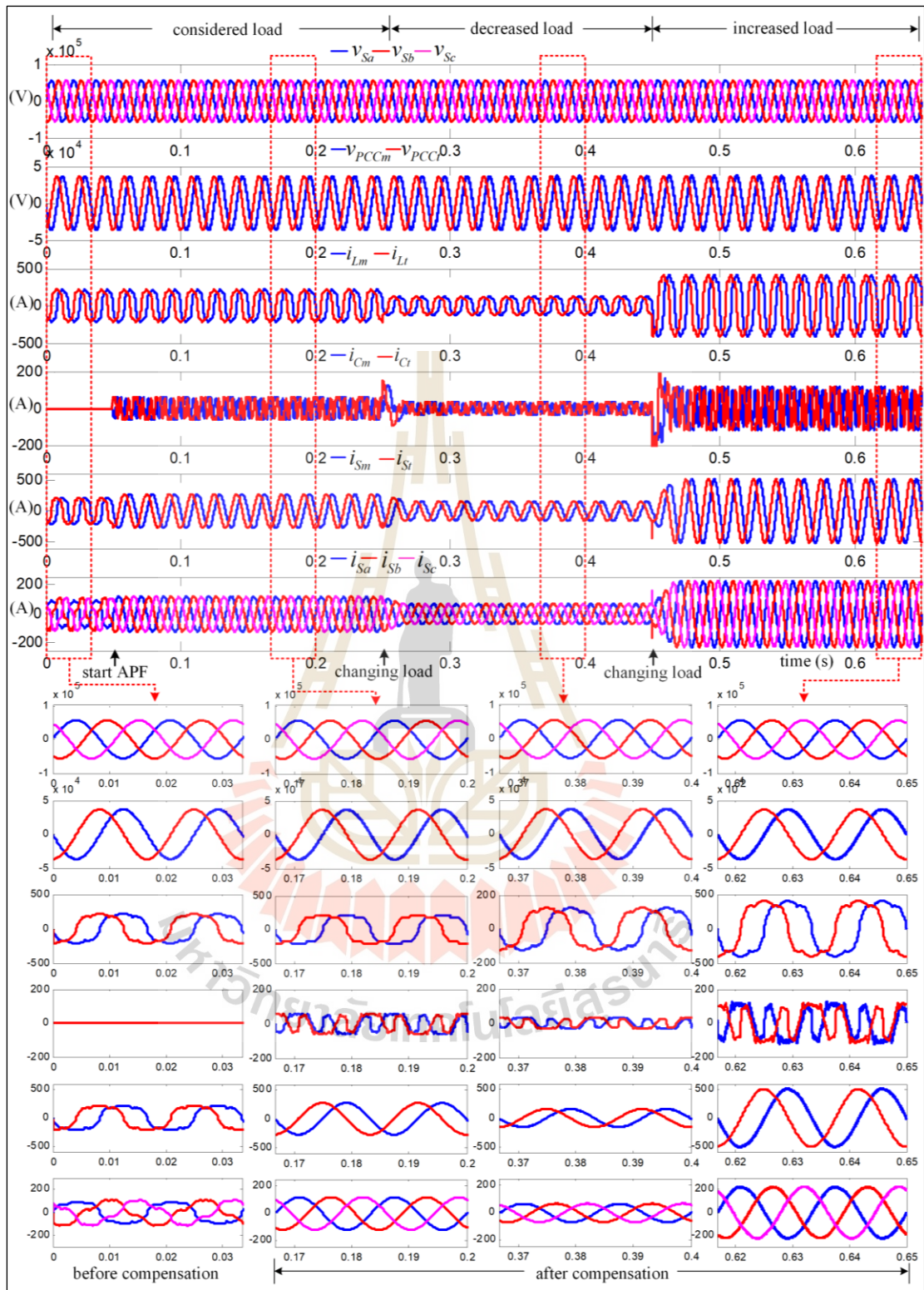
การคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้า ด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส และการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ จะได้รับการทดสอบสมรรถนะด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปเพื่อยืนยันประสิทธิภาพในการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแยกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า โดยทำการทดสอบกับระบบทดสอบทั้งสี่ระบบที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 4.5 ซึ่งผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้

4.6.1 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่หนึ่ง

ผลการจำลองสถานการณ์การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบที่หนึ่งกรณีการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ การจำลองสถานการณ์กำหนดให้เริ่มฉีดกระแสชดเชย (i_{Cm}, i_{Ct}) เข้าสู่ระบบทางด้านเฟสรวมที่จุด PCC ที่เวลา 0.05 วินาที เป็นต้นไป ผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.17 และ 4.18 สังเกตได้ว่า รูปสัญญาณแรงดัน v_{Sa}, v_{Sb} และ v_{Sc} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้างกล่าวจ่ายไฟฟ้าให้กับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟผ่านหม้อแปลงกำลังแล้วจ่ายไปยังโหลดของระบบรางไฟฟ้า โดยโหลดของระบบรางไฟฟ้ามีรูปสัญญาณกระแส i_{Lm} และ i_{Lt} ผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ส่งผลให้ก่อนการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.05 วินาที รูปสัญญาณกระแส i_{Sa}, i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนตามไปด้วย ภายหลังการชดเชยที่เวลา 0.05 วินาที วงจรรอกกำลังแยกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติทำการฉีดกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} เข้าสู่ระบบที่จุด PCC ทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{St} มีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์ ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sa}, i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์ตามไปด้วย โดยค่า $\%THD_i$ ภายหลังการชดเชยลดลง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 นอกจากนี้ การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส และการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 ในส่วนของค่า $\%CUF$ มีค่าเท่ากับ 0% ทั้งก่อนและหลังการชดเชย เนื่องจากระบบทดสอบที่หนึ่งมีลักษณะเป็นโหลดสมดุล ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่หนึ่งด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส และการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี SD สำหรับระบบทดสอบที่หนึ่ง

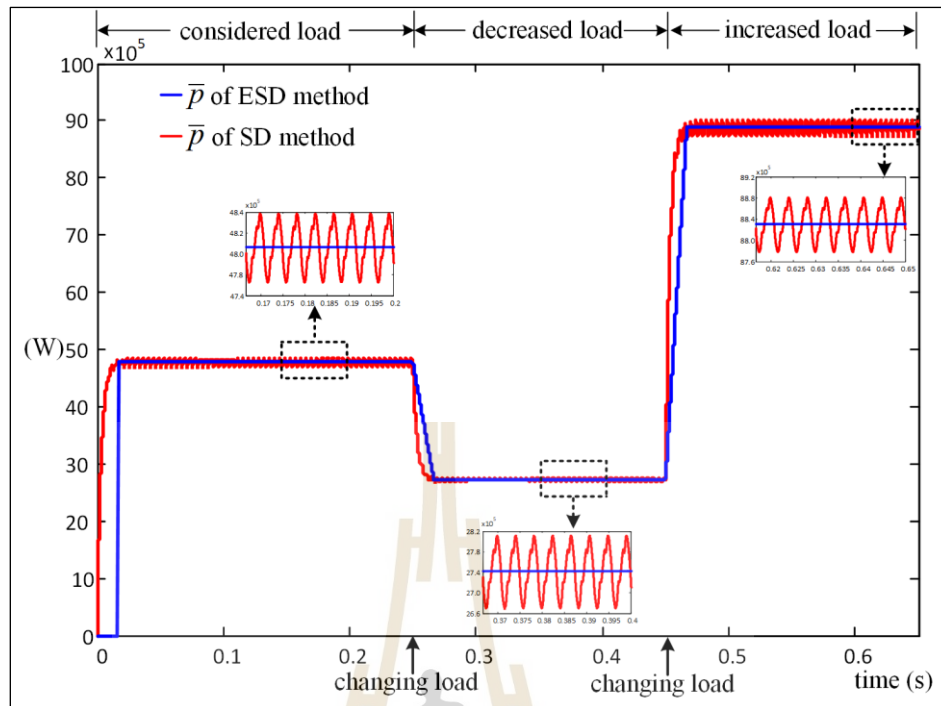


รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี ESD สำหรับระบบทดสอบที่หนึ่ง

จากผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงในตารางที่ 4.2 อธิบายได้ว่า การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะให้สมรรถนะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธีซิงโครนัส ซึ่งสังเกตได้จาก $\%THD_i$ ภายหลังจากชดเชยทางด้านเฟสรวมและทางด้านสามเฟสมีค่าต่ำกว่าวิธีการตรวจจับซิงโครนัส ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะมีการนำการวิเคราะห์ฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อนที่มีจุดเด่นในด้านการแยกปริมาณฮาร์มอนิกออกจากปริมาณมูลฐานมาประยุกต์ใช้งานในส่วนของวงจรกรอง ส่งผลให้การแยกกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสัญญาณตรง (\bar{p}) มีสมรรถนะที่ดีกว่าวิธีการตรวจจับซิงโครนัส สามารถแสดงได้ดังรูป 4.19 จากรูปดังกล่าว พบว่า รูปสัญญาณของค่ากำลังไฟฟ้า \bar{p} จากวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะมีลักษณะเรียบไม่มีการกระเพื่อม ซึ่งแสดงถึงปริมาณที่ความถี่มูลฐานไม่มีปริมาณที่ความถี่ฮาร์มอนิกปะปน ส่วนรูปสัญญาณของค่ากำลังไฟฟ้า \bar{p} จากวิธีการตรวจจับซิงโครนัสมีลักษณะกระเพื่อม ซึ่งแสดงว่า สัญญาณดังกล่าวมีปริมาณที่ความถี่ฮาร์มอนิกปะปนอยู่ด้วย ด้วยเหตุนี้ จึงส่งผลให้การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะส่งผลให้ค่า $\%THD_i$ ภายหลังจากชดเชยต่ำกว่าวิธีการตรวจจับซิงโครนัส

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่หนึ่ง

วิธีการคำนวณกระแสอ้างอิง	สถานะของกระแสโหลด	$\%THD_i$ ด้านเฟสรวม		$\%THD_i$ ด้านสามเฟส			$\%CUF$	PF
		เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c		
ก่อนการชดเชย								
พิจารณา	พิจารณา	21.52	21.52	21.48	21.48	21.48	0.00	0.976
	ลดลง	20.11	20.11	20.00	20.00	20.00	0.00	0.974
	เพิ่มขึ้น	22.39	22.39	22.37	22.37	22.37	0.00	0.975
ภายหลังจากชดเชย								
SD	พิจารณา	1.17	0.98	1.17	1.04	1.01	0.00	0.998
	ลดลง	1.34	0.92	1.34	1.07	1.00	0.00	0.995
	เพิ่มขึ้น	1.98	1.40	1.25	1.98	1.03	0.00	0.999
ESD	พิจารณา	0.42	0.41	0.42	0.41	0.41	0.00	0.998
	ลดลง	0.50	0.39	0.49	0.42	0.41	0.00	0.995
	เพิ่มขึ้น	0.45	0.42	0.45	0.43	0.43	0.00	1.000



รูปที่ 4.19 สมรรถนะการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้า \bar{p} ด้วยวิธี SD และ ESD ในระบบทดสอบที่หนึ่ง

4.6.2 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่สอง

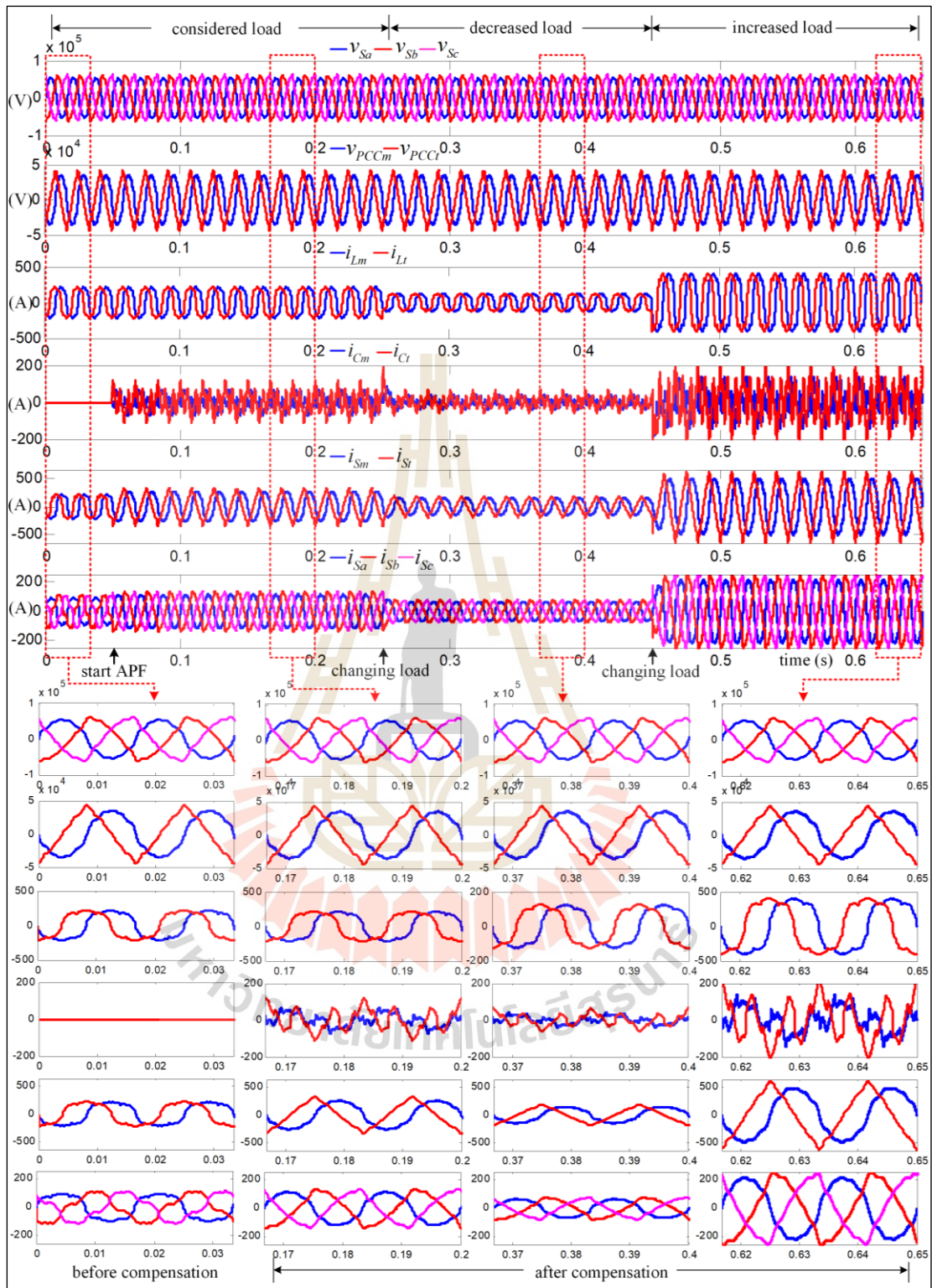
ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะสำหรับระบบทดสอบที่สอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ โดยแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในระบบทดสอบที่สองมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ รายละเอียดของระบบทดสอบที่สองได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.5.2 ดังนั้น ในรูปที่ 4.20 และ 4.21 รูปสัญญาณแรงดัน v_{Sa} , v_{Sb} และ v_{Sc} จึงมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 10.3% ทั้งสามเฟส ส่งผลให้รูปสัญญาณแรงดัน v_{PCCm} และ v_{PCCl} มีลักษณะผิดเพี้ยนตามไปด้วย โดยมีค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 10.17% และ 10.18% ตามลำดับ เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟเริ่มฉีดกระแสชดเชยที่เวลา 0.05 วินาที เป็นต้นไป ปรากฏว่า รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{Sr} จากที่มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ กลับมามีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม จากรูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{Sr} ภายหลังจากชดเชย สามารถสังเกตได้ชัดว่า รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{Sr} จากวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะมีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มากกว่าการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส ทั้งนี้ เนื่องจาก วิธีการตรวจจับซิงโครนัสให้ผลการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงที่คลาดเคลื่อนจากกระแสอ้างอิงที่ควรจะเป็นในกรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะผิดเพี้ยนจากรูปสัญญาณไซน์ ผลดังกล่าวทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{Sr} ภายหลังจากชดเชยยังคงมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์

ซึ่งรูปสัญญาณกระแส i_{sm} และ i_{st} จะส่งผลโดยตรงต่อรูปสัญญาณกระแส i_{sa}, i_{sb} และ i_{sc} อีกด้วย นอกจากนี้ ระบบทดสอบที่สอง มีการใช้งานโหลดสมดุล ส่งผลให้ %*CUF* ก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยทั้งสองวิธีมีค่าเท่ากับ 0% และการคำนวณกระแสอ้างอิงทั้งสองวิธี ให้ผลการปรับปรุงค่า *PF* ที่ดีขึ้น โดยพิจารณาจากค่า *PF* ที่เพิ่มขึ้นภายหลังการชดเชย ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงทั้งสองวิธีที่น่าเสนอได้ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

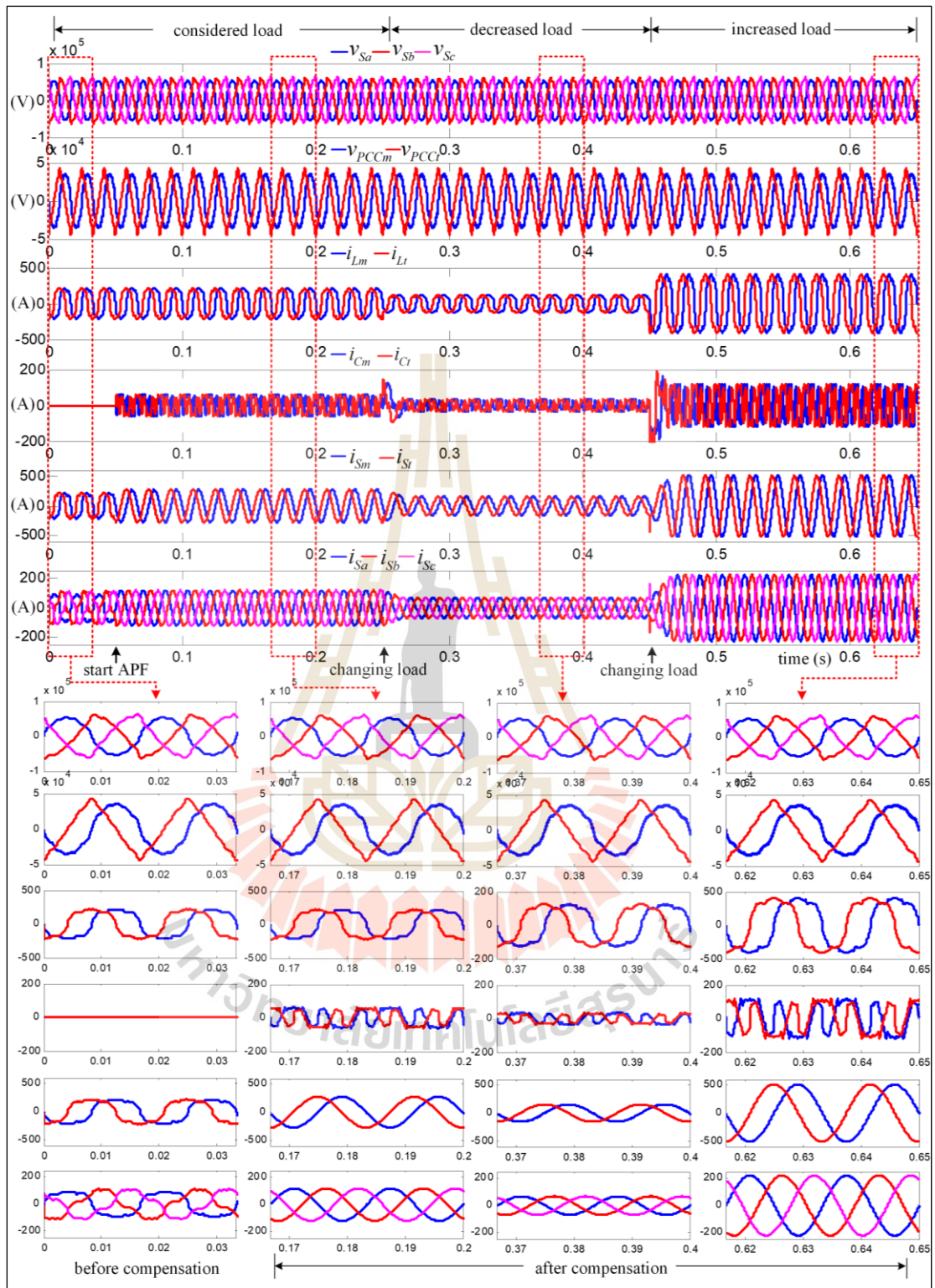
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่สอง

วิธีการ คำนวณ กระแส อ้างอิง	สถานะของ กระแสโหลด	%THD _i ด้านเฟสรวม		%THD _i ด้านสามเฟส			%CUF	PF
		เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c		
	ก่อนการชดเชย							
พิจารณา ลดลง เพิ่มขึ้น	พิจารณา	22.23	21.21	22.19	21.51	21.33	0.00	0.976
	ลดลง	21.35	19.58	21.25	20.09	19.17	0.00	0.974
	เพิ่มขึ้น	22.77	22.22	22.75	22.39	22.29	0.00	0.976
ภายหลังการชดเชย								
SD	พิจารณา	10.95	10.81	10.96	10.85	10.84	0.00	0.998
	ลดลง	11.00	10.87	11.01	10.95	10.85	0.00	0.994
	เพิ่มขึ้น	11.05	10.77	11.06	10.83	10.86	0.00	0.999
ESD	พิจารณา	0.43	0.41	0.37	0.44	0.43	0.00	0.998
	ลดลง	0.51	0.38	0.45	0.48	0.46	0.00	0.994
	เพิ่มขึ้น	0.45	0.42	0.42	0.44	0.44	0.00	0.999

จากตารางที่ 4.3 สามารถอธิบายได้ว่า การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสสำหรับระบบทดสอบที่สองให้สมรรถนะไม่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิก เพราะว่า วิธีดังกล่าวมีค่า %THD_i ในแต่ละเฟสภายหลังการชดเชยสูงกว่าข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519 - 2014 ทั้งนี้เนื่องจาก ปัจจัยหลักมาจากผลกระทบทางด้านการคำนวณค่ากระแส i_{cm}^* และ i_{ct}^* ที่นำแรงดัน v_{PCCm} และ v_{PCCt} ลักษณะผิดเพี้ยนจากรูปสัญญาณไซน์ไปใช้สำหรับการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงดังกล่าว ส่งผลให้การคำนวณค่ากระแส i_{cm}^* และ i_{ct}^* มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ควรจะเป็น ซึ่งแตกต่างจากวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะที่การทำงานของอัลกอริทึมการตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวก ทำหน้าที่คำนวณค่าแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวกที่จุด PCC (v'_{PCCm}, v'_{PCCt}) เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.22 ส่งผลให้การคำนวณค่า i_{cm}^* และ i_{ct}^* มีความถูกต้องและแม่นยำ และเมื่อพิจารณาสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ พบว่า

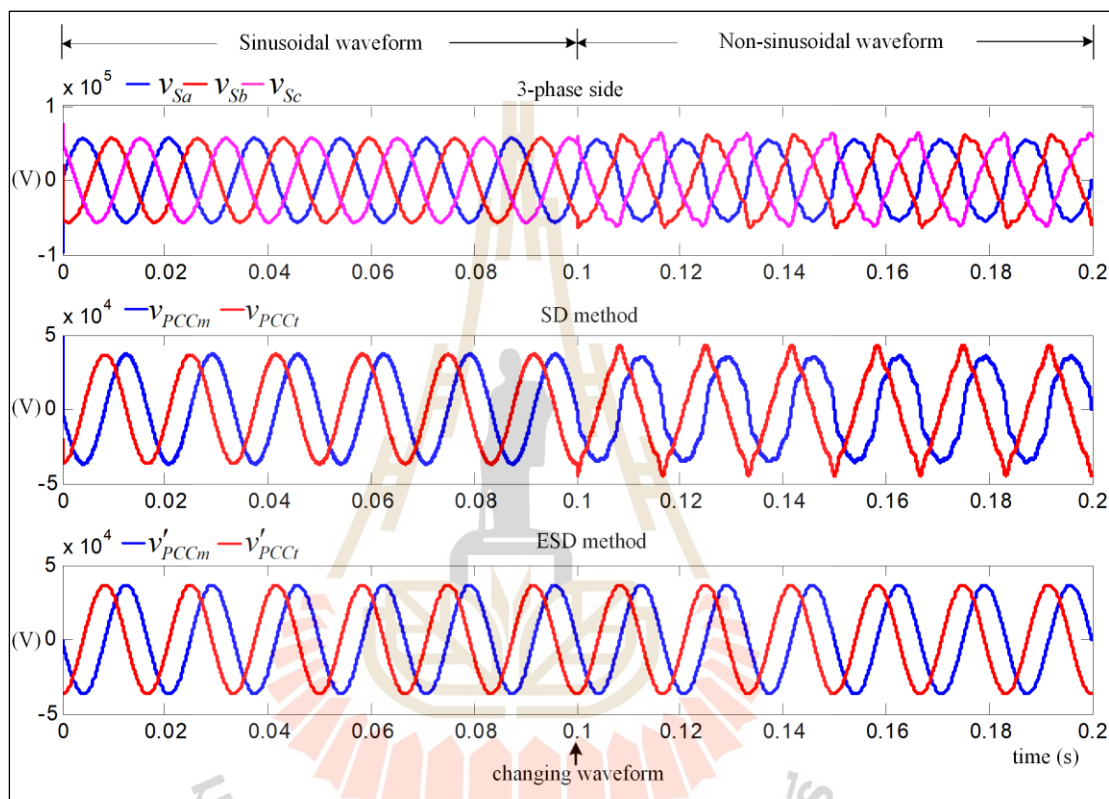


รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี SD สำหรับระบบทดสอบที่สอง



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี ESD สำหรับระบบทดสอบที่สอง

การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธีดังกล่าว มีค่า $\%THD_i$ ในแต่ละเฟสภายหลังจากชดเชยมีค่าน้อยกว่าการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสเป็นอย่างมาก และค่าดังกล่าวอยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 จากผลการจำลองสถานการณ์ข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่า การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะมีสมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีกว่าการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส



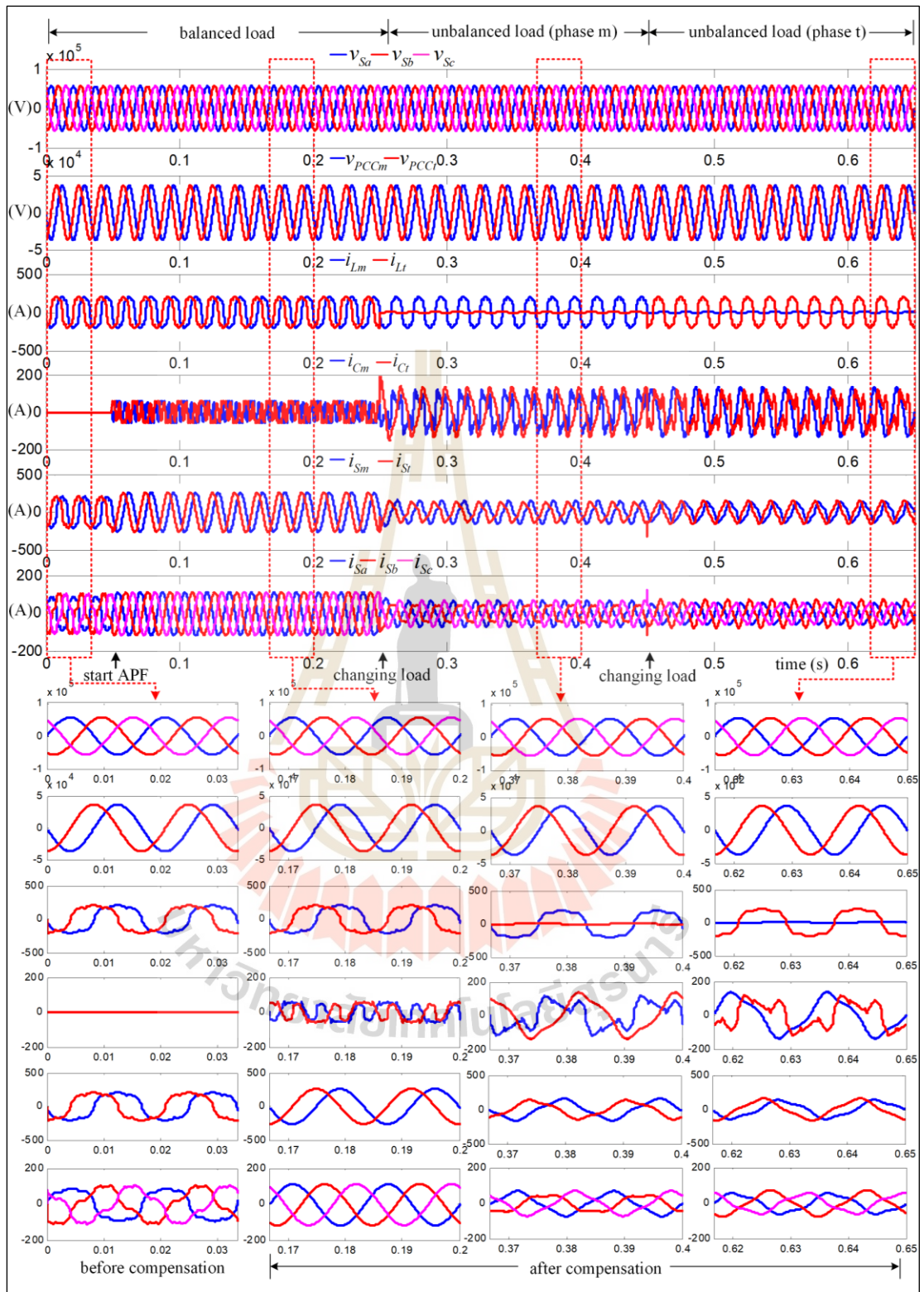
รูปที่ 4.22 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี SD และวิธี ESD

4.6.3 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่สาม

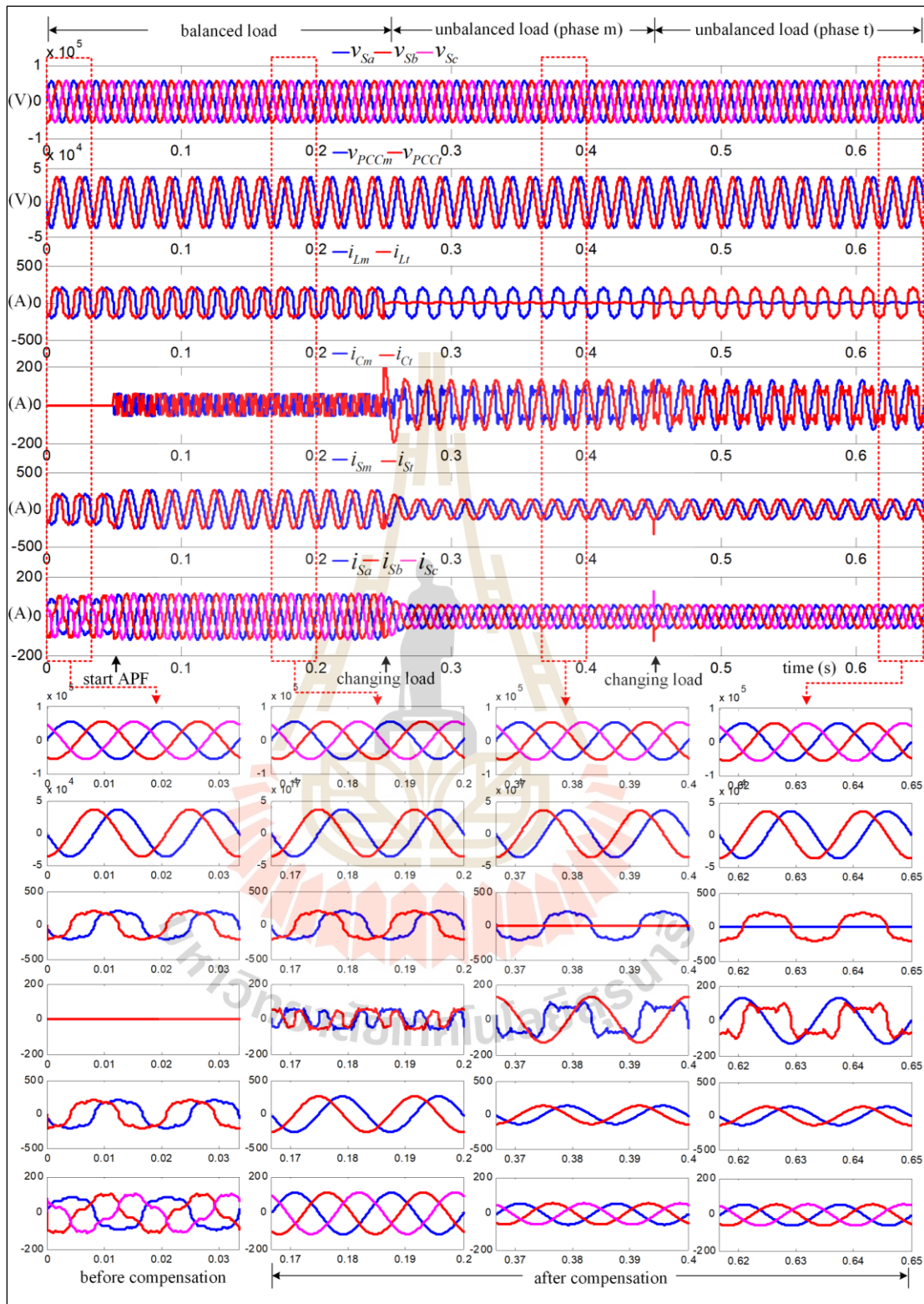
ระบบทดสอบที่สามเป็นระบบทดสอบเพื่อทำการพิจารณาลักษณะการจ่ายโหลดแบบไม่สมดุล กล่าวคือ บางช่วงของการทดสอบมีการการจ่ายโหลดรถไฟฟ้าเฉพาะเฟส m หรือ เฟส t เพียงหนึ่งเฟสเท่านั้น การจ่ายโหลดในลักษณะนี้ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า ผลการจำลองสถานการณ์การคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่สาม กรณีการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส แสดงได้ดังรูปที่ 4.23 ในส่วนของวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ แสดงได้ดังรูปที่ 4.24 ผลการจำลองสถานการณ์จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 สังเกตได้ว่า รูปสัญญาณแรงดัน v_{Sa} , v_{Sb} และ v_{Sc} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ เช่นเดียวกับระบบทดสอบที่หนึ่ง แต่มีการจ่ายโหลดรถไฟฟ้าแบ่งออกเป็นสามช่วง คือ ช่วงโหลดสมดุล

ช่วงโหนดไม่สมดุลเฟส m และช่วงโหนดไม่สมดุลเฟส t ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์และไม่สมดุล โดยมีค่า $\%THD_i$, $\%CUF$ และ PF ก่อนการชดเชยแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 หลังจากนั้นที่เวลา 0.05 วินาที วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติทำการฉีดกระแส i_{cm} และ i_{ct} เข้าสู่ระบบ ปรากฏว่า รูปสัญญาณกระแส i_{sm} และ i_{st} มีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์ เป็นผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} กลับมามีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ นอกจากนี้ ผลการฉีดกระแสชดเชยยังทำให้เกิดการชดเชยความไม่สมดุลกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} อีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้น ภายหลังจากการฉีดกระแสชดเชยค่าตัวประกอบกำลังยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยมีดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าจากการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะสำหรับระบบทดสอบที่สาม ดังตารางที่ 4.4

จากผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ ในตารางที่ 4.4 กรณีกระแสโหนดไม่สมดุลแสดงให้เห็นได้ชัดว่า $\%THD_i$ ภายหลังจากชดเชยในแต่ละเฟสของการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะมีค่าน้อยกว่าวิธีการตรวจจับซิงโครนัสเป็นอย่างมาก อีกทั้งค่าดังกล่าวยังคงอยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ทั้งนี้เนื่องมาจากวงจรกรองผ่านต่ำที่ความถี่ตัด 50 Hz ของการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส มีการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้า \bar{p} ได้ไม่สมบูรณ์เมื่อโหนดมีลักษณะไม่สมดุล แต่วิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ มีการใช้การวิเคราะห์ฟูริเยร์วินโดว์เลื่อนสำหรับแยกปริมาณกำลังไฟฟ้า \bar{p} ซึ่งมีความถูกต้องและแม่นยำสูงกว่าการใช้วงจรกรองผ่านต่ำดังกล่าว ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากลักษณะการกระเพื่อมของรูปสัญญาณกำลังไฟฟ้า \bar{p} ดังรูปที่ 4.25 ข้อสังเกตอีกประการหนึ่ง คือ การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ ยังให้สมรรถนะการปรับปรุงความไม่สมดุลของกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ดีกว่าวิธีการตรวจจับซิงโครนัส โดยพิจารณาจาก $\%CUF$ ที่มีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้ ค่าตัวประกอบกำลังที่ได้จากการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะในกรณีโหนดไม่สมดุลมีค่ามากกว่าวิธีการตรวจจับซิงโครนัสอีกด้วย ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่า การคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่สามด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะมีสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่ดีกว่าวิธีการตรวจจับซิงโครนัส



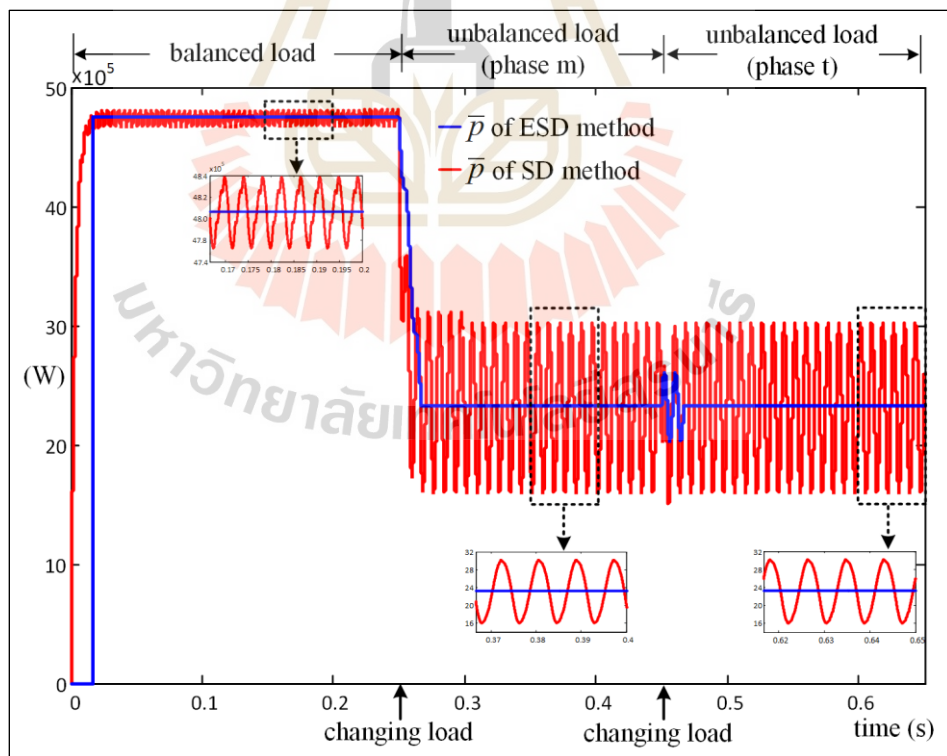
รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี SD สำหรับระบบทดสอบที่สาม



รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี ESD สำหรับระบบทดสอบที่สาม

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่สาม

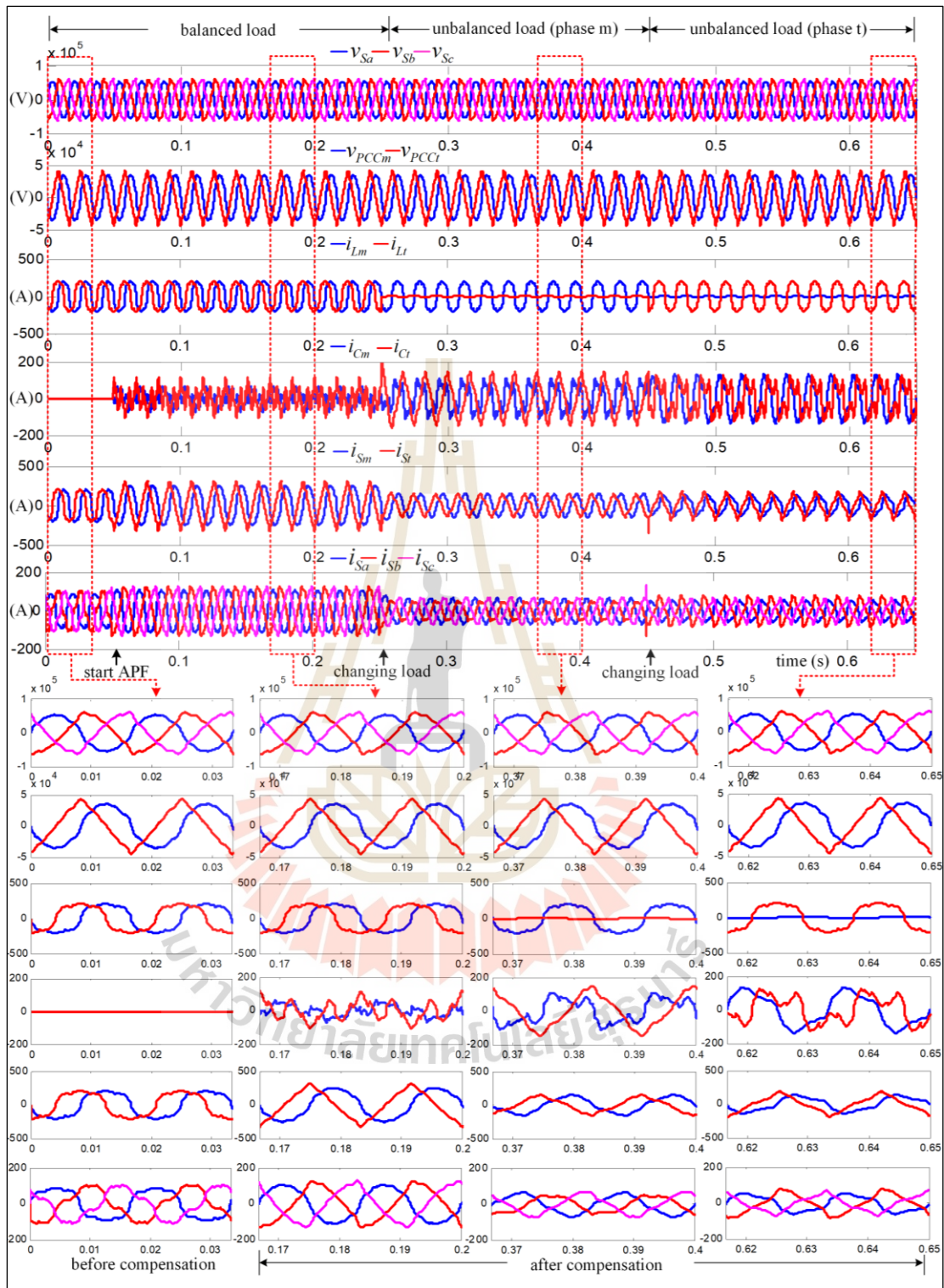
วิธีการ คำนวณ กระแส อ้างอิง	สถานะของ กระแสโหลด	%THD _i ด้านเฟสรวม		%THD _i ด้านสามเฟส			%CUF	PF
		เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c		
ก่อนการชดเชย								
กระแส อ้างอิง	สมดุล	21.51	21.51	21.46	21.46	21.46	0.00	0.976
	ไม่สมดุลเฟส m	21.51	0.00	21.46	19.65	23.62	95.45	0.684
	ไม่สมดุลเฟส t	0.00	21.51	7.27	22.13	20.82	95.45	0.713
ภายหลังการชดเชย								
SD	สมดุล	1.17	0.98	1.17	1.04	1.01	0.00	0.998
	ไม่สมดุลเฟส m	14.05	16.71	13.82	18.37	14.32	14.87	0.974
	ไม่สมดุลเฟส t	16.71	14.05	16.84	13.14	16.33	14.88	0.967
ESD	สมดุล	0.42	0.41	0.42	0.41	0.41	0.00	0.998
	ไม่สมดุลเฟส m	0.78	0.11	0.78	0.40	0.40	0.31	0.993
	ไม่สมดุลเฟส t	0.11	0.78	0.11	0.68	0.67	0.31	0.993



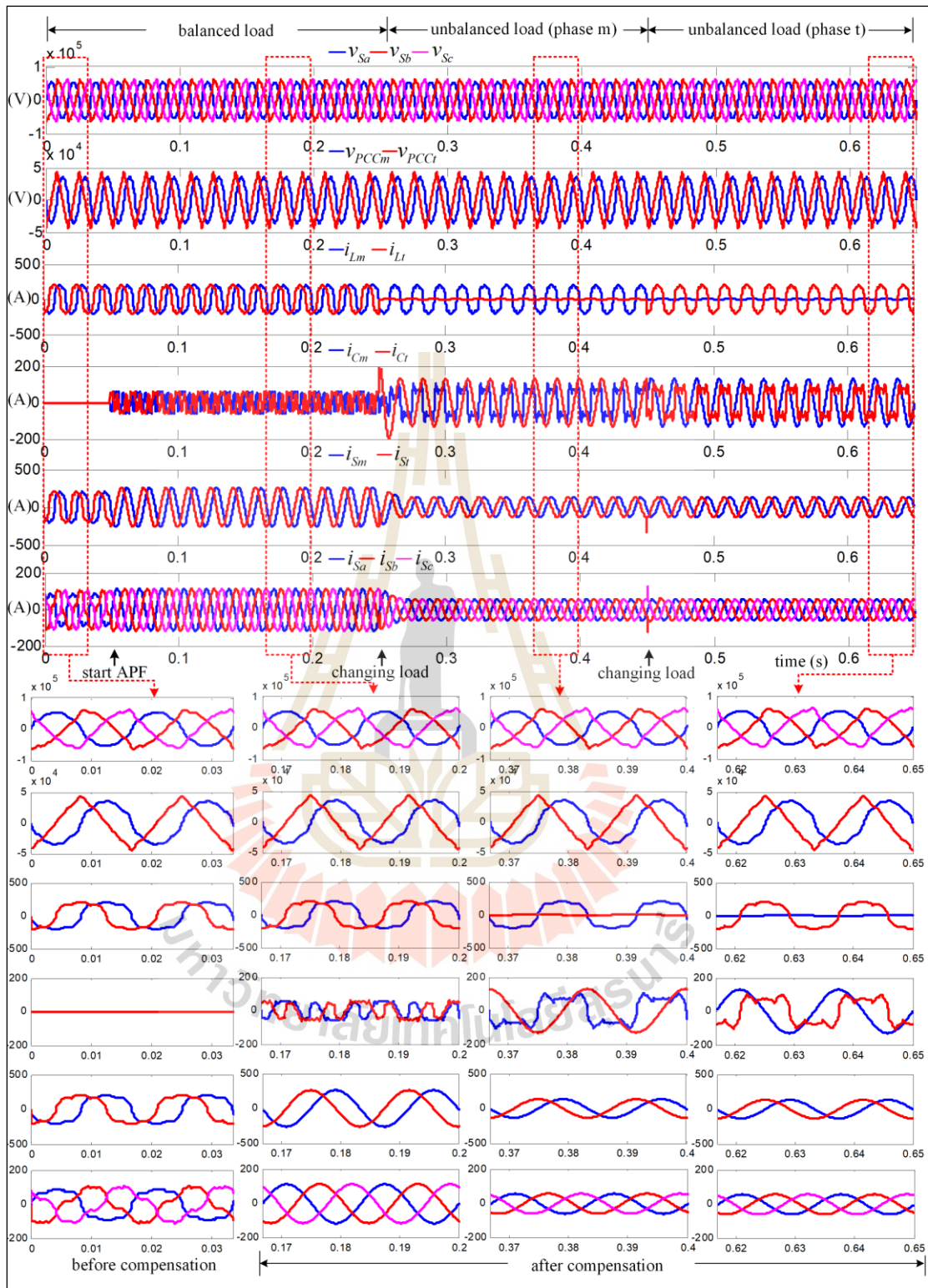
รูปที่ 4.25 สมรรถนะการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้า \bar{p} ด้วยวิธี SD และ ESD ในระบบทดสอบที่สอง

4.6.4 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่สี่

การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะสำหรับระบบทดสอบที่สี่ให้ผลการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 4.26 และ 4.27 จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ระบบทดสอบที่สี่เป็นระบบที่รูปสัญญาณแรงดัน v_{sa} , v_{sb} และ v_{sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์เช่นเดียวกับระบบทดสอบที่สอง แต่ในระบบทดสอบที่สี่มีการจ่ายโหลดแบบไม่สมดุลในลักษณะเดียวกันกับระบบทดสอบที่สาม ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแสทางด้านเฟสรวม i_{Sm} และ i_{St} และกระแสที่แหล่งจ่ายสามเฟส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ในช่วงก่อนการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.05 วินาที มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์และไม่สมดุล โดยมีค่า $\%THD_i$, $\%CUF$ และ PF แสดงได้ดังตารางที่ 4.5 เมื่อระบบการชดเชยเริ่มทำงานตั้งแต่ช่วงเวลา 0.05 วินาที เป็นต้นไป โดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติทำหน้าที่ฉีดกระแส i_{cm} และ i_{ct} เข้าสู่ระบบที่จุด PCC ส่งผลให้ค่า $\%THD_i$ ภายหลังจากฉีดกระแสชดเชยในแต่ละเฟสที่ได้รับการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย แสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และลักษณะรูปสัญญาณ i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ยังคงผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์และมีลักษณะไม่สมดุล โดยค่า $\%THD_i$ ดังกล่าวมีค่าเกินกรอบข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจาก วิธีการตรวจจับซิงโครนัสให้ผลการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงที่ไม่ถูกต้องในกรณีที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากรูปสัญญาณไซน์ และในกรณีที่โหลดไม่สมดุลวงจรกรองผ่านต่ำมีการแยกปริมาณฮาร์มอนิกได้ไม่สมบูรณ์ ดังที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.62 และ 4.63 ตามลำดับสำหรับผลการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าโดยใช้วิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะในการคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ สามารถแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งพบว่า วิธีการดังกล่าวให้ค่า $\%THD_i$ ภายหลังจากชดเชยในแต่ละเฟสน้อยกว่าการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสเป็นอย่างมาก เนื่องจากวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะมีการทำงานของอัลกอริทึมการตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวกเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ และมีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับการวิเคราะห์ฟูริเยร์วินโดว์เลื่อนในการแยกปริมาณกำลังไฟฟ้า p ได้อย่างสมบูรณ์ จากปัจจัยดังกล่าว เป็นผลให้การคำนวณค่ากระแสอ้างอิงมีความถูกต้องและแม่นยำ จึงทำให้ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ามีค่าดีกว่าการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี SD สำหรับระบบทดสอบที่สี่



รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธี ESD สำหรับระบบทดสอบที่สี่

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับระบบทดสอบที่สี่

วิธีการ คำนวณ	สถานะของ กระแสโหลด	%THD _i ด้านเฟสรวม		%THD _i ด้านสามเฟส			%CUF	PF
		เฟส <i>m</i>	เฟส <i>t</i>	เฟส <i>a</i>	เฟส <i>b</i>	เฟส <i>c</i>		
กระแส อ้างอิง	ก่อนการชดเชย							
	สมดุล	22.23	21.21	22.19	21.51	21.33	0.00	0.976
	ไม่สมดุลเฟส <i>m</i>	22.22	0.00	22.17	20.52	24.14	95.45	0.694
	ไม่สมดุลเฟส <i>t</i>	0.00	21.19	8.04	21.85	20.46	95.45	0.703
ภายหลังการชดเชย								
SD	สมดุล	10.95	10.81	10.96	10.85	10.84	0.00	0.998
	ไม่สมดุลเฟส <i>m</i>	12.37	14.81	12.01	15.17	13.05	12.81	0.979
	ไม่สมดุลเฟส <i>t</i>	19.34	18.21	18.15	17.94	18.23	16.63	0.963
ESD	สมดุล	0.43	0.41	0.37	0.44	0.43	0.00	0.998
	ไม่สมดุลเฟส <i>m</i>	0.79	0.11	0.67	0.42	0.40	0.31	0.993
	ไม่สมดุลเฟส <i>t</i>	0.11	0.78	0.26	0.77	0.76	0.31	0.993

การเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัส และวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะกับระบบทดสอบทั้งสี่ระบบ ให้ผลการทดสอบไปในแนวทางเดียวกัน โดยพบว่า วิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะให้สมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่ดีกว่าวิธีการตรวจจับซิงโครนัส โดยพิจารณาจากดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย %THD_i, %CUF และ PF นอกจากนี้ ยังสังเกตได้ว่า การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะมีค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ทั้งสี่ระบบทดสอบ ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่า การคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น สามารถคำนวณกระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งทำให้มีสมรรถนะที่ดีในการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า ถึงแม้ว่า แรงดัน v_{sa} , v_{sb} และ v_{sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ และเกิดความไม่สมดุลที่กระแส i_{cm} และ i_{ct} ด้วยเหตุนี้ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงเลือกใช้วิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะสำหรับการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟเพื่อปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า

4.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสและวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ ซึ่งวิธีการตรวจจับซิงโครนัสที่ผู้วิจัยได้

ทำการศึกษา มีข้อด้อยในเรื่องการแยกปริมาณทางไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานออกจากปริมาณทางไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิกใด ๆ และการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงมีความคลาดเคลื่อนจากกระแสอ้างอิงที่ควรจะเป็น เมื่อพิจารณาการคำนวณกระแสอ้างอิงภายใต้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของการคำนวณกระแสอ้างอิงให้ดียิ่งขึ้น ผู้วิจัยได้นำการตรวจจับชิงโครนส์มาพัฒนาใหม่ โดยเพิ่มอัลกอริทึมการตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวก และหลักการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อนในส่วนของวงจรกรองความถี่ ซึ่งเรียกว่า การตรวจจับชิงโครนส์แบบเพิ่มสมรรถนะ วิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบแรงไฟฟ้า การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วย การกำจัดฮาร์โมนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล ได้ดำเนินการกับระบบทดสอบทั้งสี่ระบบที่มีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงระหว่างวิธีการตรวจจับชิงโครนส์และวิธีการตรวจจับชิงโครนส์แบบเพิ่มสมรรถนะ พบว่า วิธีการตรวจจับแบบเพิ่มสมรรถนะที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นให้สมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงที่ดีกว่าวิธีการตรวจจับชิงโครนส์ทั้งสี่ระบบทดสอบ ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับชิงโครนส์แบบเพิ่มสมรรถนะ ทำหน้าที่คำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบแรงไฟฟ้า

บทที่ 5

การออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟและระบบควบคุม

5.1 บทนำ

การออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณาจะนำไปสู่สมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่ดี ดังนั้น การออกแบบค่าพารามิเตอร์ และพิกัดของวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง และค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวยังนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่ประกอบไปด้วย ระบบควบคุมกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง โดยวัตถุประสงค์ของระบบควบคุมกระแสชดเชย คือ การควบคุมกระแสชดเชยให้มีค่าใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิงที่คำนวณได้จากการตรวจจับชิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ ในส่วนวัตถุประสงค์ของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง คือ การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงที่ได้จากการออกแบบ การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญของการศึกษาระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากตัวควบคุมพีไอให้ผลตอบสนองในสภาวะคงตัวที่ดี และเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการพัฒนาตัวควบคุมในอนาคต รายละเอียดการออกแบบค่าพารามิเตอร์ พิกัดและระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาได้ถูกนำเสนอไว้อย่างละเอียดในบทนี้

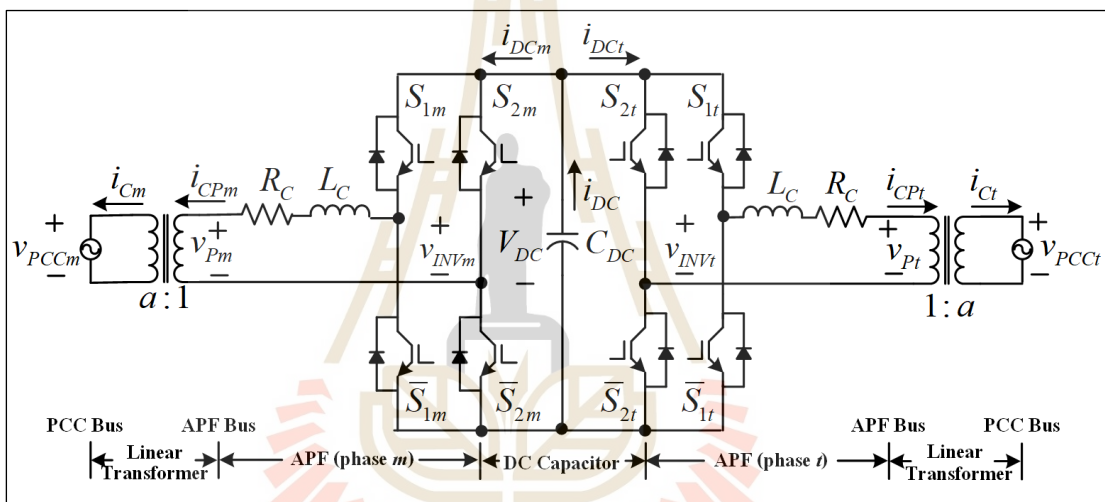
5.2 วงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า

วงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 โดยมีลักษณะโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสจำนวน 2 ชุด ที่มีการใช้ตัวเก็บประจุร่วม ซึ่งวงจรอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดมีไอจีบีที (IGBT) จำนวน 4 ตัว ต่อเรียงกันแบบบริดจ์ ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรดังกล่าวเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า และโหลดรถไฟความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) ผ่านตัวเหนี่ยวนำ (L_C) ตัวต้านทาน (R_C) และหม้อแปลงเชิงแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ทางด้านวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ส่งผลให้แรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟมีขนาดลดลงด้วย (A. Luo et al., 2011) โดยกระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Ci}) จะไหลจากแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ (v_{INVm} , v_{INVi}) ผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานไปยังแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (v_{PCCm} , v_{PCCi}) โดยผ่านกระบวนการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงเชิงเส้น ซึ่งมีอัตราส่วนขดลวดเท่ากับ $a:1$ ค่ากระแสชดเชยดังกล่าวจะนำไปหักลบกับกระแสโหลด (i_{Lm} , i_{Li}) ดังสมการที่ 5.1 และ 5.2 เพื่อปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิของหม้อ

แปลงกำลังที่สถานีขับเคลื่อนรถไฟ (i_{Sm}, i_{St}) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (i_{Sa}, i_{Sb}, i_{Sc}) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาแหล่งพลังงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ พบว่า ตัวเก็บประจุ (C_{DC}) ทำหน้าที่สะสมพลังงานให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เพื่อใช้สำหรับการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบ

$$i_{Sm} = i_{Lm} - i_{Cm} \quad (5.1)$$

$$i_{St} = i_{Lt} - i_{Ct} \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้า

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการพิจารณาโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟดังแสดงในรูปที่ 5.1 เริ่มต้นจากการวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ทางด้าน AC ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) ทางด้านเฟส m และเฟส t เพื่อหาสมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสชดเชยทางด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ดังสมการที่ (5.3) และ (5.4) ตามลำดับ โดยที่ i_{CPm}, i_{Cpt} คือ กระแสชดเชยทางด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส m และเฟส t ตามลำดับ และ v_{Pm}, v_{Pt} คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ทางด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส m และเฟส t ตามลำดับ

$$\frac{di_{CPm}}{dt} = \frac{v_{INVm} - R_C i_{CPm} - v_{Pm}}{L_C} \quad (5.3)$$

$$\frac{di_{CPt}}{dt} = \frac{v_{INVt} - R_C i_{CPt} - v_{Pt}}{L_C} \quad (5.4)$$

โครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่พิจารณาเป็นระบบที่มีการฉีดกระแสชดเชยผ่านหม้อแปลงเชิงเส้น ดังนั้น สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสชดเชยทางด้านระบบแรงไฟฟ้าและวงจรรอกำลังแอกทีฟของเฟส m และเฟส t ได้ดังสมการที่ (5.5) และ (5.6) ตามลำดับ

$$\frac{v_{PCCm}}{v_{Pm}} = \frac{i_{CPm}}{i_{Cm}} = a \quad (5.5)$$

$$\frac{v_{PCCt}}{v_{Pt}} = \frac{i_{CPt}}{i_{Ct}} = a \quad (5.6)$$

นำความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสชดเชยทางด้านวงจรรอกำลังแอกทีฟในสมการที่ (5.5) และ (5.6) แทนลงในสมการที่ (5.3) และ (5.4) ตามลำดับ จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสชดเชยทางด้านระบบแรงไฟฟ้างดสมการที่ (5.7) และ (5.8) ตามลำดับ ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของวงจรรอกำลังแอกทีฟในลำดับต่อไป

$$\frac{di_{Cm}}{dt} = \frac{v_{INVm}}{aL_C} - \frac{R_C i_{Cm}}{L_C} - \frac{v_{PCCm}}{a^2 L_C} \quad (5.7)$$

$$\frac{di_{Ct}}{dt} = \frac{v_{INVt}}{aL_C} - \frac{R_C i_{Ct}}{L_C} - \frac{v_{PCCt}}{a^2 L_C} \quad (5.8)$$

5.3 การออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟ

การออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณานำไปสู่สมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่ดี ดังนั้น การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟ ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความเหนี่ยวนำ (L_C) และค่าตัวเก็บประจุ (C_{DC}) จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลในระบบแรงไฟฟ้า นอกจากนี้ การออกแบบพิกัดของวงจรรอกำลังแอกทีฟและพิกัดของไอจีบีทีเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟ โดยรายละเอียดการออกแบบค่าพารามิเตอร์ และพิกัดของวงจรรอกำลังแอกทีฟ สามารถแสดงได้ดังนี้

5.3.1 การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ

การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ (L_C) โดยใช้วิธีการของ Ingram และ Round (D. Ingram, and S. Round, 1997) ซึ่งได้ผลลัพธ์ของการออกแบบด้วยวิธีดังกล่าวจะได้ขอบเขตของค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{C(\max)}$) ที่ทำให้วงจรรอกกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะของกระแสอ้างอิงในช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณสูงสุด โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวเหนี่ยวนำเฟส m และเฟส t มีค่าเท่ากัน ซึ่งสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำสูงสุดจากการพิจารณาเฟส m ได้ดังสมการที่ (5.9) โดยที่ค่า $\max \left[\frac{di_{CPm}^*}{dt} \right]$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.10)

$$L_{C(\max)} = \frac{V_{DC}^* - V_m}{\max \left[\frac{di_{CPm}^*}{dt} \right]} \quad (5.9)$$

$$\max \left[\frac{di_{CPm}^*}{dt} \right] = 2\pi f_h I_{h(\max)} \quad (5.10)$$

โดยที่ V_m คือ ค่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าทางด้านวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่จุด PCC (v_{Pm})
 $I_{h(\max)}$ คือ ค่าแอมพลิจูดของลำดับกระแสฮาร์โมนิกที่มีขนาดสูงสุด

จากการพิจารณาโครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่แสดงในรูปที่ 5.1 สังเกตได้ว่า ระบบที่พิจารณามีการฉีดกระแสชดเชยผ่านหม้อแปลงเชิงเส้นเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านวงจรรอกกำลังแอกทีฟมีขนาดลดลง ส่งผลให้แรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟมีขนาดลดลงด้วย นอกจากนี้ การฉีดกระแสชดเชยผ่านหม้อแปลงเชิงเส้นยังส่งผลให้กระแสชดเชยทางด้านวงจรรอกกำลังแอกทีฟมีขนาดเพิ่มขึ้น โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้หม้อแปลงเชิงเส้นที่มีอัตราส่วนของขดลวดเท่ากับ 1 ต่อ 26 เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าทางด้านวงจรรอกกำลังแอกทีฟให้มีค่าเท่ากับ 1000 V โดยทำการพิจารณาจากพิกัดของไอจีบีทีที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้ไม่เกิน 6500 V (ABB, 2016) ซึ่งการออกแบบแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (V_{DC}^*) ควรออกแบบให้มีค่ามากกว่าแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ทางด้านวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (V_m) เพื่อให้กระแสชดเชยมีทิศทางการไหลของจากรอกกำลังแอกทีฟไปยังจุด PCC ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดให้แรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 1700 V (ประมาณ 1.2 เท่าของค่า V_m) สำหรับค่า $\max \left[\frac{di_{CPm}^*}{dt} \right]$ ในสมการที่ (5.10) สามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบกระแสฮาร์โมนิก

ลำดับต่าง ๆ ของโหลดรถไฟความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 ของบทที่ 3 จากตารางดังกล่าว พบว่า กระแสไหลดฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ($f_h = 180 \text{ Hz}$) มีค่าสูงสุด ซึ่งมีแอมพลิจูด ($I_{h(\max)}$) เท่ากับ 39.9 A เมื่อพิจารณาผลจากการฉีดกระแสชดเชยผ่านหม้อแปลงเชิงเส้นทำให้กระแสไฟฟ้าทางด้านวงจรรองกำลังแอกทีฟมีขนาดเพิ่มขึ้น 26 เท่าตามอัตราส่วนขดลวดของหม้อแปลงเชิงเส้น โดยค่า $L_{C(\max)}$ ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.24 มิลลิเฮนรี แสดงได้ดังสมการที่ (5.11)

$$L_{C(\max)} = \frac{V_{DC}^* - V_m}{\max \left[\frac{di_{CPm}^*}{dt} \right]} = \frac{1700 - (\sqrt{2} \times 1000)}{2\pi \times 180 \times (26 \times 39.9)} = 0.24 \text{ mH} \quad (5.11)$$

การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำตามสมการที่ (5.11) พบว่า แนวทางการออกแบบไม่ได้คำนึงถึงค่ากระแสกระเพื่อม (ripple) ที่เกิดจากความถี่การสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ส่งผลให้ค่า $L_{C(\max)}$ ที่ได้จากสมการข้างต้น ไม่สามารถยืนยันได้ว่าค่า $L_{C(\max)}$ สามารถลดการกระเพื่อมของกระแสชดเชยได้ ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแนวทางการออกแบบค่า $L_{C(\max)}$ อีกแนวทางหนึ่งที่คำนึงถึงการกระเพื่อมของกระแสชดเชย (B. Singh, et al., 2015) ดังสมการที่ (5.12) โดยกำหนดให้ดัชนีการมอดูเลต (modulation index: m) มีค่าเท่ากับ 1 เพื่อให้อินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ค่าสูงสุด สำหรับค่าตัวประกอบความปลอดภัย (safety factor: k) ออกแบบไว้ที่ 125% เพื่อรองรับการทำงานเกินพิกัด ในส่วนของความถี่การสวิตช์ (switching frequency: f_{sw}) พิจารณาจากอันดับฮาร์โมนิกสูงสุดที่ต้องการกำจัด ซึ่งก็คือ อันดับที่ 50 ดังนั้น จึงกำหนดให้ความถี่การสวิตช์มีค่าเท่ากับ 6000 Hz และค่ากระแสชดเชยที่มีการกระเพื่อม (current ripple: I_{crpp}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.13)

$$L_{C(\max)} = \frac{mV_{DC}^*}{4k \times f_{sw} \times I_{crpp}} \quad (5.12)$$

$$I_{crpp} = 15\% I_{INV} \quad (5.13)$$

โดยที่ I_{INV} คือ กระแสอินเวอร์เตอร์ กำหนดให้มีค่า $I_{INV} \geq 125\% I_h$

$$I_h \text{ คือ กระแสฮาร์โมนิก มีค่า } I_h = \sqrt{I_{Lrms}^2 - I_{L1rms}^2}$$

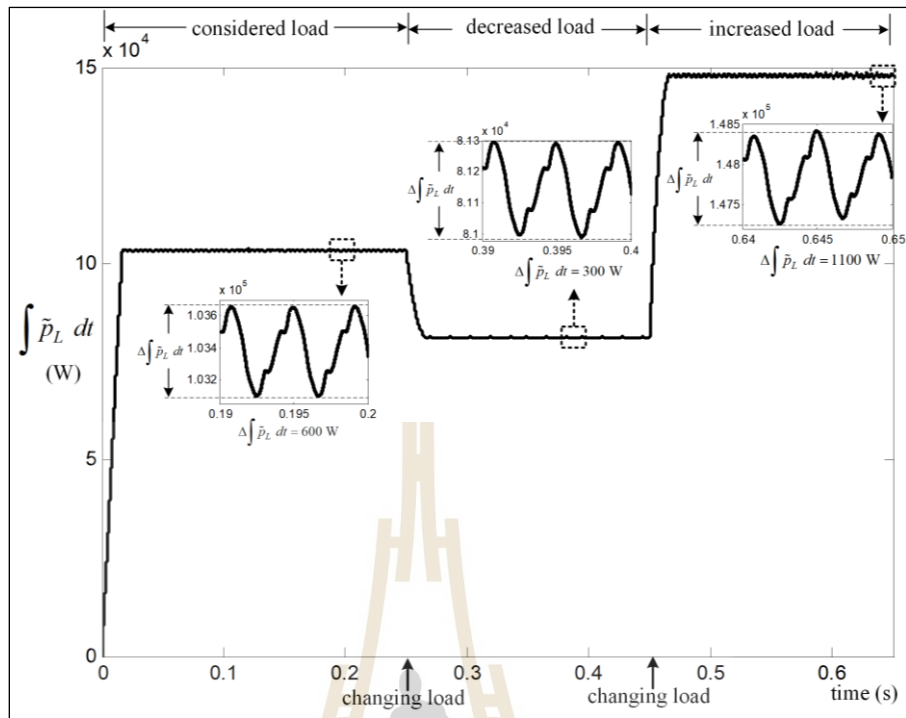
จากข้อมูลกระแสไหลตรงไฟความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา พบว่า กระแสอาร์เอ็มเอสของโหลด (I_{Lrms}) มีค่าเท่ากับ 172.6 A และกระแสอาร์เอ็มเอสที่ความถี่มูลฐานของโหลด (I_{Lrms}) มีค่าเท่ากับ 156.3 A ซึ่งสามารถคำนวณค่ากระแสอาร์โมนิกได้เท่ากับ 73.2 A จากค่ากระแสอาร์โมนิกดังกล่าว ส่งผลให้กระแสอินเวอร์เตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟมีค่าเท่ากับ 91.5 A ดังนั้น กระแสชดเชยที่มีการกระเพื่อมในสมการที่ (5.13) มีค่าเท่ากับ 13.7 A เมื่อนำค่าที่ได้ นำเสนอข้างต้นลงไปแทนในสมการที่ (5.12) โดยพิจารณาผลจากการฉีดกระแสชดเชยผ่านหม้อแปลงเชิงเส้น จะได้ค่า $L_{C(max)}$ เท่ากับ 0.16 มิลลิเฮนรี แสดงได้ดังสมการที่ (5.14)

$$L_{C(max)} = \frac{mV_{DC}^*}{4k \times f_{sw} \times I_{crpp}} = \frac{1 \times 1700}{4 \times 1.25 \times 6000 \times 26 \times 13.7} = 0.16 \text{ mH} \quad (5.14)$$

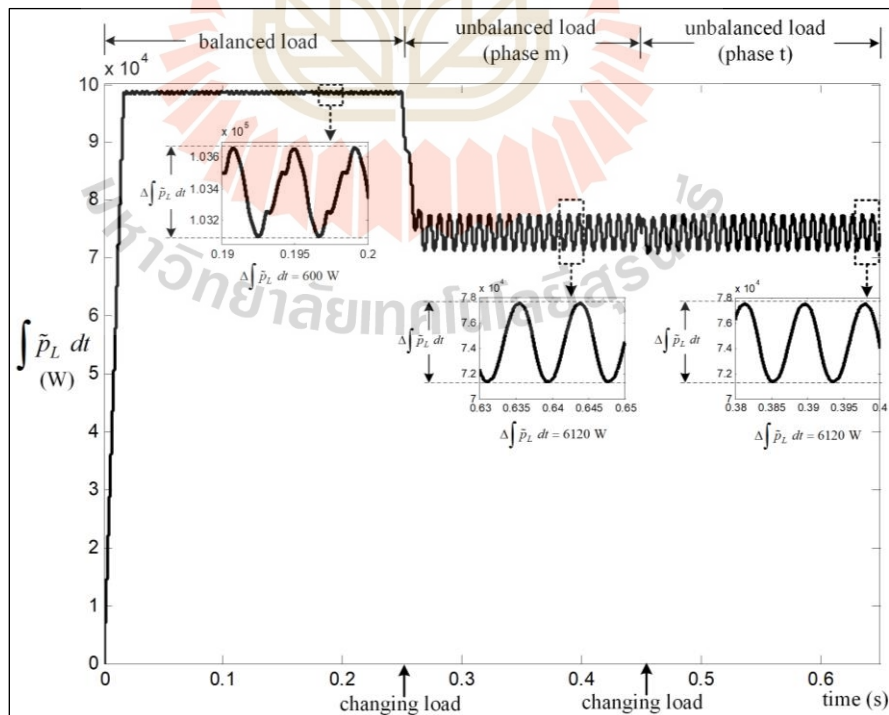
การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของทั้งสองวิธี ควรเลือกวิธีที่ออกแบบค่าดังกล่าวได้น้อยกว่า เพื่อครอบคลุมความสามารถของวงจรรอกกำลังแอกทีฟในการฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะของกระแสอ้างอิงในช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณสูงสุด และมีการลดการเพี้ยนของกระแสชดเชย ดังนั้น ขอบเขตของค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟในการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา จะต้องมีค่าไม่เกิน 0.16 มิลลิเฮนรี ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรรอกกำลังแอกทีฟของเฟส m และ เฟส t (L_C) เท่ากับ 0.1 มิลลิเฮนรี

5.3.2 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุ

ในปี ค.ศ. 1998 Thomas และคณะ ที่ได้นำเสนอแนวทางการออกแบบของตัวเก็บประจุ (C_{DC}) ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (T. Thomas et al., 1998) ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบคือ ขอบเขตต่ำสุดของค่าตัวเก็บประจุ ($C_{DC(min)}$) สำหรับเป็นแหล่งสะสมพลังงานเพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ดังสมการที่ (5.15) การออกแบบตามสมการดังกล่าวพิจารณาจากค่าการกระเพื่อมของผลรวมกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสัญญาณสลับของไหลตรงไฟฟ้า ($\Delta \int \tilde{p}_L dt$) ซึ่งรูปสัญญาณ $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ ของไหลตรงไฟความเร็วสูงในระบบทดสอบที่พิจารณา (ตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4) กรณีไหลตรงไฟฟ้ามีลักษณะสมดุลและไม่สมดุล แสดงได้ดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ



รูปที่ 5.2 ผลรวมกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสัญญาณสลับของโหลดกริดไฟฟ้ากรณีโหลดสมดุล



รูปที่ 5.3 ผลรวมกำลังไฟฟ้าขณะหนึ่งสัญญาณสลับของโหลดกริดไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุล

จากรูปดังกล่าว พบว่า การเปลี่ยนแปลงกระแสไหลตของระบบแรงไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อค่า $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ โดยจะเลือกใช้ค่า $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ ที่มีค่าสูงสุดในการคำนวณหาค่า $C_{DC(\min)}$ ตามสมการที่ (5.15) เนื่องจากค่า $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ สูงสุดจะให้ผลลัพธ์ของ $C_{DC(\min)}$ ที่ครอบคลุมโหลดรถไฟความเร็วสูงในระบบทดสอบที่พิจารณา ดังนั้น จึงเลือกใช้ $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ ในกรณีโหลดไม่สมดุล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6120 วัตต์ ในการคำนวณค่า $C_{DC(\min)}$ สำหรับค่าการกระเพื่อม (ΔV_{DC}) ของแรงดันบัสไฟตรงที่ยอมรับได้เป็นอีกเงื่อนไขในการคำนวณค่า $C_{DC(\min)}$ สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงกำหนดให้ ΔV_{DC} มีค่าไม่เกิน 3% ของแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง ซึ่งเท่ากับ 51 โวลต์ ผลจากการคำนวณสามารถกำหนดขอบเขตต่ำสุดของค่าตัวเก็บประจุได้เท่ากับ 70.59 มิลลิฟารัด แสดงได้ดังสมการที่ (5.15)

$$C_{DC(\min)} = \frac{\Delta \int \tilde{p}_L dt}{\Delta V_{DC} \times V_{DC}^*} = \frac{6120}{51 \times 1700} = 70.59 \text{ mF} \quad (5.15)$$

การออกแบบค่าตัวเก็บประจุตามแนวทางแรกที่แสดงในสมการที่ (5.15) พบว่า ไม่ได้พิจารณาถึงค่ากระแสแอกทีฟ (I_{active}) ที่ใช้สำหรับการชดเชยความไม่สมดุลของกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ทำให้ค่า $C_{DC(\min)}$ ที่ได้จากสมการข้างต้น ไม่สามารถยืนยันได้ว่ามีพลังงานเพียงพอในการนำไปใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟตามวัตถุประสงค์ปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแนวทางการออกแบบโดยคำนึงค่ากระแสแอกทีฟที่ใช้สำหรับการชดเชยความไม่สมดุล (B. Singh, et al., 2015) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (5.16) โดยค่ากระแสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (current of active power filter: I_{APF}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.17)

$$C_{DC(\min)} = \frac{I_{APF}}{2\omega_1 \Delta V_{DC}} \quad (5.16)$$

$$I_{APF} = k \times (I_h + I_{active}) \quad (5.17)$$

โดยที่ ω_1 คือ ความถี่เชิงมุมมูลฐาน กำหนดให้ ω_1 มีค่าเท่ากับ $2\pi f_1$ ($f_1 = 60 \text{ Hz}$)

จากข้อมูลกระแสไหลตรถไฟความเร็วสูงของระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณา พบว่า ค่ากระแสฮาร์มอนิก (I_h) มีค่าเท่ากับ 73.2 A (อธิบายวิธีการคำนวณไว้ในหัวข้อที่ 5.3.1) ในส่วนของค่ากระแสแอกทีฟ (I_{active}) พิจารณาการชดเชยความไม่สมดุลกระแสของกระแสไหลตในกรณีการจ่ายโหลดไฟฟ้า

เฉพาะเฟส m หรือ เฟส t เพียงหนึ่งเฟสเท่านั้น ซึ่งเป็นกรณีที่เกิดความไม่สมดุลของกระแสโหลดรุนแรงมากที่สุด ดังนั้น กระแสแอกทีฟที่จะต้องชดเชยความไม่สมดุลจะมีค่าเท่ากับกระแสอาร์เอ็มเอสที่ความถี่มูลฐานของโหลด (I_{Lrms}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 156.3 A และกำหนดให้ค่าตัวประกอบความปลอดภัย (safety factor: k) มีค่า 125% เพื่อรองรับการทำงานเกินพิกัด เมื่อนำค่าที่ได้นำเสนอข้างต้นลงไปแทนในสมการที่ (5.17) โดยพิจารณาผลจากการฉีดกระแสชดเชยผ่านหม้อแปลงเชิงเส้น ดังนั้น กระแส I_{APF} มีค่าเท่ากับ 286.9 A เมื่อนำค่าที่ได้นำเสนอข้างต้นลงไปแทนในสมการที่ (5.16) โดยพิจารณาผลจากการฉีดกระแสชดเชยผ่านหม้อแปลงเชิงเส้นจะได้ค่า $C_{DC(min)}$ เท่ากับ 193.98 มิลลิฟารัด แสดงได้ดังสมการที่ (5.18)

$$C_{DC(min)} = \frac{26 \times 286.9}{2 \times 2\pi \times 60 \times 51} = 193.98 \text{ mF} \quad (5.18)$$

การออกแบบค่าตัวเก็บประจุสำหรับเป็นแหล่งพลังงานให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟทั้งสองแนวทาง ควรเลือกแนวทางการออกแบบที่ได้ค่า $C_{DC(min)}$ ที่มากกว่า เพื่อครอบคลุมความสามารถของวงจรรอกกำลังแอกทีฟในการฉีดกระแสชดเชยตามวัตถุประสงค์การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่ต้องการ ดังนั้น ขอบเขตของค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟในการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา จะต้องมีค่ามากกว่า 193.98 มิลลิฟารัด ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุของวงจรรอกกำลังแอกทีฟของเฟส m และเฟส t (C_{DC}) เท่ากับ 200 มิลลิฟารัด

5.3.3 การออกแบบพิกัดของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

พิกัดของวงจรรอกกำลังแอกทีฟเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับใช้ประเมินขีดความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบที่พิจารณา โดยการออกแบบพิกัดของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ประกอบด้วย พิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ พิกัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ไอจีบีที (IGBT) ซึ่งมีรายละเอียดของการออกแบบดังต่อไปนี้

การออกแบบพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5.19) เมื่อพิจารณาระบบรางไฟฟ้า พบว่า แอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ทางด้านวงจรรอกกำลังแอกทีฟของเฟส m และเฟส t (V_p) มีค่าเท่ากับ $1000\sqrt{2}$ V และแอมพลิจูดของกระแสอินเวอร์เตอร์สูงสุดที่ต้องการชดเชย ($I_{INV(max)}$) สามารถพิจารณาได้จากการชดเชยกรณีความไม่สมดุลของกระแสโหลดที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อก่อนหน้า ดังนั้น กระแส $I_{INV(max)}$ จะมีค่าเท่ากับ $156.3\sqrt{2}$ A นอกจากนี้ เพื่อรองรับการทำงานเกินพิกัดจึงกำหนดให้ค่าตัวประกอบความปลอดภัย (k) มีค่า 125% จากข้อมูลดังกล่าว สามารถคำนวณค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของวงจรรอกกำลังแอกทีฟต่ำสุด (S_{min}) ได้เท่ากับ 10.16 MVA โดยพิจารณาผลจากการฉีดกระแสชดเชยผ่านหม้อแปลงเชิงเส้น

แสดงได้ดังสมการที่ (5.19) ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 15 MVA

$$S_{\min} = k \times V_p I_{INV(\max)} = 1.25 \times 1000\sqrt{2} \times 156.3\sqrt{2} \times 26 = 10.16 \text{ MVA} \quad (5.19)$$

พิกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (IGBT) ที่ทำหน้าที่การสวิตช์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟเป็นอีกอย่างหนึ่งที่จะต้องให้ความสำคัญในการออกแบบ โดยจะพิจารณาพิกัดต่ำสุดของค่าแรงดันไฟฟ้า ($V_{sw(\min)}$) และค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{sw(\min)}$) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5.20) และ (5.21) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแรงดันพุ่งเกิน (overshoot) ในช่วงสภาวะชั่วครู่ (V_d) ประมาณ 10% ของแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง และกำหนดให้ค่าตัวประกอบความปลอดภัย (safety factor: k) มีค่า 125% เพื่อรองรับการทำงานเกินพิกัด ดังนั้น พิกัดต่ำสุดของ $V_{sw(\min)}$ และ $I_{sw(\min)}$ มีค่าเท่ากับ 2337.5 V และ 3814.5 A ตามลำดับ จากผลการคำนวณดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ไอจีบีที ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 6500 V และ 4500 A ตามลำดับ

$$V_{sw(\min)} = (V_{DC}^* + V_d) \times k = (1700 + 170) \times 1.25 = 2337.5 \text{ V} \quad (5.20)$$

$$I_{sw(\min)} = \frac{(I_{INV(\max)} + I_{crpp})}{2} \times k = \frac{156.3\sqrt{2} + 13.7}{2} \times 26 \times 1.25 = 3814.5 \text{ A} \quad (5.21)$$

5.4 การออกแบบระบบควบคุมสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

ระบบควบคุมสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟมีสองส่วนที่สำคัญ ประกอบด้วย การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชย และการออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง การออกแบบระบบควบคุมทั้งสองส่วนได้ทำการพิจารณาจากโครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบแรงไฟฟ้า ดังที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2 โดยในบทนี้ จะทำการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI-Controller) เนื่องจากตัวควบคุมพีไอให้ผลตอบสนองในสถานะคงตัวที่ดี และเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการพัฒนาตัวควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟในอนาคต โดยมีรายละเอียดการออกแบบดังต่อไปนี้

5.4.1 การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ

ระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ได้รับการออกแบบจากการพิจารณาโครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสชดเชยทางด้านวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ดังสมการที่ (5.6) และ (5.7) ตามลำดับ จากสมการดังกล่าว สามารถจัดรูปสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ (v_{INVm} , v_{INVi}) ดังสมการที่ (5.22) และ (5.23)

$$\begin{array}{c}
 \text{plant : } u_m \\
 \hline
 v_{INVm} = L_C \left(\frac{di_{Cm}}{dt} \times a \right) + (R_C (i_{Cm} \times a)) + \left(\frac{v_{INVm}}{a} \right)
 \end{array} \quad (5.22)$$

$$\begin{array}{c}
 \text{plant : } u_t \\
 \hline
 v_{INVt} = L_C \left(\frac{di_{Ct}}{dt} \times a \right) + (R_C (i_{Ct} \times a)) + \left(\frac{v_{INVt}}{a} \right)
 \end{array} \quad (5.23)$$

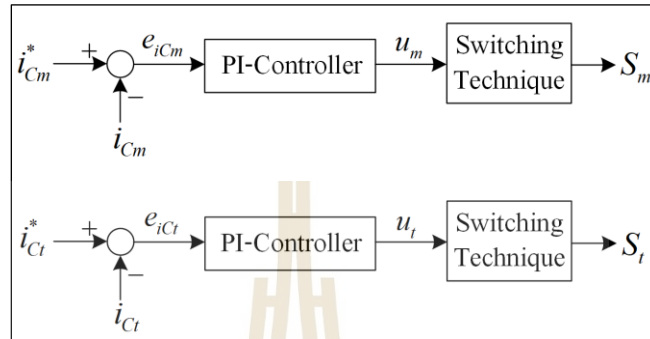
สมการแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ข้างต้น แสดงให้เห็นว่า การควบคุมกระแสชดเชย i_{Cm} และ i_{Ct} สามารถทำได้โดยการควบคุมค่าแรงดัน v_{INVm} และ v_{INVt} ซึ่งค่าดังกล่าวควบคุมผ่านพลาเน็ตของระบบควบคุมกระแสชดเชยในเทอม u_m และ u_t ซึ่งกำหนดให้ค่าทั้งสองเป็นค่าแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ในบทนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย เนื่องจากตัวควบคุมพีไอให้ผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัวที่ดี และเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการพัฒนาตัวควบคุมในอนาคต โดยตัวควบคุมพีไอจะมีสมรรถนะที่ดี เมื่อได้รับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ (K_{Pi} , K_{Ii}) ที่เหมาะสมกับระบบควบคุม การออกแบบค่า $K_{Pi(m,t)}$ และ $K_{Ii(m,t)}$ สำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า เริ่มต้นจากการกำหนดให้อินพุตของตัวควบคุม คือ ค่าผลต่างระหว่างกระแสอ้างอิงและกระแสชดเชย (e_{iCm} , e_{iCt}) แสดงได้ดังสมการที่ (5.24) และ (5.25) ตามลำดับ สำหรับเอาต์พุตของตัวควบคุม คือ ค่า u_m และ u_t ดังสมการที่ (5.26) และ (5.27) ตามลำดับ ค่าดังกล่าวจะเข้าสู่ขั้นตอนการสร้างสัญญาณการสวิตช์เพื่อสร้างพัลส์สำหรับควบคุมไอจีบีทีของวงจรรอกกำลังแอกทีฟเฟส m และเฟส t (S_m , S_t) แผนภาพโครงสร้างของระบบควบคุมกระแสชดเชยตัวควบคุมพีไอ แสดงได้ดังรูปที่ 5.4

$$e_{iCm} = i_{Cm}^* - i_{Cm} \quad (5.24)$$

$$e_{iCt} = i_{Ct}^* - i_{Ct} \quad (5.25)$$

$$u_m = L_C \left(\frac{di_{Cm}}{dt} \times a \right) + R_C (i_{Cm} \times a) = \underbrace{K_{Pim} e_{iCm} + K_{Iim} \int e_{iCm} dt}_{\text{PI Controller phase } m} \quad (5.26)$$

$$u_t = L_C \left(\frac{di_{Ct}}{dt} \times a \right) + R_C (i_{Ct} \times a) = \underbrace{K_{Pit} e_{iCt} + K_{Lit} \int e_{iCt} dt}_{\text{PI Controller phase } t} \quad (5.27)$$



รูปที่ 5.4 โครงสร้างของระบบควบคุมกระแสซัดเซดด้วยตัวควบคุมพีไอ

นำสมการที่ (5.26) และ (5.27) มาดำเนินการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) เพื่อให้การออกแบบตัวควบคุมอยู่บนโดเมนเอส ซึ่งผลการแปลงลาปลาซแสดงในสมการที่ (5.28) และ (5.29) ตามลำดับ

$$U_m = aL_C s I_{Cm} + aR_C I_{Cm} = K_{Pim} e_{iCm} + \frac{K_{lim} e_{iCm}}{s} \quad (5.28)$$

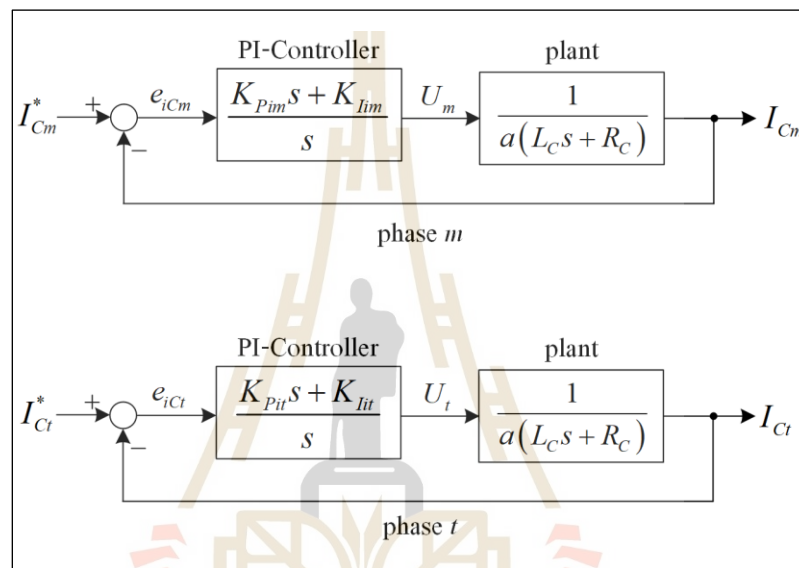
$$U_t = aL_C s I_{Ct} + aR_C I_{Ct} = K_{Pit} e_{iCt} + \frac{K_{lit} e_{iCt}}{s} \quad (5.29)$$

จากสมการที่ (5.28) และ (5.29) สามารถสามารถจัดรูปใหม่เป็นฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของตัวควบคุม ($G_{PI}(s)$) และพลานต์ของระบบควบคุม ($G_{PLANTi}(s)$) ได้ดังสมการที่ (5.30) และ (5.31) ตามลำดับ

$$G_{PI(m,t)}(s) = \frac{U_{(m,t)}}{e_{iC(m,t)}} = \frac{K_{PI(m,t)}s + K_{LI(m,t)}}{s} \quad (5.30)$$

$$G_{PLANTi}(s) = \frac{I_{C(m,t)}}{U_{(m,t)}} = \frac{1}{a[L_C s + R_C]} \quad (5.31)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมและพลานต์ของระบบที่แสดงไว้ในสมการที่ (5.30) และ (5.31) สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพไดอะแกรมระบบควบคุมกระแสชดเชยแบบวงปิด ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 5.5 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมกระแสชดเชยของเฟส m และเฟส t ($T_{iC(m,t)}(s)$) ได้ดังสมการที่ (5.32) เมื่อพิจารณาการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ($K_{Pi(m,t)}, K_{Ii(m,t)}$) โดยใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะ (characteristic polynomial) ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด $T_{iC(m,t)}(s)$ กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน $G(s)$ ดังสมการที่ (5.33) ผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ดังกล่าวทำให้ได้สมการสำหรับการออกแบบค่า $K_{Pi(m,t)}$ และ $K_{Ii(m,t)}$ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย ดังสมการ (5.34) และ (5.35) ตามลำดับ โดยการออกแบบกำหนดให้ ค่าอัตราการหน่วง (damping ratio: ζ) มีค่าเท่ากับ $\frac{\sqrt{2}}{2}$ เพื่อให้ผลตอบสนองมีลักษณะแบบหน่วงขาด (underdamped) และความถี่ธรรมชาติ (natural frequency: ω_{ni}) พิจารณาจากอันดับฮาร์มอนิกสูงสุดที่ต้องการกำจัด ซึ่งก็คือ อันดับที่ 50 ดังนั้น ค่า ω_{ni} มีค่าเท่ากับ 6000π

เรเดียนต่อวินาที ในส่วนของตัวต้านทาน (R_C) กำหนดให้น้อยมาก ๆ ประมาณเท่ากับ 0 โอห์ม เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น ลงในสมการที่ (5.34) และ (5.35) สามารถคำนวณค่า $K_{Pi(m,t)}$ และ $K_{Li(m,t)}$ ได้เท่ากับ 17.31 และ 9.24×10^5 ตามลำดับ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

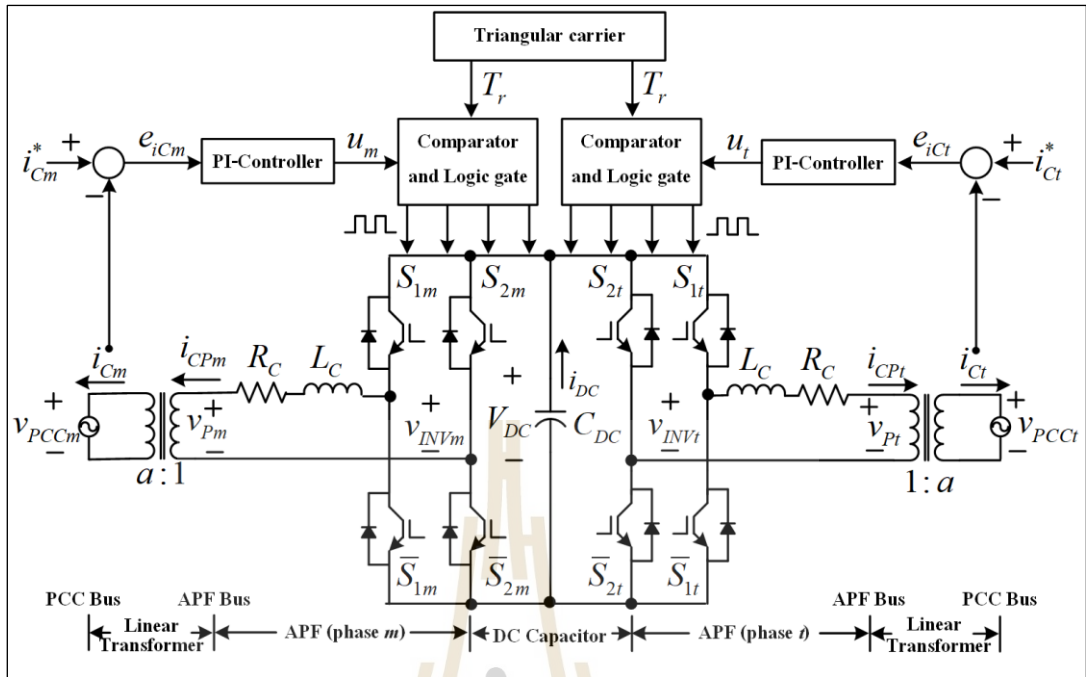
$$T_{iC(m,t)}(s) = \frac{I_{C(m,t)}}{I_{C(m,t)}^*} = \frac{K_{Pi(m,t)}}{aL_C} \left[\frac{s + \frac{K_{Li(m,t)}}{K_{Pi(m,t)}}}{s^2 + \left(\frac{aR_C + K_{Pi(m,t)}}{aL_C} \right) s + \frac{K_{Li(m,t)}}{aL_C}} \right] \quad (5.32)$$

$$G(s) = \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{ni}s + \omega_{ni}^2} \quad (5.33)$$

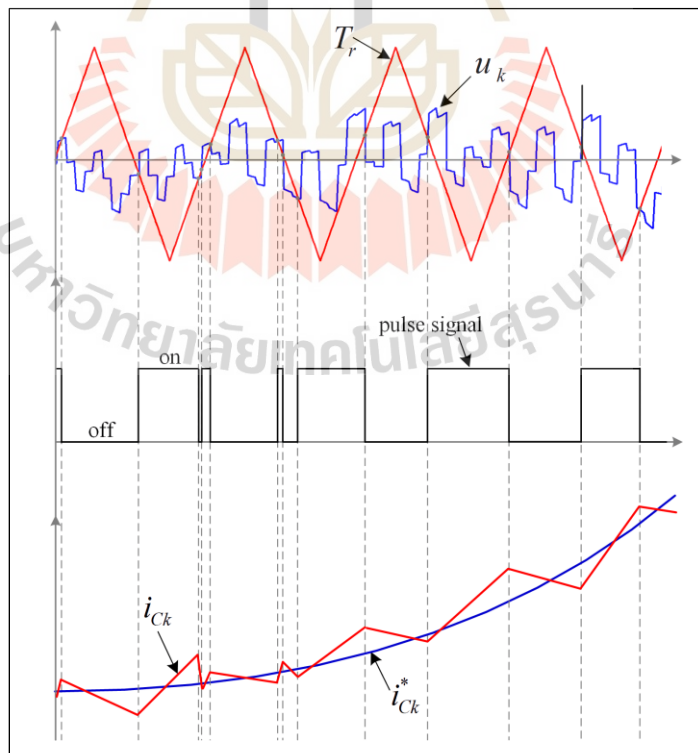
$$K_{Pi(m,t)} = 2a\zeta\omega_{ni}L_C - aR_C \quad (5.34)$$

$$K_{Li(m,t)} = a\omega_{ni}^2L_C \quad (5.35)$$

ผลลัพธ์ของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ คือ ค่าแรงดัน u_m และ u_r ค่าดังกล่าวจะเข้าสู่ขั้นตอนการสร้างสัญญาณสวิตช์ด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation: PWM) ลักษณะการทำงานของเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 จากรูปดังกล่าว พบว่า แรงดัน u_m และ u_r ถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณพารามิเตอร์สามเหลี่ยม (T_r) เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมการสวิตช์ของไอจีบีที ผู้วิจัยได้กำหนดให้ แอมพลิจูดของสัญญาณสามเหลี่ยม (A_r) เท่ากับ 1 โวลต์ และความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยม (f_r) มีค่าเท่ากับ 6 กิโลเฮิรตซ์ การกำหนดค่า f_r พิจารณาจากอันดับฮาร์มอนิกสูงสุดที่ต้องการกำจัดในระบบ โดยจะต้องมีค่ามากกว่าสองเท่าของความถี่ฮาร์มอนิกอันดับสูงสุดที่ต้องการกำจัดในระบบ (T. Thomas et al., 1998) การเปรียบสัญญาณ u_k (กำหนดให้เฟส m และเฟส t แทนด้วยตัวแปร k) และ T_r สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 พบว่า เมื่อสัญญาณ u_k มีค่ามากกว่าสัญญาณ T_r ทำให้สัญญาณพัลส์มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่า ไอจีบีที S_{1k} และไอจีบีที \bar{S}_{2k} นำกระแส ส่วนไอจีบีที S_{2k} และไอจีบีที \bar{S}_{1k} หยุดนำกระแส ผลดังกล่าวทำให้ค่า i_{Ck} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในกรณีตรงกันข้าม เมื่อสัญญาณ u_k มีค่าน้อยกว่าสัญญาณ T_r ทำให้สัญญาณพัลส์มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งหมายความว่า ไอจีบีที S_{1k} และไอจีบีที \bar{S}_{2k} หยุดนำกระแส ส่วนไอจีบีที S_{2k} และไอจีบีที \bar{S}_{1k} นำกระแส ผลดังกล่าวทำให้ค่า i_{Ck} มีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 5.6 ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการสวิตช์ PWM



รูปที่ 5.7 การสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยเทคนิคการสวิตช์ PWM

5.4.2 การออกแบบโครงสร้างของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

วงจรรองกำลังแอกทีฟที่พิจารณาในระบบรางไฟฟ้ามีลักษณะเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสจำนวน 2 ชุด ที่มีการใช้ตัวเก็บประจุร่วมกัน ทำให้แรงดันบัสไฟตรงของเฟส m และ เฟส t มีค่าเท่ากัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ V_{DC} การออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟดังกล่าว เริ่มต้นจากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (i_{DC}) กับแรงดันบัสไฟตรงที่ตัวเก็บประจุ (V_{DC}) ดังนั้น สมการเชิงอนุพันธ์ของแรงดันบัสไฟตรง แสดงได้ดังสมการที่ (5.36) โดยพจน์ $C_{DC} \frac{dV_{DC}}{dt}$ คือ เทอมพลานต์ของระบบ

$$i_{DC} = i_{DCm} + i_{DCt} = \overbrace{C_{DC}}^{\text{plant}} \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (5.36)$$

เทอมพลานต์ของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ตามสมการที่ (5.36) สามารถทำการแปลงลาปลาซและทำการพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอน ($G_{PLANTv}(s)$) ได้ดังสมการที่ (5.37)

$$G_{PLANTv}(s) = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} = \frac{1}{C_{DC}s} \quad (5.37)$$

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอทำหน้าที่ควบคุมพลานต์ของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเพื่อให้ได้ค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (V_{DC}^*) โดยกำหนดให้อินพุตของตัวควบคุม คือ ผลต่างระหว่างแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงและแรงดันบัสไฟตรง (e_v) ส่วนเอาต์พุตจากตัวควบคุม คือ ค่า i_{DC}^* ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (5.38) และ (5.39) ตามลำดับ

$$e_v = V_{DC}^* - V_{DC} \quad (5.38)$$

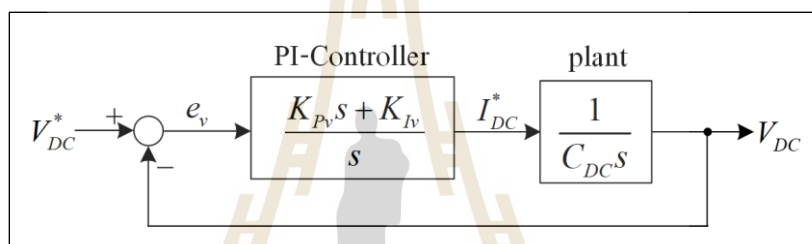
$$i_{DC}^* = \underbrace{K_{Pv} e_v + K_{Iv} \int e_v dt}_{\text{PI Controller}} \quad (5.39)$$

PI Controller

พิจารณาการแปลงลาปลาซของสมการ (5.39) และทำการจัดรูปใหม่เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ($G_{PIV}(s)$) ได้ดังสมการที่ (5.40)

$$G_{PIV}(s) = \frac{I_{DC}^*}{e_{iv}} = \frac{K_{Pv}s + K_{Iv}}{s} \quad (5.40)$$

จากสมการที่ (5.37) และ (5.40) สามารถเขียนแผนภาพไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงแบบวงปิด ดังรูปที่ 5.8 โดยการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมกับพลานต์ของระบบ



รูปที่ 5.8 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

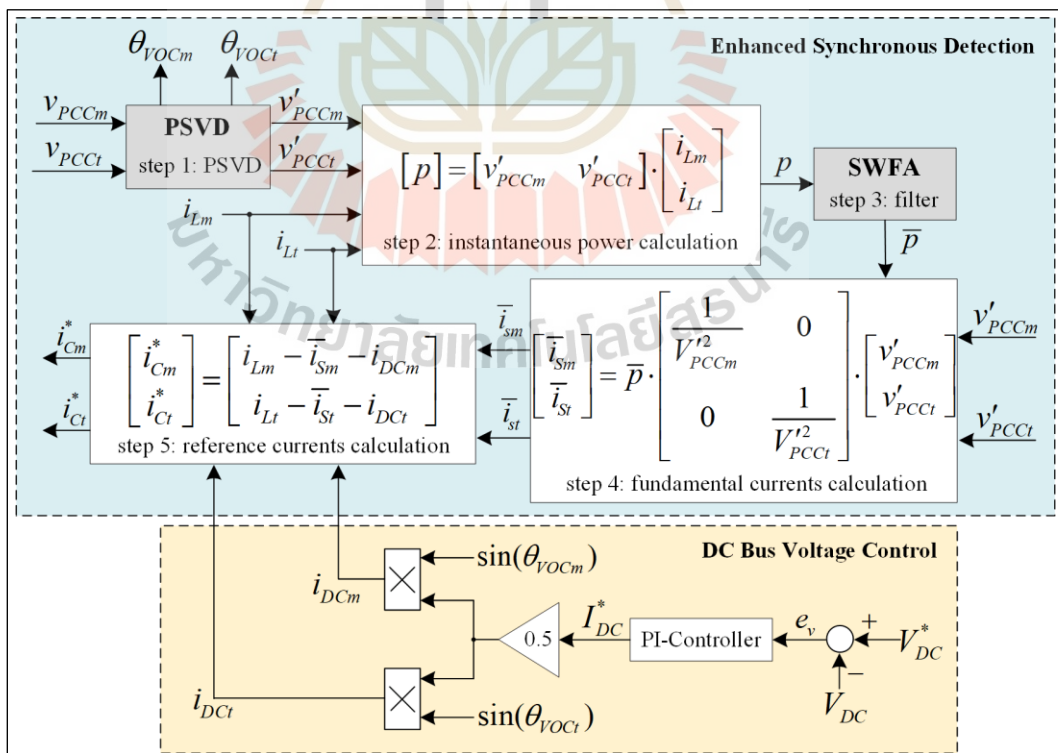
การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (K_{Pv}, K_{Iv}) ดำเนินการโดยใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ($T_v(s)$) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากแผนภาพไดอะแกรมในรูปที่ 5.8 ได้ดังสมการที่ (5.41) กับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน ($G(s)$) ในดังสมการที่ (5.33) ผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ดังกล่าวทำให้ได้สมการสำหรับการคำนวณค่า K_{Pv} และ K_{Iv} ดังสมการ (5.42) และ (5.43) ตามลำดับ โดยการออกแบบกำหนดให้ ค่าอัตราการหน่วง (ζ) มีค่าเท่ากับ $\frac{\sqrt{2}}{2}$ เพื่อให้ผลตอบสนองมีลักษณะแบบหน่วงขาด และความถี่ธรรมชาติของการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (ω_{nv}) มีค่าเท่ากับ 2π เรเดียนต่อวินาที เนื่องจาก ω_{nv} จะต้องมิต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติของการควบคุมกระแสชดเชย (ω_{ni}) อย่างน้อย 10 เท่า ($\omega_{nv} < 10\omega_{ni}$) เพราะว่าการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะช้ากว่าการควบคุมกระแสชดเชย ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณค่า K_{Pv} และ K_{Iv} สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของระบบที่พิจารณาจึงมีค่าเท่ากับ 1.78 และ 7.89 ตามลำดับ ค่ากระแส I_{DC}^* ที่ได้จากผลลัพธ์ของตัวควบคุมพีไอจะถูกนำไปใช้ร่วมกับกระบวนการคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับ

ซึ่งโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ (ESD) โดยพิจารณาให้วงจรอินเวอร์เตอร์เฟส m และ เฟส t ร่วมกัน ควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแยกทีฟแบบสมมาตร แสดงได้ดังรูปที่ 5.9 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ค่ากระแส I_{DC}^* ถูกแบ่งออกสองส่วนแบบสมมาตร เพื่อใช้สำหรับการคำนวณค่ากระแส i_{DCm} และ i_{DCt} โดยค่ากระแสดังกล่าวถูกนำไปใช้ร่วมกับการคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรองกำลังแยกทีฟ (i_{Cm}^* , i_{Ct}^*) แสดงได้ดังบล็อก “reference currents calculation” ในขั้นตอนที่ 5

$$T_v(s) = \frac{V_{DC}}{V_{DC}^*} = \frac{K_{Pv}}{C_{DC}} \left[\frac{s + \frac{K_{Iv}}{K_{Pv}}}{s^2 + \frac{K_{Pv}}{C_{DC}}s + \frac{K_{Iv}}{C_{DC}}} \right] \quad (5.41)$$

$$K_{Pv} = 2\zeta\omega_{nv}C_{DC} \quad (5.42)$$

$$K_{Iv} = \omega_{nv}^2C_{DC} \quad (5.43)$$



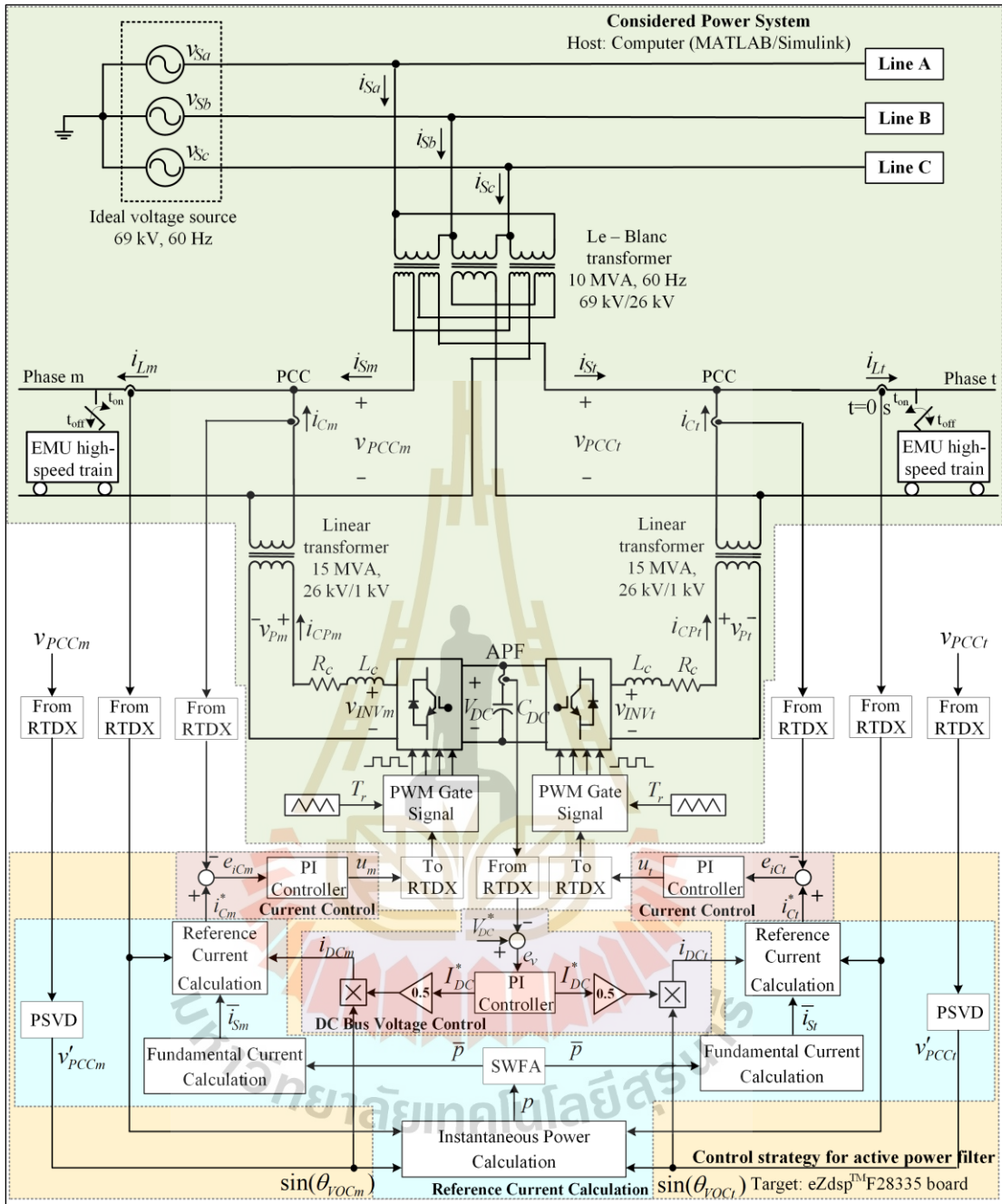
รูปที่ 5.9 แผนภาพไดอะแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

5.5 การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอ

การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย การกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่าย ไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลได้อาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (นำเสนอไว้ในบทที่ 4) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ และค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม ตามที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 โดยมีโครงสร้างของระบบทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอ แสดงได้ดังรูปที่ 5.10 จากรูปดังกล่าว พบว่า ระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสจากการไฟฟ้า (v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}) ส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟฟ้ามหือแปลงเลอบลองค์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสร่วม (v_m, v_t) และลดระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 69 kV เป็น 26 kV แรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสร่วมเป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าไปยังโวลตรถไฟความเร็วสูงที่มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแสอุดมคติ นอกจากนี้ ได้มีการติดตั้งวงจรรองกำลังแอกทีฟสำหรับทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชย (i_{cm}, i_{ct}) เข้าสู่ระบบที่จุดต่อร่วม (PCC) เพื่อปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของระบบรางไฟฟ้า (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าได้ทำการทดสอบกับระบบโหลดสมดุล และโหลดไม่สมดุล ตามที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.5 ของบทที่ 4 เพื่อใช้สำหรับการยืนยันสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมพีไอ

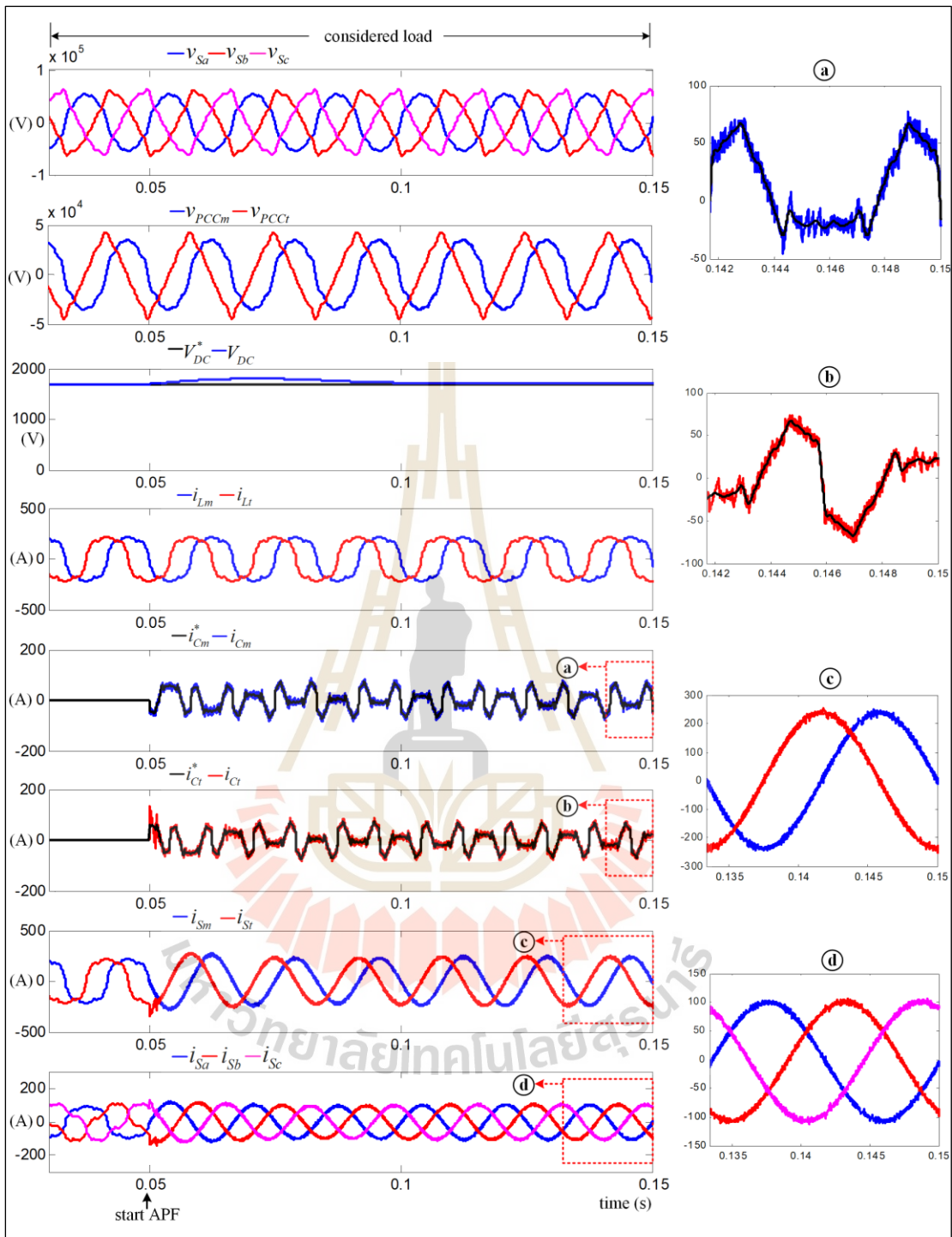
ชนิดของพารามิเตอร์	ขนาดของพารามิเตอร์
แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (v_{sa}, v_{sb}, v_{sc})	69 kV, 60 Hz
หม้อแปลงเลอบลองค์	10 MVA, 60 Hz, 69/26 kV
หม้อแปลงเชิงเส้น	15 MVA, 60 Hz, 26/1 kV
วงจรรองกำลังแอกทีฟ	15 MVA, IGBT (6500 V, 4500 A) $V_{DC}^* = 1700 \text{ V}, R_C = 0 \Omega$ $L_C = 0.1 \text{ mH}, C_{DC} = 200 \text{ mF}$
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย	$K_{pim} = K_{pit} = 17.31$ $K_{lim} = K_{lit} = 9.24 \times 10^5$
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง	$K_{pv} = 1.78$ $K_{iv} = 7.89$



รูปที่ 5.10 โครงสร้างระบบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมพีไอ

5.5.1 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีโหลดสมดุล

การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีไอกรณีโหลดสมดุล มีลักษณะของระบบทดสอบเป็นระบบที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (v_{Sa} , v_{Sb} , v_{Sc}) มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า

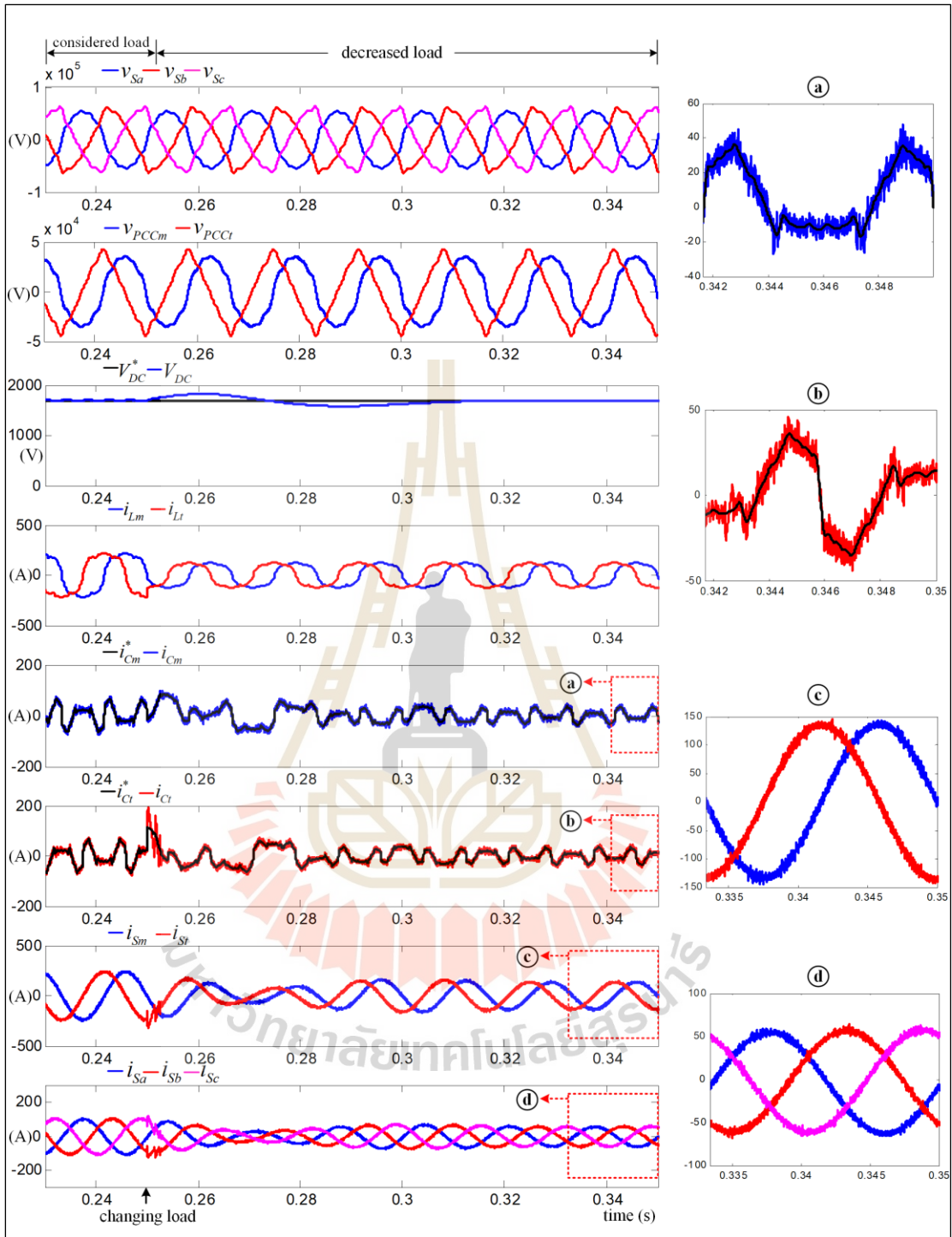


รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสโหลดที่พิจารณา

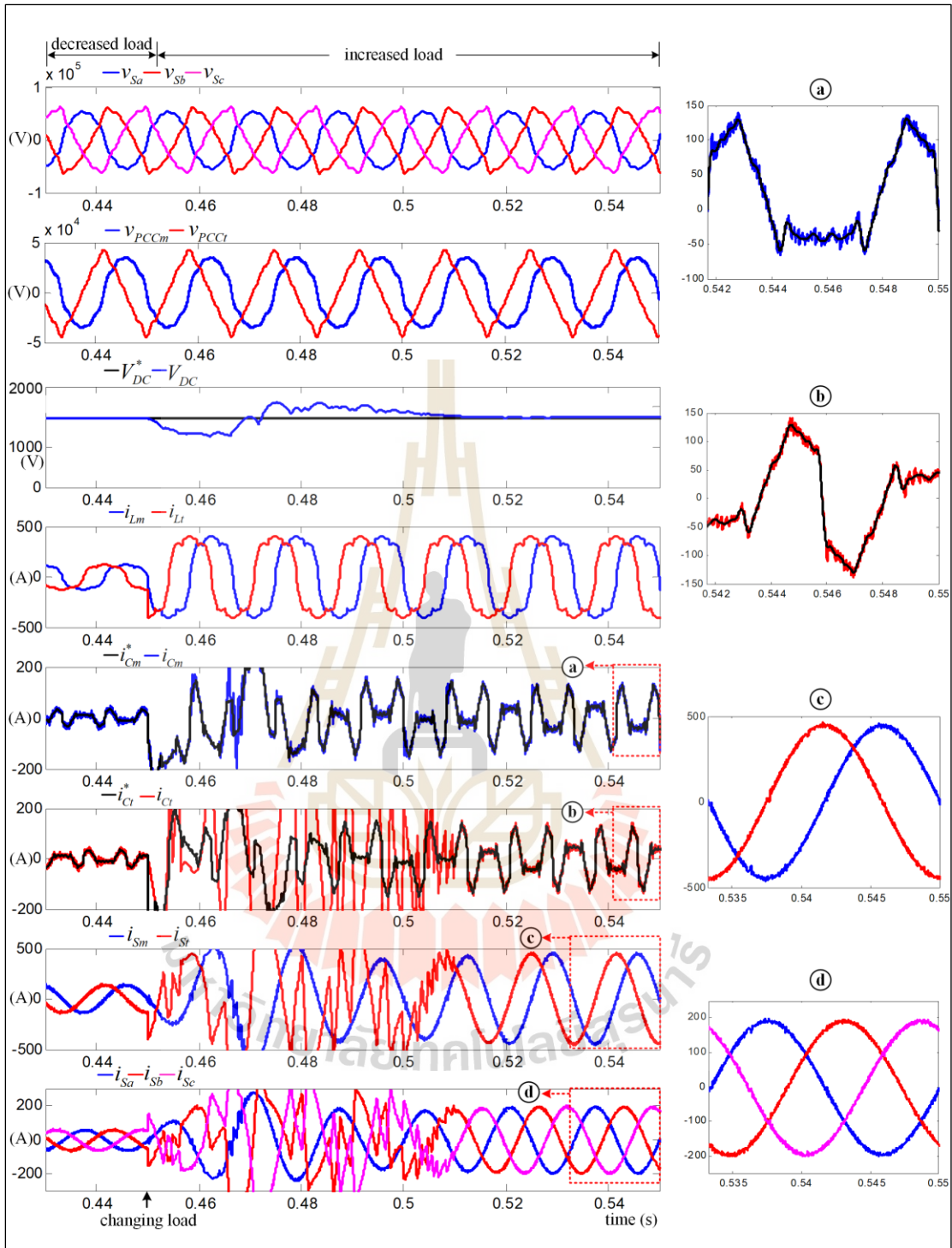
$\%THD_v$ เท่ากับ 10.3% และมีการใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้าแบบสมดุ โดย การทดสอบแบ่งออกเป็นสามช่วง ช่วงแรกตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.25 วินาที คือ ช่วงกระแสไหลดที่ พิจารณา ช่วงที่สองตั้งแต่เวลา 0.25 ถึง 0.45 วินาที คือ ช่วงที่กระแสไหลดลดลง และช่วงสุดท้าย ตั้งแต่เวลา 0.45 ถึง 0.65 วินาที คือ ช่วงที่มีการเพิ่มกระแสไหลด ตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ผล การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 5.11 ถึง 5.13 โดยเป็นการพิจารณากรณีกระแสไหลดที่พิจารณา กรณีกระแสไหลดลดลงจากกระแสไหลดที่ พิจารณา และกรณีกระแสไหลดเพิ่มขึ้นจากกระแสไหลดที่พิจารณา ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบกรณีกระแสไหลดที่พิจารณาในรูปที่ 5.11 สังเกตได้ว่า ก่อนการชดเชยในช่วงเวลา 0 ถึง 0.05 วินาที รูปสัญญาณ i_{Sm} และ i_{Sr} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูป สัญญาณไซน์เช่นเดียวกับรูปสัญญาณ i_{Lm} และ i_{Lr} ตามลำดับ ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} ผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_i$ ในแต่ละเฟส สูงกว่ามาตรฐาน IEEE standard 519-2014 แสดงได้ดังตารางที่ 5.2 ภายหลังการชดเชยตั้งแต่เวลา 0.05 วินาที พบว่า วงจร กรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Cr} ให้มีลักษณะคล้ายตาม กระแส i_{Cm}^* และ i_{Cr}^* ตามลำดับ เมื่อฉีดกระแส i_{Cm} และ i_{Cr} เข้าสู่ระบบที่จุด PCC รูปสัญญาณ กระแส i_{Sm} และ i_{Sr} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย ส่งผลให้รูป สัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์ตามไปด้วย โดยที่ค่า $\%THD_i$ ภายหลัง การชดเชย สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 นอกจากนี้ วงจรกรองกำลังแอกทีฟดังกล่าวยังสามารถ ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย ในส่วนของค่า $\%CUF$ มีค่าเท่ากับ 0% ทั้งก่อน และหลังการชดเชย เนื่องจากระบบทดสอบมีลักษณะการจ่ายโหลดรถไฟความเร็วสูงแบบสมดุ

ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 5.12 เป็นกรณี กระแสไหลดลดลงจากกระแสไหลดที่พิจารณา ซึ่งพบว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Cr} ให้มีลักษณะคล้ายตาม i_{Cm}^* และ i_{Cr}^* ตามลำดับ ได้ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{Sr} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ เป็นผลให้รูปสัญญาณ กระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปไซน์ตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการพิจารณา $\%THD_i$ ของรูปสัญญาณดังกล่าวในตารางที่ 5.2 พบว่า มีค่ามากกว่า 5% ซึ่งสูงกว่ากรอบมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 เนื่องจากกระแส i_{Cm} และ i_{Cr} ที่ฉีดเข้าสู่ระบบมีการกระเพื่อมสูง เป็นผล ให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} , i_{Sr} , i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} ภายหลังการชดเชยเกิดกระเพื่อมตามไปด้วย ส่งผล ให้ $\%THD_i$ ของรูปสัญญาณดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น ประเด็นดังกล่าวจะได้รับการพิจารณาเพื่อพัฒนา ตัวควบคุมในอนาคต นอกจากนี้ ระบบที่พิจารณามีการใช้งานโหลดสมดุ ส่งผลให้ $\%CUF$ ก่อนการ ชดเชยและหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 0% และการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ด้วยตัวควบคุมพีไอให้ผลการปรับปรุงค่า PF ที่ดีขึ้น โดยพิจารณาจากค่า PF ที่เพิ่มขึ้นภายหลังการ ชดเชย และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกระแสไหลดที่เวลา 0.45 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 5.13 พบว่า ตัวควบคุมพีไอใช้เวลา 0.06 วินาที ในการควบคุมกระแส i_{Cr} ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแส i_{Cr}^* ส่งผลให้ช่วงเวลา 0.45 วินาที ถึง 0.51 วินาที รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{Sr} มีลักษณะ



รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุมพีไอเออร์นิกกระแสโหลดลดลง



รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสโหลดเพิ่มขึ้น

ผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ซึ่งทำให้สัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ด้วย ยิ่งไปกว่านั้น กระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก อาจส่งผลกระทบต่อระบบรางไฟฟ้าได้ เช่น ระบบป้องกันทำงานผิดพลาดเป็นผลให้รถไฟฟ้ายุควิ่ง เป็นต้น ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวจะได้รับการแก้ไขโดยการเลือกใช้ตัวควบคุมกระแสชดเชยที่เหมาะสมกับพฤติกรรมการใช้งานโหลดของระบบรางไฟฟ้าที่จะนำเสนอในบทต่อไป และเมื่อพิจารณาที่สภาวะคงตัวตั้งแต่เวลา 0.51 วินาที สังเกตได้ว่า รูปสัญญาณ i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_i$ อยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 และมีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังที่ดีขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 ในส่วนของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง พบว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดัน V_{DC} ให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดัน V_{DC}^* ถึงแม้ว่ากระแสโหลดที่พิจารณาจะมีการเปลี่ยนแปลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา แสดงได้ดังรูปที่ 5.11 ถึง 5.13 ดังนั้นชีวิตสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในสภาวะโหลดต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าดัชนีชีวิตสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดสมดุลด้วยตัวควบคุมพีไอ

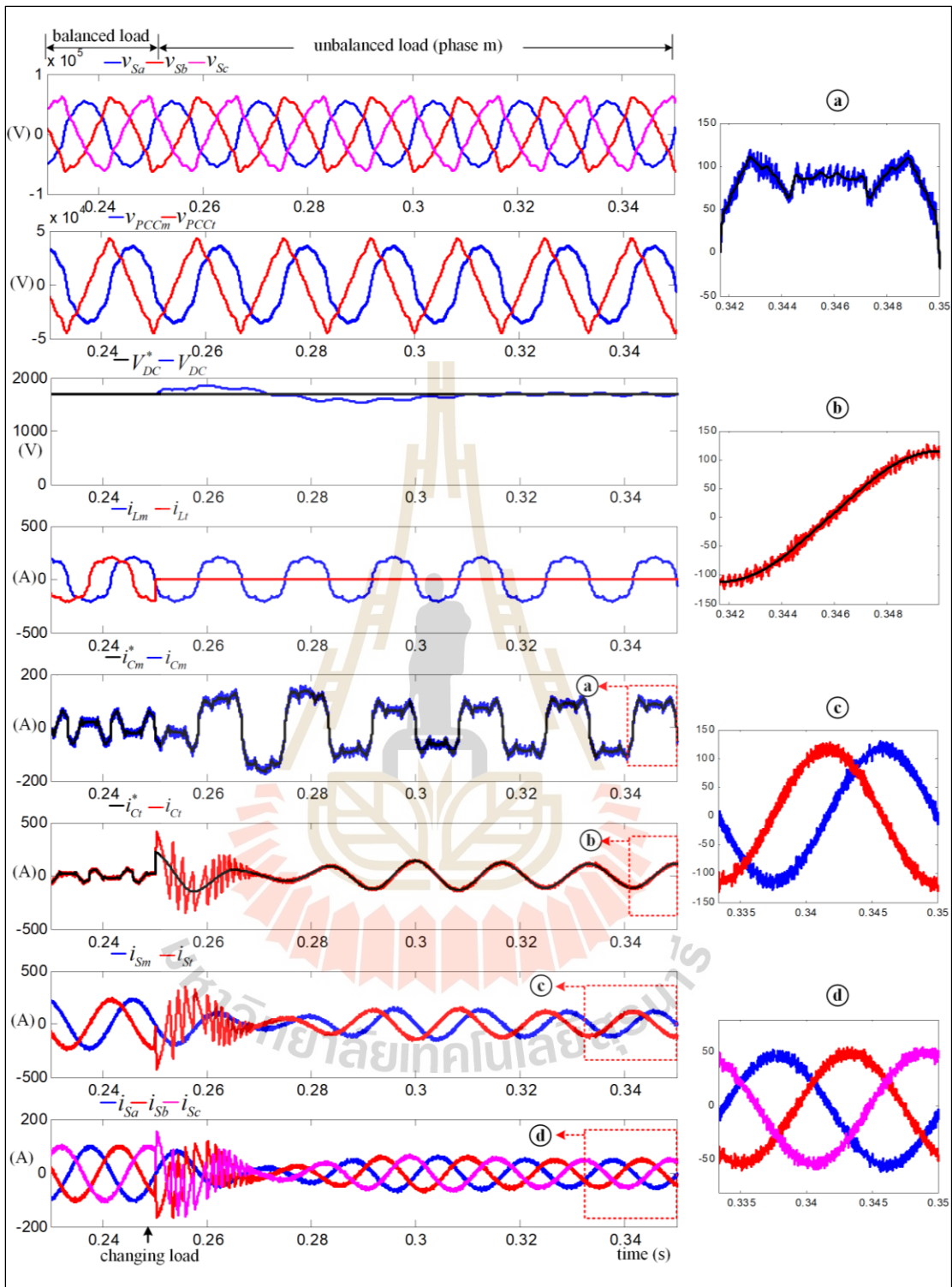
สภาวะของ กระแสโหลด	$\%THD_i$ ด้านเฟสรวม		$\%THD_i$ ด้านสามเฟส			$\%CUF$	PF
	เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c		
ก่อนการชดเชย							
พิจารณา	22.23	21.21	22.19	21.51	21.33	0.00	0.976
ลดลง	21.35	19.58	21.25	20.09	19.17	0.00	0.974
เพิ่มขึ้น	22.77	22.22	22.75	22.39	22.29	0.00	0.976
ภายหลังการชดเชย							
พิจารณา	3.36	3.45	3.35	3.34	3.50	0.00	0.997
ลดลง	5.52	5.86	5.49	5.65	5.83	0.00	0.991
เพิ่มขึ้น	2.50	2.46	2.59	1.98	1.93	0.00	0.999

5.5.2 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีโหลดไม่สมดุล

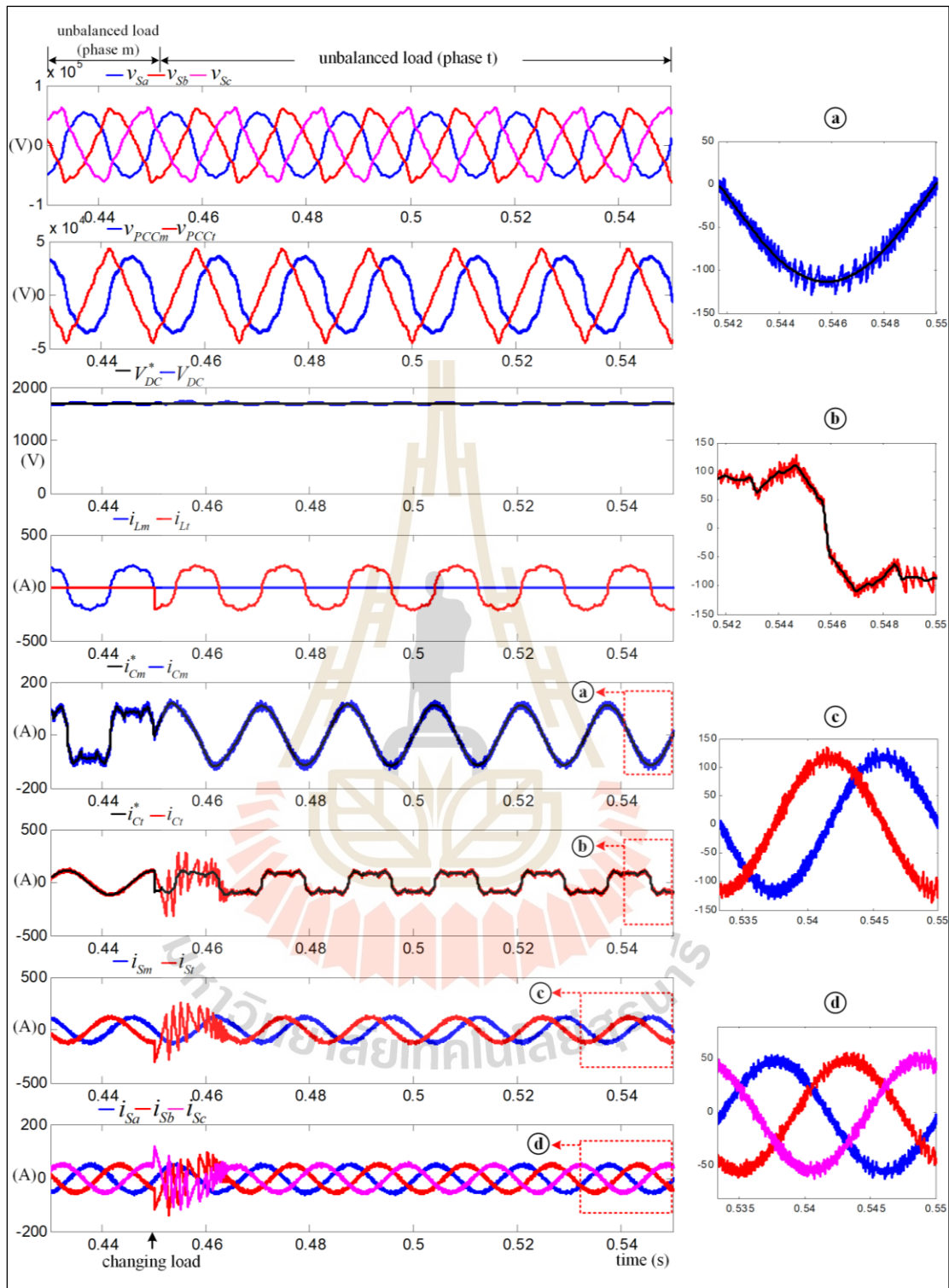
การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุล เป็นระบบทดสอบที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ และทำการพิจารณาลักษณะการจ่ายโหลดแบบไม่สมดุล กล่าวคือ บางช่วงของการทดสอบมีการจ่ายโหลดรถไฟฟ้ายุคเฉพาะเฟส m หรือ เฟส t เพียงหนึ่งเฟสเท่านั้น การจ่ายโหลดในลักษณะนี้ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า รายละเอียดของระบบทดสอบดังกล่าวได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.5.4 สำหรับโครงสร้างส่วนอื่น ๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบทดสอบกรณีโหลดสมดุล ซึ่งแสดงได้ดังรูป

ที่ 5.10 ผลการจำลองสถานการณ์การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากรณีโหลดสมดุล (กรณีกระแสโหลดที่พิจารณา) แสดงได้ดังรูปที่ 5.11 ในส่วนของกรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m และโหลดไม่สมดุลเฟส t แสดงได้ดังรูปที่ 5.14 และ 5.15 ตามลำดับ

ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบ ปรากฏว่า ทั้งกรณีกระแสโหลดกรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m และโหลดไม่สมดุลเฟส t รูปสัญญาณกระแส i_{sm} และ i_{st} มีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์และมีลักษณะสมดุล ทำให้ค่า $\%THD_i$ และ $\%CUF$ ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยในแต่เฟสมีค่าลดลงจากก่อนการชดเชย ส่วนค่า PF มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 แต่อย่างไรก็ตาม ค่า $\%THD_i$ ดังกล่าวมีค่าเกินกรอบข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากรูปสัญญาณกระแส i_{cm} และ i_{ct} จากวงจรกรองกำลังแยกที่พีที่ใช้ตัวควบคุมพีไอมีการกระเพื่อมของรูปสัญญาณสูง เมื่อฉีดกระแสดังกล่าวเข้าสู่ระบบที่จุด PCC จะส่งผลให้กระแส i_{sm} , i_{st} , i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ภายหลังการชดเชยมีการกระเพื่อมของรูปสัญญาณสูงตามไปด้วย เป็นผลให้ $\%THD_i$ ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยในแต่เฟสมีค่าเกินมาตรฐาน สำหรับสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมพีไอดังแสดงในรูปที่ 5.10 5.14 และ 5.15 สังเกตได้ว่า ในกรณีโหลดสมดุล ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมสัญญาณ i_{cm} และ i_{ct} ให้มีลักษณะคล้ายตาม i_{cm}^* และ i_{ct}^* ตามลำดับ ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว แต่ในกรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m และไม่สมดุลเฟส t พบว่า ตัวควบคุมพีไอไม่สามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงได้ในสภาวะชั่วคราว ส่งผลให้ช่วงเวลาดังกล่าว รูปสัญญาณ i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ แต่ในสภาวะคงตัว ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง โดยใช้เวลาในการลู่เข้าประมาณ 0.02 วินาที นอกจากนี้ ผลการทดสอบสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10 5.14 และ 5.15 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมค่า V_{DC} ให้ใกล้เคียงค่า V_{DC}^* ตลอดทุกช่วงการทดสอบ โดยมีค่าการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าอยู่ภายใต้ขอบเขตที่ได้รับการออกแบบไว้ ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าทั้งสามช่วงการทดสอบ แสดงได้ดังตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมพีไอ กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m



รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุมพีไอ กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t

ตารางที่ 5.3 ค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุล
ด้วยตัวควบคุมพีไอ

สถานะของ กระแสโหลด	%THD _i ด้านเฟสรวม		%THD _i ด้านสามเฟส			%CUF	PF
	เฟส <i>m</i>	เฟส <i>t</i>	เฟส <i>a</i>	เฟส <i>b</i>	เฟส <i>c</i>		
ก่อนการชดเชย							
สมดุล	22.23	21.21	22.19	21.51	21.33	0.00	0.976
ไม่สมดุลเฟส <i>m</i>	22.22	0.00	22.17	20.52	24.14	95.45	0.694
ไม่สมดุลเฟส <i>t</i>	0.00	21.19	8.04	21.85	20.46	95.45	0.703
ภายหลังการชดเชย							
สมดุล	3.36	3.45	3.35	3.34	3.50	0.00	0.997
ไม่สมดุลเฟส <i>m</i>	8.25	8.20	8.19	8.19	8.13	0.50	0.987
ไม่สมดุลเฟส <i>t</i>	8.29	8.45	8.24	8.49	8.21	0.51	0.987

จากผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมพีไอในกรณีโหลดสมดุลและกรณีโหลดไม่สมดุล พบว่า ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า (%THD_i, %CUF, PF) ภายหลังการชดเชยในกรณีกระแสโหลดที่พิจารณามีค่าดีที่สุด เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอถูกออกแบบไว้โดยพิจารณาจากกระแสโหลดที่พิจารณา ส่งผลให้มีสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงในกรณีกระแสโหลดที่พิจารณา แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดพบประเด็นที่สำคัญเกี่ยวกับสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ ได้แก่ ประเด็นแรก คือ ในสถานะชั่วคราวตัวควบคุมพีไอไม่สามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง ส่งผลให้รูปสัญญาณ i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ในสถานะชั่วคราวผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก ประเด็นที่สอง คือ ตัวควบคุมพีไอจะใช้เวลาการลู่เข้าเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น และประเด็นที่สาม คือ เมื่อกระแสโหลดลดลงหรือมีการจ่ายโหลดแบบไม่สมดุลการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอจะมีการกระเพื่อมของรูปสัญญาณสูง ส่งผลให้ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกภายหลังการชดเชยมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเกินข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบขึ้นมีสมรรถนะที่ไม่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าเมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา แต่อย่างไรก็ตาม ในระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงตัวควบคุมพีไอมีสมรรถนะที่ดีในการรักษาระดับแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าใกล้เคียงแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงแม้กระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

5.6 สรุป

ระบบควบคุมกระแสชดเชย และระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง สำหรับการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลในระบบรางไฟฟ้าเลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งเป็นวิธีการแบบดั้งเดิม โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอได้รับการออกแบบด้วยวิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจนานามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมกับพจนานามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน และได้มีการออกแบบค่าพารามิเตอร์และพิกัดของวงจรถองกำลังแอกทีฟที่เหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยวงจรถองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า การควบคุมกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ อาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป ผลการทดสอบสมรรถนะดังกล่าว พบว่า ภายหลังจากฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบที่จุดต่อร่วม ระบบควบคุมให้สมรรถนะที่ดีในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีกระแสโหลดที่พิจารณา โดยอ้างอิงจากดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย $\%THD$, $\%CUF$ และ PF ของกระแสที่แหล่งจ่ายทางด้านเฟสรวมและทางด้านสามเฟส นอกจากนี้ ระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอที่ได้รับออกแบบ สามารถควบคุมแรงดันบัลไฟตรงให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง ทุกย่านการทดสอบ แม้โหลดมีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม ในกรณีการกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา พบว่า ตัวควบคุมพีไอมีสมรรถนะที่ไม่ดีในควบคุมกระแสชดเชย เนื่องจากตัวควบคุมพีไอไม่สามารถควบคุมกระแสชดเชยให้ใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิงในช่วงสภาวะชั่วคราว และกระแสชดเชยมีการกระเพื่อมของรูปสัญญาณสูงในช่วงสภาวะอยู่ตัว ซึ่งอาจเกิดผลเสียต่อระบบรางไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาค่า $\%THD$ ในกรณีที่กระแสโหลดเปลี่ยนแปลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา ปรากฏว่า $\%THD$ มีค่าสูงขึ้นเกินกรอบมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 จากข้อด้อยที่กล่าวมาข้างต้นของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ จึงเป็นประเด็นนำไปสู่การพัฒนาตัวควบคุมในส่วนของระบบควบคุมกระแสชดเชยเพื่อให้มีสมรรถนะที่ดียิ่งขึ้นในการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า

บทที่ 6

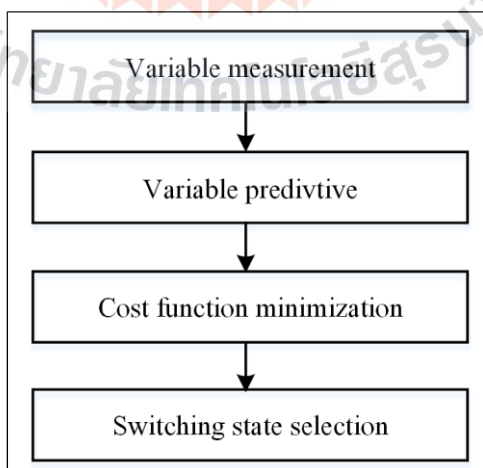
ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง

6.1 บทนำ

ตัวควบคุมในส่วนของระบบควบคุมกระแสชดเชยมีผลต่อสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้า ในบทนี้ได้แนะนำเสนอตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง (Model Predictive Control : MPC) สำหรับควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวได้ถูกนำเสนอขึ้นครั้งแรกในช่วงปี ค.ศ. 1960 โดยเป็นที่รู้จักกันในชื่อ การควบคุมขอบเขตแบบถอยห่าง (receding horizon control) หรือการควบคุมขอบเขตแบบเคลื่อนที่ (moving horizon control) จากนั้นได้เริ่มมีการนำมาใช้งานในภาคอุตสาหกรรมโดยเฉพาะงานด้านระบบควบคุมอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1976 Richalet และคณะ (J. Richalet, et al., 1976) ได้นำเสนอการใช้ตัวควบคุมแบบทำนายต่อกระบวนการตอบสนองของอิมพัลส์ โดยอาศัยแบบจำลองของกระบวนการในการพิจารณา ทำให้ได้สัญญาณเหมาะสมที่สุดจากการคำนวณสำหรับใช้ในการควบคุม ซึ่งเรียกระบบควบคุมดังกล่าวว่า Model Predictive Heuristic Control (MPHC) ต่อมาในปี ค.ศ. 1978 มีการใช้งานตัวควบคุมแบบทำนายกันอย่างแพร่หลายมากยิ่งขึ้นในงานทางด้านระบบควบคุม จึงได้มีการนำเสนอทฤษฎีการควบคุมแบบทำนายให้เป็นรูปแบบมาตรฐานสำหรับงานทางด้านระบบควบคุม พร้อมทั้งได้เรียกชื่อการควบคุมดังกล่าวว่า “การควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง” ตั้งแต่นั้นมาจนถึงปัจจุบัน (S. Kouro, et al., 2011) จุดเด่นของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง คือ การลดผลกระทบจากการประวิงเวลาทางดิจิทัลส่งผลให้มีผลตอบสนองที่รวดเร็ว และมีการคำนวณฟังก์ชันต้นทุน (cost function) เพื่อเลือกสถานะการสวิตช์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมในแต่ละรอบการทำงาน ด้วยเหตุนี้ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองเพื่อแก้ไขปัญหาการควบคุมกระแสชดเชยในสถานะชั่วคราวที่นำเสนอในบทก่อนหน้า ซึ่งตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองสามารถให้สมรรถนะการติดตามกระแสอ้างอิงสำหรับกระแสชดเชยในสถานะชั่วคราวที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว และมีการคำนวณฟังก์ชันต้นทุนตามวัตถุประสงค์ของระบบควบคุม เพื่อให้ได้สถานะการสวิตช์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟในทุก ๆ ช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง อีกทั้งจุดเด่นของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองยังเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานโหลดรฟไฟฟ้าในระบบแรงไฟฟ้าที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด (L. Yu-quan, et al., 2011) โดยเนื้อหาในบทนี้ได้แนะนำหลักการงานและแนวทางการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ รวมทั้งผลการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบเพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง

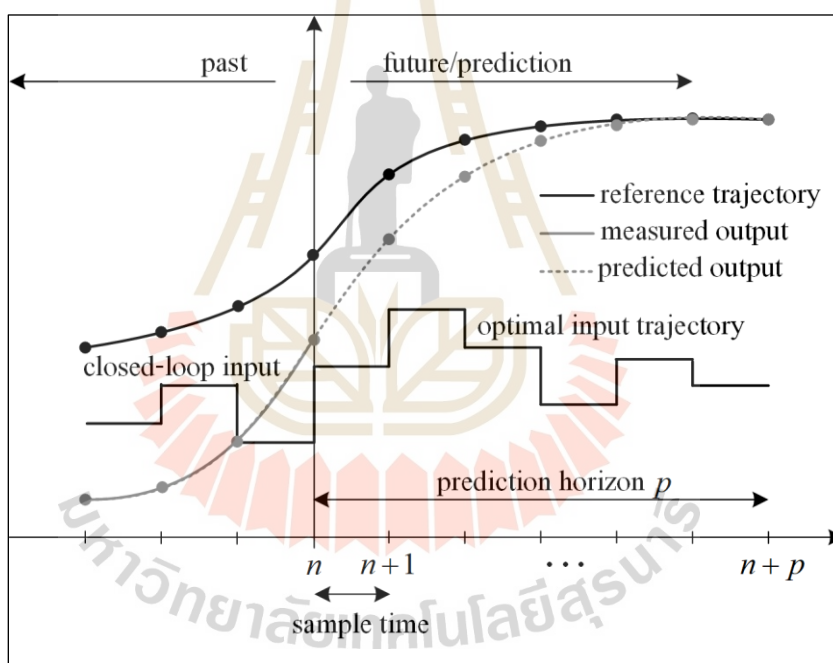
6.2 ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง

การใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองกับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้ามีหลากหลายประเภท เช่น ระบบควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า และงานทางด้าน การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เป็นต้น (S. Kouro et al., 2015) ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ในงานทางด้าน การควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เริ่มต้นขึ้นจากการนำไปใช้แก้ปัญหาความล่าช้าของระบบควบคุมในอุตสาหกรรม (M. Morari et al., 1999) จากจุดเด่นในด้านผลตอบสนองที่รวดเร็ว ส่งผลให้เป็นตัวควบคุมชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากกระบวนการควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังเกิดความล่าช้าทางดิจิทัลทั้งในด้านการคำนวณภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และการส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการนำเสนอตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง สำหรับการควบคุมกระแสขดเคี้ยวของวงจรรอกกำลังแอกทิฟในระบบรางไฟฟ้า เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าว สามารถลดผลกระทบจากการประวิงเวลาทางดิจิทัล ทำให้มีผลตอบสนองของกระแสขดเคี้ยวที่รวดเร็ว และมีการคำนวณฟังก์ชันต้นทุนตามวัตถุประสงค์ของระบบควบคุม เพื่อให้ได้สวิตช์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าเอาต์พุตของระบบควบคุมใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงมากที่สุดในทุก ๆ ช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง โดยได้อะแกรมการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบทำนายสำหรับระบบควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่า การทำงานของระบบควบคุมเริ่มต้นจากการวัดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของระบบควบคุมแล้วทำการส่งค่าดังกล่าวให้กับกระบวนการทำนายค่าพารามิเตอร์ในอนาคต โดยใช้ข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ก่อนหน้าที่วัดได้ จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการหาฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุดเพื่อใช้ในการเลือกสถานะการสวิตช์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังตามวัตถุประสงค์ของการควบคุม โดยมีหลักการทำงานของตัวควบคุมแบบทำนาย ดังแสดงในรูปที่ 6.2 จากรูปดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า สัญญาณเอาต์พุตในอนาคตจะได้รับการทำนายจากแบบจำลอง



รูปที่ 6.1 ไดอะแกรมการควบคุมด้วย MPC สำหรับระบบควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

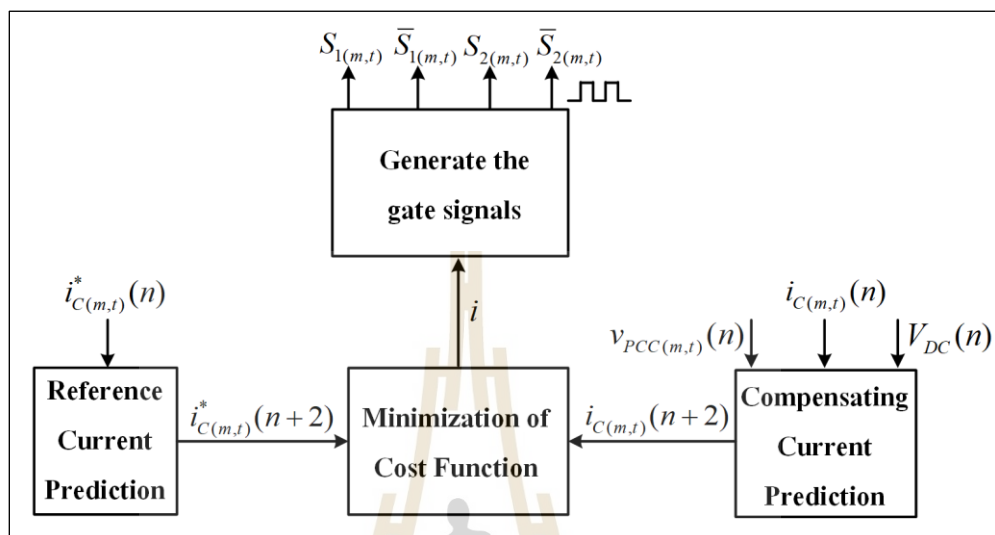
ของระบบร่วมกับสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการวัดและสัญญาณอินพุตในอดีตของระบบควบคุม โดยมีการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับทำให้สัญญาณเอาต์พุตในอนาคตมีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเส้นทางของสัญญาณอินพุตจากการควบคุม พบว่า การพิจารณาในช่วงเวลาสั้น ๆ ที่แตกต่างกัน เช่น ที่เวลา n และ $n+p$ มีผลต่อการทำนายอินพุตของการควบคุมในอนาคต ซึ่งผลดังกล่าวเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการทำนายสัญญาณเอาต์พุตในอนาคต เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนในความสัมพันธ์ของการพิจารณาช่วงเวลาสั้น ๆ ในการทำนายเอาต์พุต สามารถพิจารณาได้จากสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการทำนายจะค่อย ๆ ใกล้เคียงและทับกับเส้นสัญญาณอ้างอิง เมื่อเวลาในการทำนายไปข้างหน้ามากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.2 โดยทั่วไปแล้วการพิจารณาช่วงเวลาสั้น ๆ ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อความแม่นยำในการทำนายสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าใกล้เคียงสัญญาณอ้างอิงมากขึ้น แต่จะมีความซับซ้อนในการคำนวณที่เพิ่มขึ้นตามมาด้วย ดังนั้น การพิจารณาช่วงเวลาสั้น ๆ ของการทำนายไปข้างหน้าควรมีความเหมาะสมกับระบบที่พิจารณา



รูปที่ 6.2 หลักการทำงานของตัวควบคุม MPC

การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองในระบบแรงไฟฟ้า สามารถแสดงโครงสร้างของระบบควบคุมดังกล่าวได้ดังรูปที่ 6.3 ซึ่งสังเกตได้ว่า การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองมีส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนแรก คือ การทำนายกระแสอ้างอิงในอนาคต สำหรับส่วนที่สอง เป็นการคำนวณกระแสชดเชยในอนาคตโดยใช้แบบจำลองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และส่วนสุดท้าย คือ

กระบวนการหาฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุดเพื่อให้ได้สถานะการสวิตช์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้กระแสชดเชยมีค่าใกล้เคียงกระแสอ้างอิง สำหรับองค์ประกอบทั้งสามส่วนสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.3 โครงสร้างการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกที่พด้วยตัวควบคุม MPC

6.2.1 การทำนายกระแสอ้างอิงในอนาคต

กระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยของเฟส m และเฟส t ในอนาคต สามารถคำนวณได้จากค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ซึ่งการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะจะให้ค่ากระแสอ้างอิงในรอบปัจจุบัน ($i_{Cm}^*(n)$, $i_{Ct}^*(n)$) เพื่อทำนายกระแสอ้างอิงในอนาคตโดยมีวัตถุประสงค์ในการชดเชยการประวิงเวลาทางดิจิทัลที่เกิดจากการคำนวณบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และกระบวนการส่งข้อมูลจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง จึงทำการทำนายค่ากระแสอ้างอิง i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ในอนาคตรอบ $n+2$ เหตุผลที่ต้องทำนายไปที่รอบ $n+2$ เนื่องจากกระบวนการคำนวณสำหรับการควบคุมจะทำให้เกิดการประวิงเวลาหนึ่งคาบการสุ่มตัวอย่าง และการใช้งานบอร์ด DSP จะทำให้เกิดการประวิงเวลาอีกหนึ่งคาบการสุ่มตัวอย่าง (P. Cortes et al., 2012) ดังนั้น เพื่อให้กระบวนการควบคุมกระแสชดเชยไม่เกิดผลกระทบจากการประวิงเวลาทางดิจิทัลจึงทำการทำนายค่ากระแสอ้างอิงของเฟส m และเฟส t ในรอบ $n+2$ ($i_{Cm}^*(n+2)$, $i_{Ct}^*(n+2)$) ตามลำดับ การทำนายกระแสอ้างอิงในอนาคตที่มีสมรรถนะที่ดีวิธีการหนึ่ง คือ วิธีลากรานจ์ (M. Odavic et al., 2010) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6.1) สมประสิทธิ์ของลากรานจ์ได้รับการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ถึงความน่าเชื่อถือและแม่นยำในการทำนายค่าในอนาคต (C. Dugan et al., 1996) โดยมีค่าแตกต่างกันตามสมการของลากรานจ์แต่ละอันดับ แสดงได้ในตารางที่ 6.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้สมการลากรานจ์อันดับที่หนึ่งสำหรับการคำนวณกระแส $i_{Cm}^*(n+2)$ และ $i_{Ct}^*(n+2)$ เนื่องจากต้องการลดความ

ซับซ้อนในการคำนวณ และสมการลากรานจ์อันดับที่หนึ่งมีความเพียงพอสำหรับการทำนายค่ากระแสอ้างอิงในอนาคตสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้น กระแส $i_{Cm}^*(n+2)$ และ $i_{Cr}^*(n+2)$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6.2) และ (6.3) ตามลำดับ

$$i_{C(m,t)}^*(n+2) = a_0 i_{C(m,t)}^*(n) + a_1 i_{C(m,t)}^*(n-1) + \dots + a_x i_{C(m,t)}^*(n-x) \quad (6.1)$$

โดยที่ a_0 จนถึง a_x คือ สัมประสิทธิ์ของลากรานจ์ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.1
 x คือ อันดับของลากรานจ์

ตารางที่ 6.1 สัมประสิทธิ์ของลากรานจ์แต่ละอันดับในกรณีการทำนายในรอบที่ $n+2$

x	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
1	3	-2	0	0	0	0
2	6	-8	3	0	0	0
3	10	-20	15	-4	0	0
4	15	-40	45	-24	5	0
5	21	-70	105	-84	35	-6

$$i_{Cm}^*(n+2) = 3i_{Cm}^*(n) - 2i_{Cm}^*(n-1) \quad (6.2)$$

$$i_{Cr}^*(n+2) = 3i_{Cr}^*(n) - 2i_{Cr}^*(n-1) \quad (6.3)$$

6.2.2 การทำนายกระแสชดเชยในอนาคต

การทำนายกระแสชดเชยของเฟส m และเฟส t เริ่มต้นจากการพิจารณาโครงสร้างของวงจรรอกกำลังแยกทีฟสำหรับระบบแรงไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสชดเชยทางด้านวงจรรอกกำลังแยกทีฟ (i_{CPm} , i_{CPt}) ตามสมการที่ (5.3) และ (5.4) ที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 เมื่อพิจารณาเทอมอนุพันธ์ของกระแสชดเชย โดยใช้ทฤษฎีออยเลอร์ไปข้างหน้า (forward Euler method) (O. Kukrer, 1996) ซึ่งกำหนดให้ในหนึ่งช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างกระแสชดเชยมีค่าคงตัว ทำให้ได้เทอมอนุพันธ์ของกระแสชดเชยทางด้านวงจรรอกกำลังแยกทีฟเฟส m และเฟส t ดังสมการที่ (6.4) และ (6.5) ตามลำดับ เมื่อ $i_{CPm}(n+1)$ และ $i_{CPt}(n+1)$ คือ กระแสชดเชยทางด้านวงจรรอกกำลังแยกทีฟในอนาคตรอบที่ $n+1$ ส่วนค่า $i_{CPm}(n)$ และ $i_{CPt}(n)$ คือ

กระแสชดเชยทางด้านวงจรรองกำลังแอกทีฟในปัจจุบัน และกำหนดให้ช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างมีค่าเท่ากับ T_s

$$\frac{di_{CPm}}{dt} \approx \frac{i_{CPm}(n+1) - i_{CPm}(n)}{T_s} \quad (6.4)$$

$$\frac{di_{CPt}}{dt} \approx \frac{i_{CPt}(n+1) - i_{CPt}(n)}{T_s} \quad (6.5)$$

นำสมการที่ (6.4) และ (6.5) แทนลงในสมการเชิงอนุพันธ์ของกระแสชดเชยทางด้านวงจรรองกำลังแอกทีฟ (สมการที่ (5.3) และ (5.4) ในบทที่ 5) ตามลำดับ จะได้ผลลัพธ์เป็นแบบจำลองไม่ต่อเนื่อง (discrete model) ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ แสดงได้ดังสมการที่ (6.6) และ (6.7) ตามลำดับ จากสมการดังกล่าวดำเนินการจัดรูปใหม่ จนกระทั่งได้สมการ $i_{CPm}(n+1)$ และ $i_{CPt}(n+1)$ ดังสมการที่ (6.8) และ (6.9) ตามลำดับ โดยที่ $i_{Cm}(n)$, $i_{Ct}(n)$, $v_{Pm}(n)$ และ $v_{Pt}(n)$ สามารถพิจารณาได้จากสมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC และกระแสชดเชยทางด้านระบบรางไฟฟ้าและวงจรรองกำลังแอกทีฟของเฟส m และเฟส t เนื่องจากระบบมีการฉีดกระแสชดเชยผ่านหม้อแปลงเชิงเส้น ตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5

$$\frac{i_{CPm}(n+1) - i_{CPm}(n)}{T_s} = \frac{v_{INVm}(n) - R_C i_{CPm}(n) - v_{Pm}(n)}{L_C} \quad (6.6)$$

$$\frac{i_{CPt}(n+1) - i_{CPt}(n)}{T_s} = \frac{v_{INVt}(n) - R_C i_{CPt}(n) - v_{Pt}(n)}{L_C} \quad (6.7)$$

$$i_{CPm}(n+1) = \left(1 - \frac{R_C T_s}{L_C}\right) i_{CPm}(n) + \frac{T_s}{L_C} (v_{INVm}(n) - v_{Pm}(n)) \quad (6.8)$$

$$i_{CPt}(n+1) = \left(1 - \frac{R_C T_s}{L_C}\right) i_{CPt}(n) + \frac{T_s}{L_C} (v_{INVt}(n) - v_{Pt}(n)) \quad (6.9)$$

จากวัตถุประสงค์การชดเชยการประวิงเวลาทางดิจิทัลตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา จึงทำนายกระแสชดเชยทางด้านวงจรรองกำลังแอกทีฟของเฟส m และเฟส t ในอนาคต

รอบที่ $n+2$ ($i_{CPm}(n+2)$, $i_{CPt}(n+2)$) โดยพิจารณาแบบจำลองไม่ต่อเนื่องในสมการที่ (6.8) และ (6.9) ไปข้างหน้าอีกหนึ่งช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6.10) และ (6.11) ตามลำดับ

$$i_{CPm}(n+2) = \left(1 - \frac{R_C T_s}{L_C}\right) i_{CPm}(n+1) + \frac{T_s}{L_C} (v_{INVm}(n+1) - v_{Pm}(n+1)) \quad (6.10)$$

$$i_{CPt}(n+2) = \left(1 - \frac{R_C T_s}{L_C}\right) i_{CPt}(n+1) + \frac{T_s}{L_C} (v_{INVt}(n+1) - v_{Pt}(n+1)) \quad (6.11)$$

การคำนวณ $i_{CPm}(n+2)$ และ $i_{CPt}(n+2)$ ในสมการที่ (6.10) และ (6.11) สังเกตได้ว่า สมการดังกล่าวติดอยู่ในเทอมของค่าแรงดันของวงจรรินเวอร์เตอร์เฟส m และเฟส t ในอนาคตรอบที่ $n+1$ ($v_{INVm}(n+1)$, $v_{INVt}(n+1)$) และค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ทางด้านวงจรรองกำลัง แยกที่ฟของเฟส m และเฟส t ในอนาคตรอบที่ $n+1$ ($v_{Pm}(n+1)$, $v_{Pt}(n+1)$) โดยในเทอมของ $v_{INVm}(n+1)$ และ $v_{INVt}(n+1)$ สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต และเอาต์พุตของวงจรรินเวอร์เตอร์ในแต่ละเฟสร่วมกับสถานะการสวิตช์ของไอจีบีทีในแต่ละกิ่ง แสดงได้ดังสมการที่ (6.12) และ (6.13) ตามลำดับ โดยสถานะการสวิตช์ของไอจีบีทีที่เป็นไปได้สำหรับวงจรรินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟส แสดงได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 สถานะการสวิตช์ของ IGBT สำหรับวงจรรินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันหนึ่งเฟส

สถานะการสวิตช์ (i)	$S_{1(m,t)}$	$S_{2(m,t)}$	$v_{INV(m,t)}$
1	0 (off)	0 (off)	0
2	1 (on)	0 (off)	V_{DC}
3	0 (off)	1 (on)	$-V_{DC}$
4	1 (on)	1 (on)	0

$$v_{INVm}(n+1) = (S_{1m}(n) - S_{2m}(n)) \times V_{DC}(n) \quad (6.12)$$

$$v_{INVt}(n+1) = (S_{1t}(n) - S_{2t}(n)) \times V_{DC}(n) \quad (6.13)$$

ในส่วนของเทอม $v_{Pm}(n+1)$ และ $v_{Pt}(n+1)$ สามารถพิจารณาได้ในลักษณะเดียวกับกระแส $i_{CPm}(n+1)$ และ $i_{Cpt}(n+1)$ โดยการใช้ทฤษฎีออยเลอร์ไปข้างหน้าเพื่อกำหนดค่า $\frac{di_{CPm}}{dt}$ และ $\frac{di_{C,t}}{dt}$ ดังสมการที่ (6.14) และ (6.15) ตามลำดับ จากนั้นนำสมการดังกล่าวแทนลงในสมการที่ (5.3) และ (5.4) ตามลำดับ และทำการจัดรูปสมการ $v_{Pm}(n+1)$ และ $v_{Pt}(n+1)$ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (6.16) และ (6.17) ตามลำดับ

$$\frac{di_{CPm}}{dt} \approx \frac{i_{CPm}(n) - i_{CPm}(n-1)}{T_s} \quad (6.14)$$

$$\frac{di_{Cpt}}{dt} \approx \frac{i_{Cpt}(n) - i_{Cpt}(n-1)}{T_s} \quad (6.15)$$

$$v_{Pm}(n+1) = v_{INVm}(n+1) + \frac{L_C}{T_s} i_{CPm}(n) - \left(\frac{R_C T_s + L_C}{T_s} \right) i_{CPm}(n+1) \quad (6.16)$$

$$v_{Pt}(n+1) = v_{INVt}(n+1) + \frac{L_C}{T_s} i_{Cpt}(n) - \left(\frac{R_C T_s + L_C}{T_s} \right) i_{Cpt}(n+1) \quad (6.17)$$

6.2.3 การคำนวณฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุด

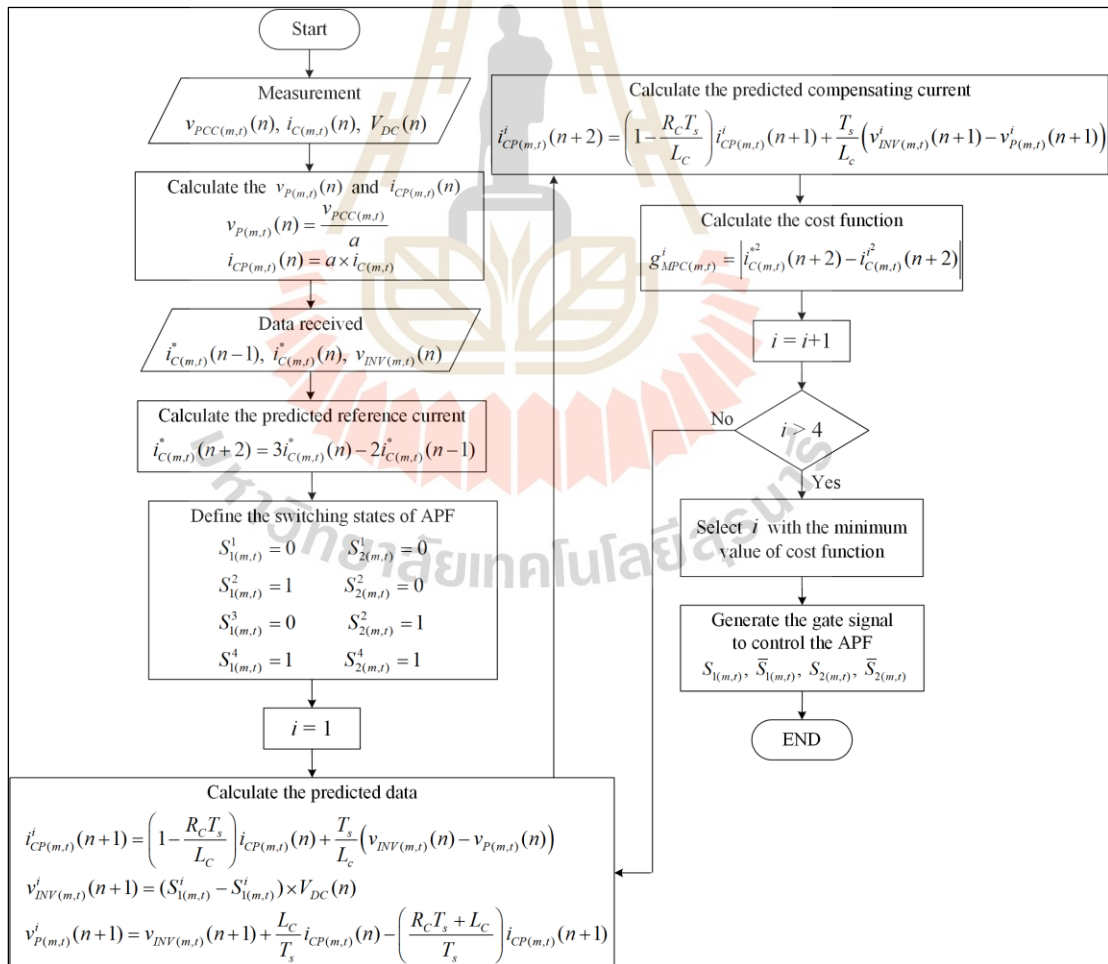
การคำนวณฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุด (minimization of cost function) เป็นกระบวนการที่สำคัญของระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวถูกใช้เป็นข้อมูลในการเลือกสถานะการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพดีที่สุดในแง่ของประสิทธิภาพการควบคุม ซึ่งวัตถุประสงค์ของระบบควบคุมกระแสชดเชย คือ การควบคุมกระแสชดเชยให้มีค่าใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิง ดังนั้น ฟังก์ชันต้นทุนของระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแยกที่ฟเป็นการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างกระแสอ้างอิงกำลังสอง ($i_{Cm}^{*2}(n+2)$, $i_{Ct}^{*2}(n+2)$) และกระแสชดเชยกำลังสอง ($i_{Cm}^2(n+2)$, $i_{Ct}^2(n+2)$) ของเฟส m และเฟส t โดยพิจารณาในรอบที่ $n+2$ แสดงได้ดังสมการที่ (6.18) และ (6.19) ตามลำดับ โดยการคำนวณฟังก์ชันต้นทุน (g_{MPC}) ในหนึ่งช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง จะทำการคำนวณตามจำนวนสถานะการสวิตช์ที่เป็นไปได้ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง จากนั้นจะใช้ค่าฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุด ($g_{MPC(\min)}$) ในหนึ่งช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างเป็นค่าอ้างอิงสำหรับเลือกสถานะการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

$$g_{MPCm} = \left| i_{Cm}^{*2}(n+2) - i_{Cm}^2(n+2) \right| \quad (6.18)$$

$$g_{MPCt} = \left| i_{Ct}^{*2}(n+2) - i_{Ct}^2(n+2) \right| \quad (6.19)$$

โดยที่ $i_{Cm}(n+2) = \frac{i_{CPm}(n+2)}{a}$ และ $i_{Ct}(n+2) = \frac{i_{CPr}(n+2)}{a}$

แผนภาพกระบวนการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.4 กระบวนการควบคุมกระแสชดเชยดังกล่าวมีลำดับการคำนวณ ดังนี้



รูปที่ 6.4 แผนภาพการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม MPC ในหนึ่งช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง

ขั้นที่ 1 วัดค่าทางไฟฟ้าในรอบปัจจุบัน ซึ่งประกอบไปด้วย กระแส $i_{C(m,t)}(n)$ และ แรงดัน $v_{PCC(m,t)}(n)$, $V_{dc}(n)$ จากนั้นทำการคำนวณค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้ เพื่อให้ค่าดังกล่าวอ้างอิง ทางด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ($i_{CP(m,t)}(n)$, $v_{P(m,t)}(n)$) โดยใช้ความสัมพันธ์ของหม้อแปลงเชิงเส้น ตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5

ขั้นที่ 2 รับค่ากระแสอ้างอิงจากการคำนวณด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่ม สมรรถนะ ($i_{C(m,t)}^*(n)$) และค่ากระแสอ้างอิงในอดีตในรอบที่ผ่านมา ($i_{C(m,t)}^*(n-1)$) จากนั้นคำนวณ ค่ากระแส $i_{C(m,t)}^*(n+2)$ ด้วยวิธีลากรางจ์ดังสมการที่ (6.2) และ (6.3)

ขั้นที่ 3 เริ่มต้นพิจารณาสถานะการสวิตช์ที่ i เท่ากับ 1 จากนั้นทำการคำนวณค่า ทางไฟฟ้าตามสถานะการสวิตช์ i นั้น ๆ โดยเริ่มจากการคำนวณกระแส $i_{CP(m,t)}^i(n+1)$ ตามสมการที่ (6.8) และ (6.9) จากนั้นทำการคำนวณแรงดัน $v_{INV(m,t)}^i(n+1)$ ดังสมการที่ (6.12) และ (6.13) ค่าที่ ได้จากสมการดังกล่าวจะใช้สำหรับการคำนวณแรงดัน $v_{P(m,t)}^i(n+1)$ ดังสมการที่ (6.16) และ (6.17) นำค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณตามที่น่าเสนอข้างต้นมาคำนวณกระแส $i_{CP(m,t)}^i(n+2)$ ด้วยสมการ ที่ (6.10) และ (6.11) เพื่อใช้สำหรับการคำนวณค่าฟังก์ชันต้นทุนในขั้นตอนต่อไป

ขั้นที่ 4 คำนวณค่าฟังก์ชันต้นทุนตามสถานะการสวิตช์ i ($g_{MPC(m,t)}^i$) โดยใช้ สมการที่ (6.18) และ (6.19)

ขั้นที่ 5 วนรอบการคำนวณในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จนครบจำนวนสถานะการสวิตช์ ที่ i เท่ากับ 4

ขั้นที่ 6 เลือกสถานะการสวิตช์ (i) ที่มีค่าฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุด เพื่อใช้อ้างอิงในการ สร้างสัญญาณการสวิตช์ ($S_{1(m,t)}$, $\bar{S}_{1(m,t)}$, $S_{2(m,t)}$, $\bar{S}_{2(m,t)}$) สำหรับใช้ในการควบคุมไอจีบีทีของวงจร กรองกำลังแอกทีฟ เพื่อให้กระแสชดเชยมีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง

6.3 การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง

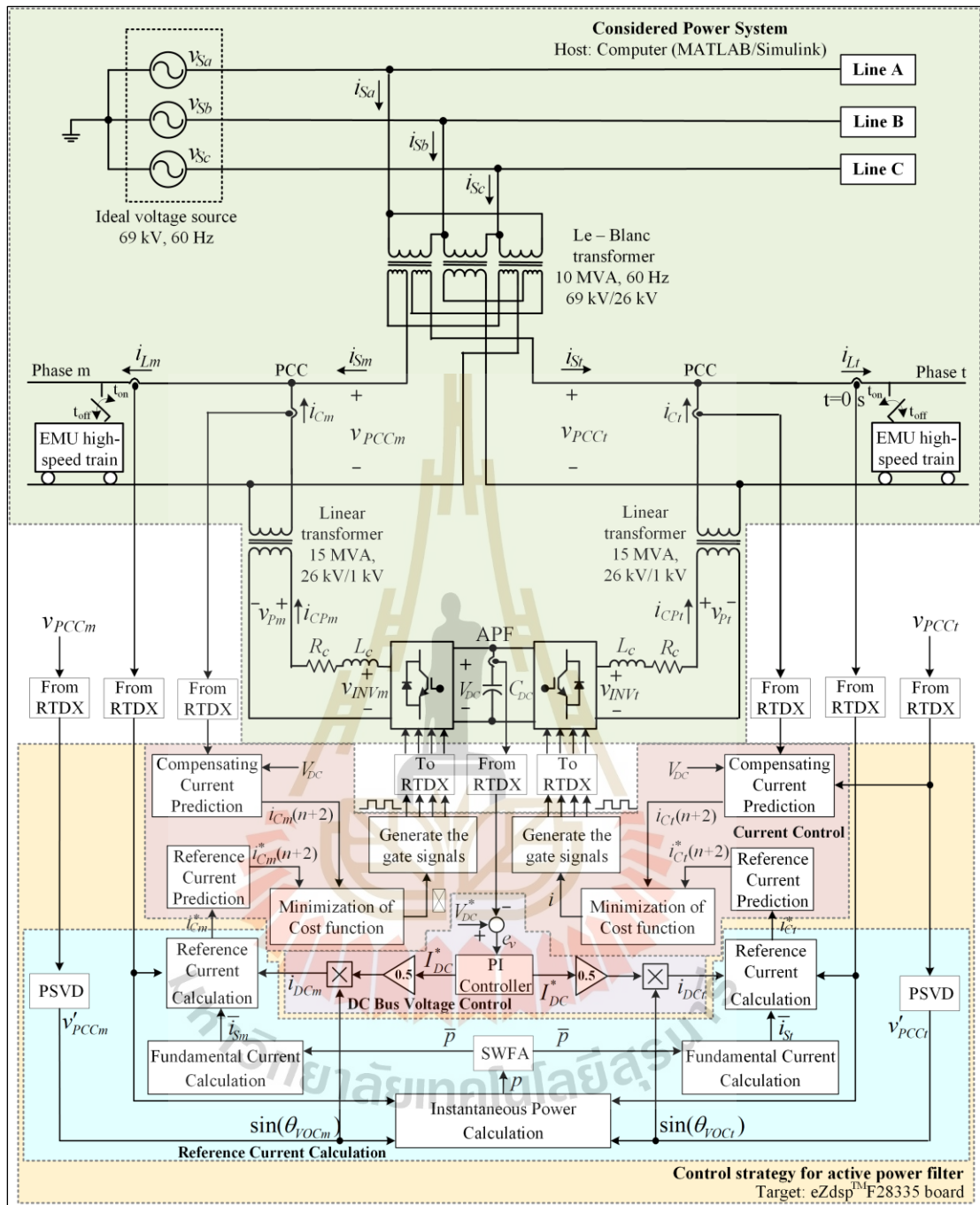
การจำลองสถานการณ์ระบบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าได้ถูก ดำเนินการด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแส ชดเชยของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้ แบบจำลองแทนการใช้งานตัวควบคุมพีไอในส่วนของระบบควบคุมกระแสชดเชย อย่างไรก็ตาม ระบบ ควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟในหัวข้อนี้ยังคงใช้ตัวควบคุมพีไอ นอกจากนี้ ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นไปตามการออกแบบในบทที่ 5 โดยมีโครงสร้างของ ระบบทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอก ทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง แสดงได้ดังรูปที่ 6.5 ซึ่งได้ทำการทดสอบกับระบบ โหลดสมดุล และโหลดไม่สมดุล เช่นเดียวกับการทดสอบในหัวข้อที่ 5.5.1 และ 5.5.2 ตามที่ได้นำเสนอ ไว้ในบทที่ 5 เพื่อใช้สำหรับการยืนยันสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า

และสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง

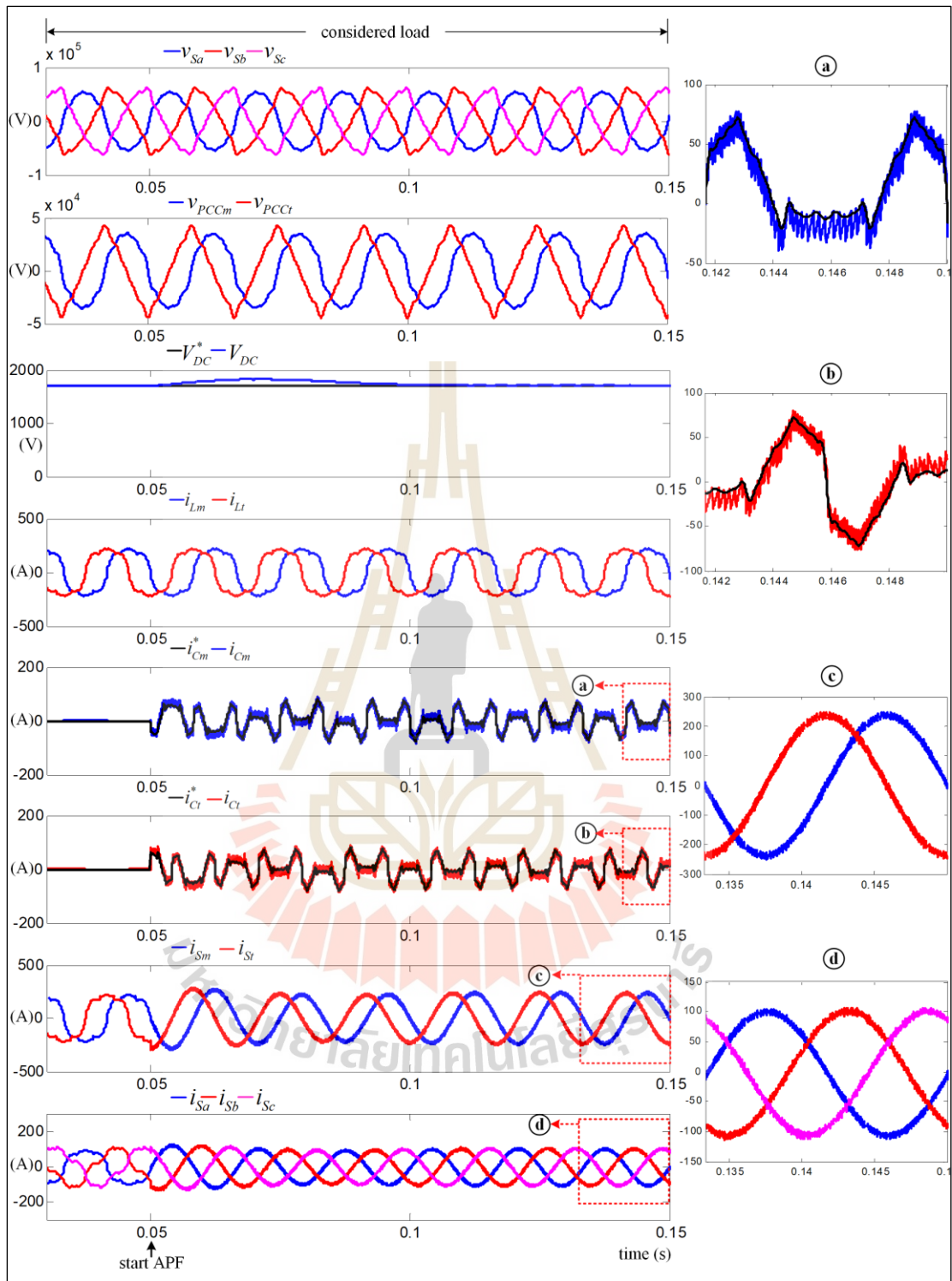
6.3.1 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม MPC กรณีโหลดสมดุล

ระบบทดสอบที่พิจารณาในหัวข้อนี้มีการใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงแบบสมดุล โดยรายละเอียดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (v_{sa} , v_{sb} , v_{sc}) และการใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้าสามารถศึกษาได้จากหัวข้อที่ 4.5.2 การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับระบบทดสอบดังกล่าว มีวัตถุประสงค์ในการทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองสำหรับระบบที่มีการจ่ายโหลดของระบบรางไฟฟ้าแบบสมดุล โดยมีค่าความถี่การสุ่มตัวอย่าง (sampling time) ของตัวควบคุมเท่ากับ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากรณีกระแสโหลดรถไฟความเร็วสูงที่พิจารณา กรณีกระแสโหลดลดลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา และกรณีกระแสโหลดเพิ่มขึ้นจากกระแสโหลดที่พิจารณา สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.6 ถึง 6.8 ตามลำดับสังเกตได้ว่า รูปสัญญาณแรงดัน v_{sa} , v_{sb} และ v_{sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 10.3% ทั้งสามเฟส ส่งผลให้รูปสัญญาณแรงดัน v_{PCCm} และ v_{PCCi} มีลักษณะผิดเพี้ยนตามไปด้วย โดยมีค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 10.17% และ 10.18% ตามลำดับ เมื่อวงจรรอกกำลังแอกทีฟเริ่มฉีดกระแสชดเชยที่เวลา 0.05 วินาที เป็นต้นไป ปรากฏว่า รูปสัญญาณกระแส i_{sm} และ i_{sr} จากที่มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์กลับมามีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ตามไปด้วย จากผลการทดสอบกรณีกระแสโหลดที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 6.6 พบว่า ภายหลังจากฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบที่เวลา 0.05 วินาที ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองสามารถควบคุมให้รูปสัญญาณกระแส i_{cm} และ i_{cr} ให้มีลักษณะคล้ายตาม i_{cm}^* และ i_{cr}^* ตามลำดับ ทำให้รูปสัญญาณ i_{sm} , i_{sr} , i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ โดยค่า $\%THD_i$ ในแต่ละเฟสแสดงได้ดังตารางที่ 6.3 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า PF ก่อนการฉีดกระแสชดเชยมีค่าเท่ากับ 0.97 ซึ่งภายหลังจากชดเชย พบว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองสามารถปรับปรุงค่า PF ให้มีค่าเท่ากับ 0.99 ในส่วนของค่า $\%CUF$ มีค่าเท่ากับ 0% ทั้งก่อนการชดเชยและภายหลังจากชดเชย เนื่องจากระบบที่พิจารณามีลักษณะการจ่ายโหลดแบบสมดุล

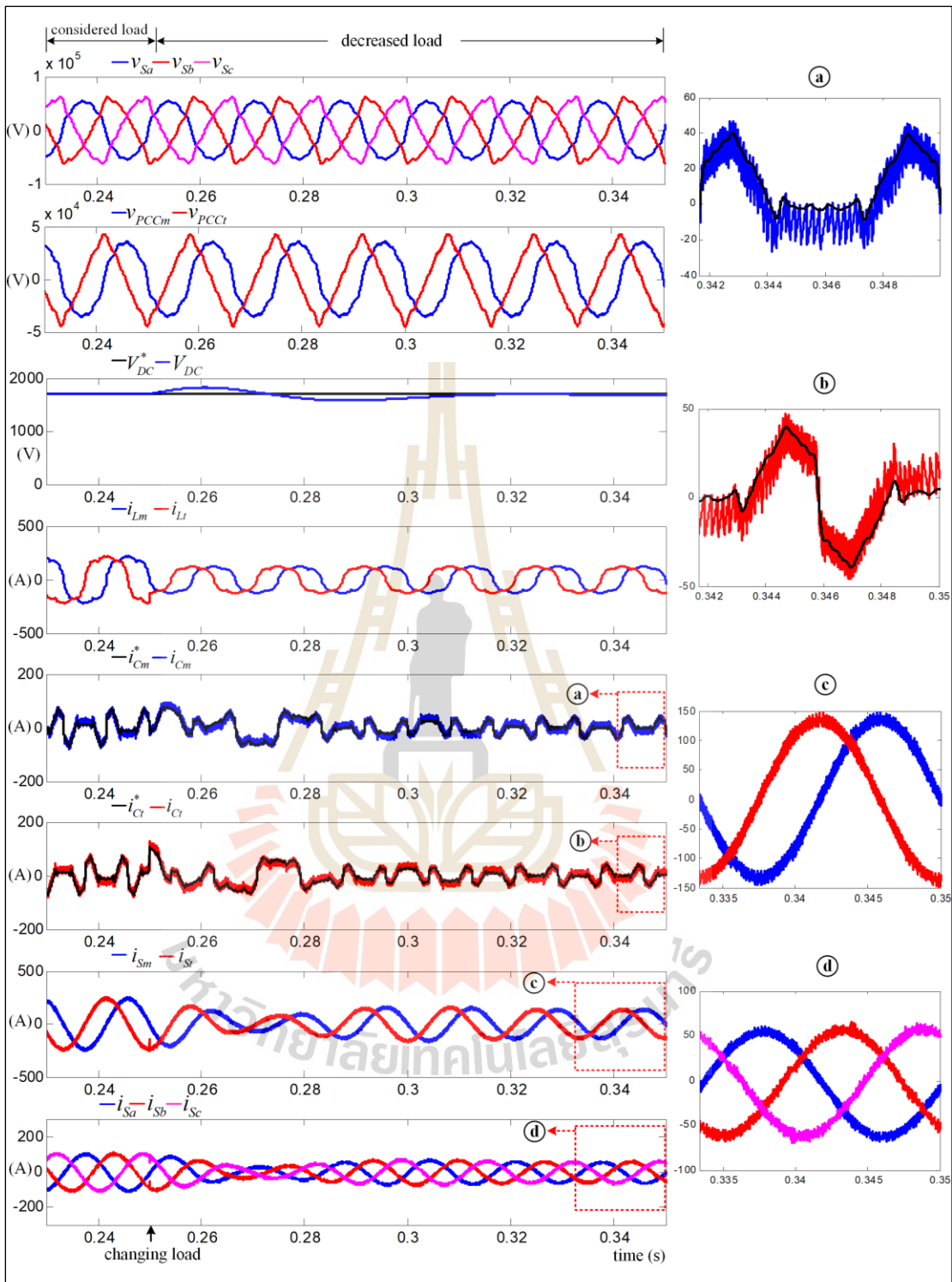
ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในกรณีกระแสโหลดลดลงจากกระแสโหลดที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 6.7 สังเกตได้ว่า ที่เวลา 0.25 วินาที มีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดจากกระแสโหลดที่พิจารณาแบบทันทีทันใด ปรากฏว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองสามารถควบคุมกระแส i_{cm} และ i_{cr} ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแส i_{cm}^* และ i_{cr}^* ได้แบบทันทีทันใด ซึ่งเป็นผลตอบสนองที่รวดเร็วในสภาวะชั่วคราว และเมื่อพิจารณาที่สภาวะอยู่ตัวพบว่า ภายหลังจากชดเชยรูปสัญญาณกระแส i_{sm} และ i_{sr} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ตามไปด้วย โดยมีค่า $\%THD_i$ ในแต่ละเฟสแสดงได้ดังตารางที่ 6.3 แต่อย่างไรก็ตามค่า $\%THD_v$



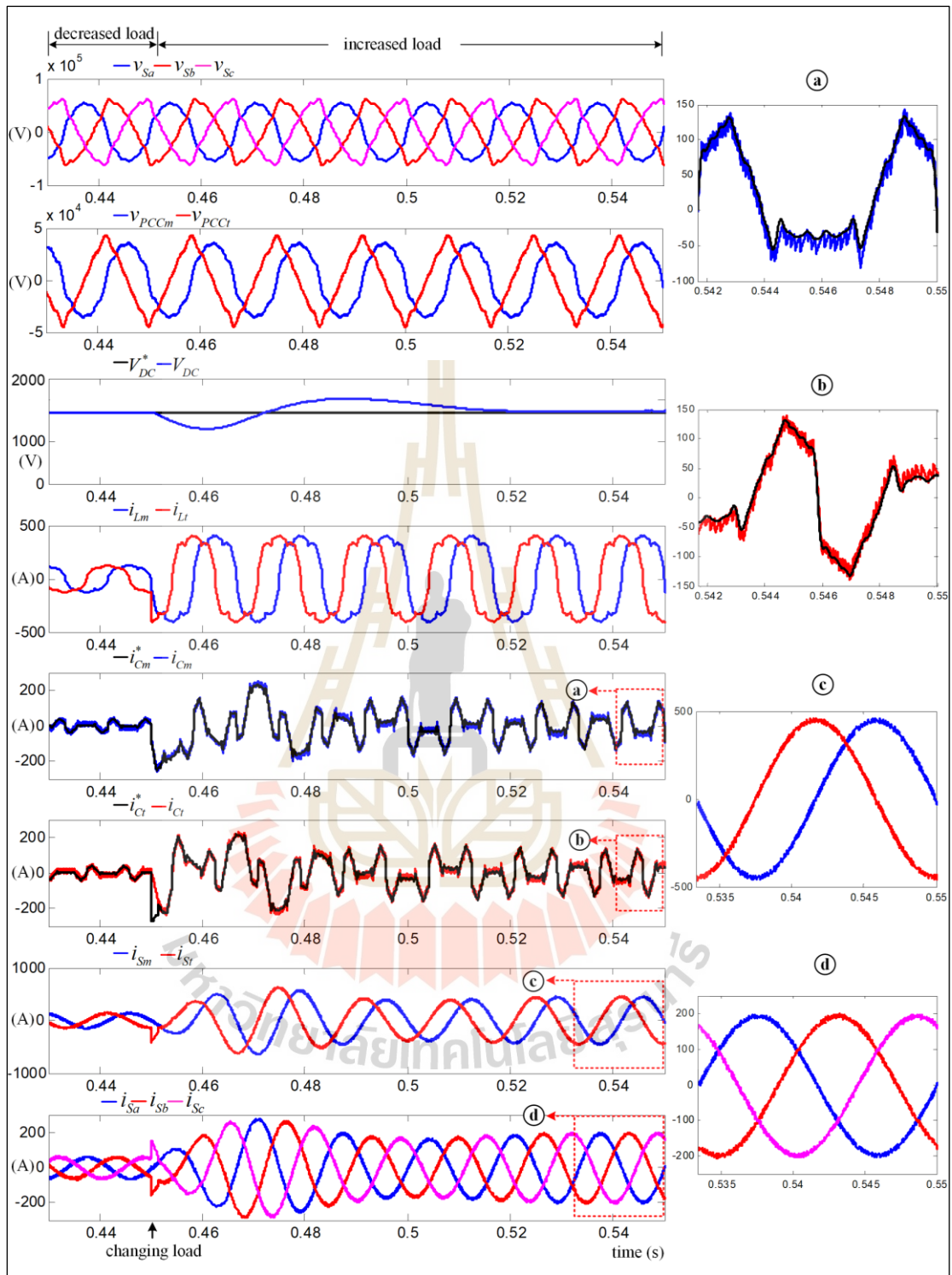
รูปที่ 6.5 โครงสร้างระบบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุม MPC สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย



รูปที่ 6.6 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุม MPC กรณีกระแสโหลดที่พิจารณา



รูปที่ 6.7 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุม MPC กรณีกระแสโหลดลดลง



รูปที่ 6.8 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุม MPC กรณีกระแสโหลดเพิ่มขึ้น

ในกรณีกระแสไหลลดลงจากกระแสไหลที่พิจารณาในแต่ละเฟสมีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ด้วยเหตุผลจากกระแส i_{Cm} และ i_{Cr} ที่ฉีดเข้าสู่จุด PCC มีการกระเพื่อมสูง ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีกระเพื่อมของรูปสัญญาณตามไปด้วย ทำให้ค่า $\%THD_i$ ในแต่ละเฟสมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน หากตัวควบคุมกระแสชดเชยสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Cr} ของวงจรรองกำลังแยกที่ฟให้มึลักษณะการกระเพื่อมต่ำ จะส่งผลให้ค่า $\%THD_i$ ในแต่ละเฟสลดลงตามไปด้วย ดังนั้น การแก้ปัญหาการกระเพื่อมของรูปสัญญาณกระแส i_{Cm} และ i_{Cr} จึงเป็นประเด็นที่ผู้วิจัยให้ความสำคัญสำหรับการพัฒนาตัวควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแยกที่ฟ เพื่อให้กระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่า $\%THD_i$ เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 นอกจากนี้ ระบบที่พิจารณายังคงมีการใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงแบบสมดุลง ส่งผลให้ $\%CUF$ ก่อนและหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 0% และการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแยกที่ฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองให้ผลการปรับปรุงค่า PF ที่ดีขึ้น โดยพิจารณาจากค่า PF ที่เพิ่มขึ้นภายหลังการชดเชย แสดงได้ดังตารางที่ 6.3

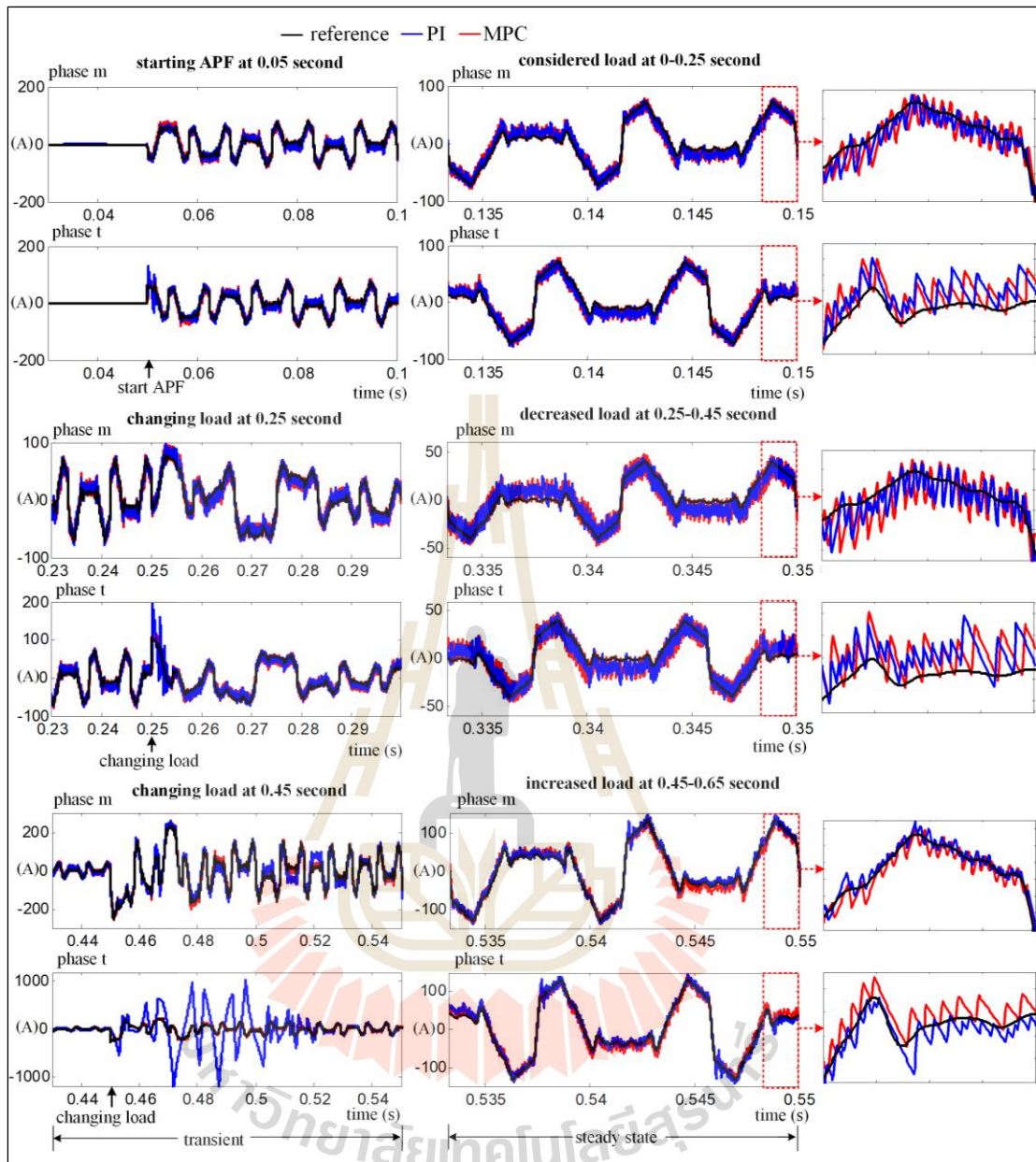
ตารางที่ 6.3 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดสมดุลง ระหว่างตัวควบคุม PI และตัวควบคุม MPC

ประเภทของตัวควบคุม	สถานะของกระแสไหล	$\%THD_i$ ด้านเฟสร่วม		$\%THD_i$ ด้านสามเฟส			$\%CUF$	PF
		เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c		
		ก่อนการชดเชย						
ควบคุมกระแสชดเชย	พิจารณา	22.23	21.21	22.19	21.51	21.33	0.00	0.976
	ลดลง	21.35	19.58	21.25	20.09	19.17	0.00	0.974
	เพิ่มขึ้น	22.77	22.22	22.75	22.39	22.29	0.00	0.976
ภายหลังการชดเชย								
PI	พิจารณา	3.36	3.45	3.35	3.34	3.50	0.00	0.997
	ลดลง	5.52	5.86	5.49	5.65	5.83	0.00	0.991
	เพิ่มขึ้น	2.50	2.46	2.59	1.98	1.93	0.00	0.999
MPC	พิจารณา	3.38	3.40	3.37	3.33	3.45	0.00	0.997
	ลดลง	5.75	5.62	5.70	5.54	5.69	0.00	0.990
	เพิ่มขึ้น	2.14	2.32	2.45	2.34	2.36	0.00	0.999

ผลการทดสอบในรูปที่ 6.8 เป็นการพิจารณาในกรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้นจากกระแสไหลที่พิจารณาที่เวลา 0.45 วินาที ซึ่งพบว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Cr} ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแส i_{Cm}^* และ i_{Cr}^* ได้แบบทันทีทันใดทั้งในสถานะชั่ว

ครู่และในสถานะอยู่ตัว ส่งผลให้รูปสัญญาณ i_{sm} และ i_s มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ อีกทั้งกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ก็มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ตามไปด้วย โดยมีค่า $\%THD_i$ อยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 แสดงได้ดังตารางที่ 6.3 นอกจากนี้ ตัวประกอบกำลังภายหลังการชดเชยมีเท่ากับ 0.99 สำหรับค่า $\%CUF$ มีค่าเท่ากับ 0% ทั้งก่อนการชดเชยและภายหลังการชดเชย ในส่วนของผลการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ พบว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมค่าแรงดัน V_{DC} ให้ใกล้เคียงกับแรงดัน V_{DC}^* ถึงแม้ว่ากระแสไหลที่พิจารณาจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ดังแสดงในรูปที่ 6.6 ถึง 6.8 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในสถานะโหลดต่าง ๆ กรณีโหลดสมดุล แสดงได้ดังตารางที่ 6.3

การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง แสดงได้ดังรูปที่ 6.9 เมื่อพิจารณาในสถานะชั่วคราว สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองให้ผลตอบสนองของการควบคุมกระแสชดเชยที่รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอ และสามารถแก้ไขปัญหาการเพิ่มขึ้นของกระแสที่แหล่งจ่ายในสถานะชั่วคราวจากการฉีดกระแสชดเชยที่ผิดพลาดไปจากกระแสอ้างอิงของตัวควบคุมพีไอ ดังนั้นการฉีดกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ โดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ ในสถานะอยู่ตัว พบว่าการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง ถึงแม้ว่ากระแสไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงจากกระแสไหลที่พิจารณา แต่ในกรณีกระแสไหลลดลงรูปสัญญาณกระแส i_{cm} และ i_c จากตัวควบคุมทั้งสองชนิดมีการกระเพื่อมของรูปสัญญาณสูง ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายในแต่ละเฟสเกิดกระเพื่อมของรูปสัญญาณตามไปด้วย โดยมีค่า $\%THD_i$ สูงกว่าข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 เมื่อพิจารณาดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบแรงดันไฟฟ้าในตารางที่ 6.3 สามารถบ่งชี้ได้ว่าตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองมีสมรรถนะในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟในสถานะอยู่ตัวใกล้เคียงกัน เนื่องจากมี $\%THD_i$ และ PF ในสถานะโหลดต่าง ๆ กรณีโหลดสมดุลใกล้เคียงกัน จากเหตุผลข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองมีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยในสถานะชั่วคราวที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ แต่อย่างไรก็ตาม กระแสชดเชยของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองยังคงมีการกระเพื่อมของรูปสัญญาณสูงในช่วงสถานะอยู่ตัว ซึ่งเป็นประเด็นที่จะได้รับการพัฒนาตัวควบคุมในอนาคต

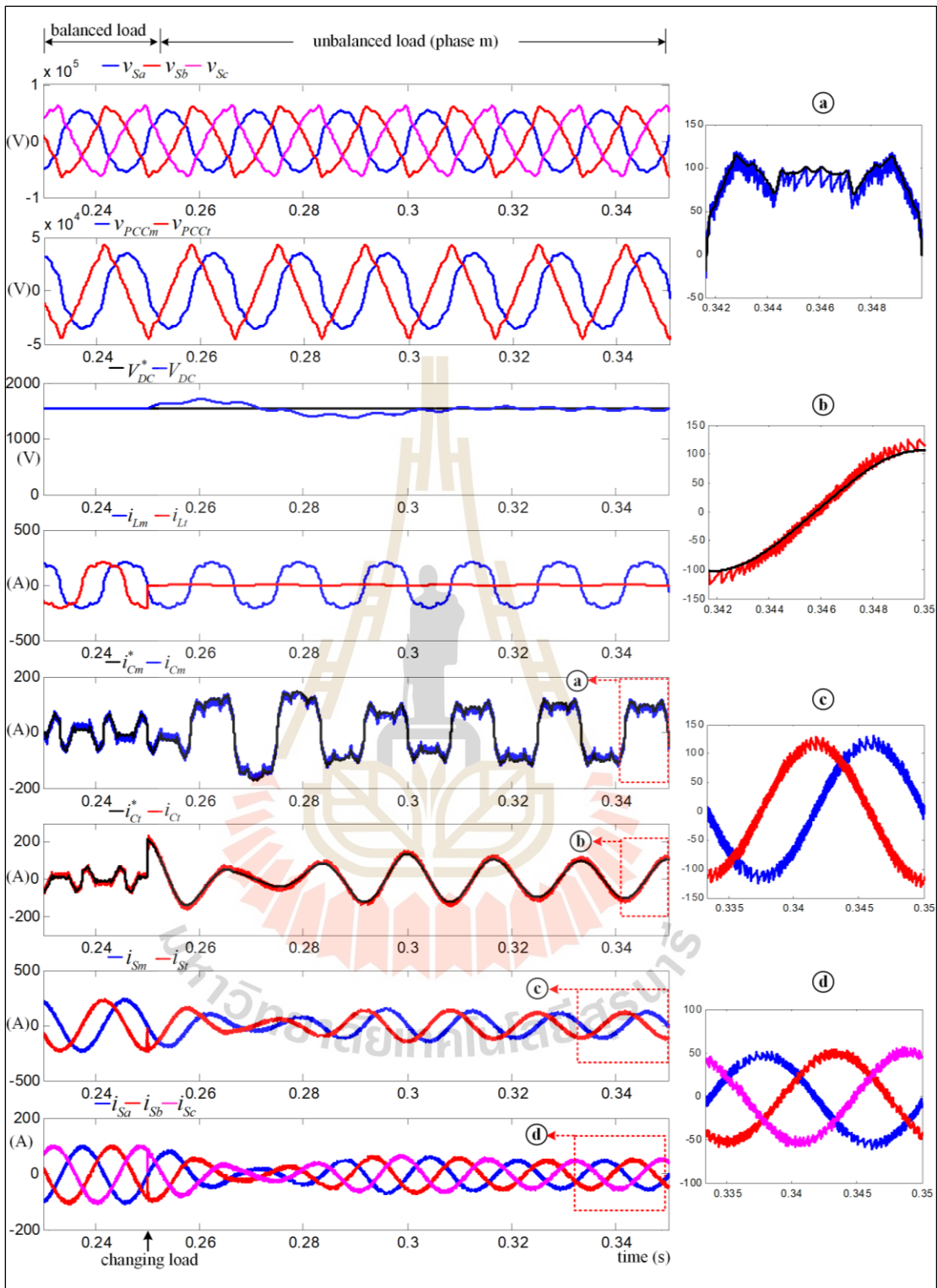


รูปที่ 6.9 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสขดเซรระหว่างตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุม MPC สำหรับระบบโหลดสมดุล

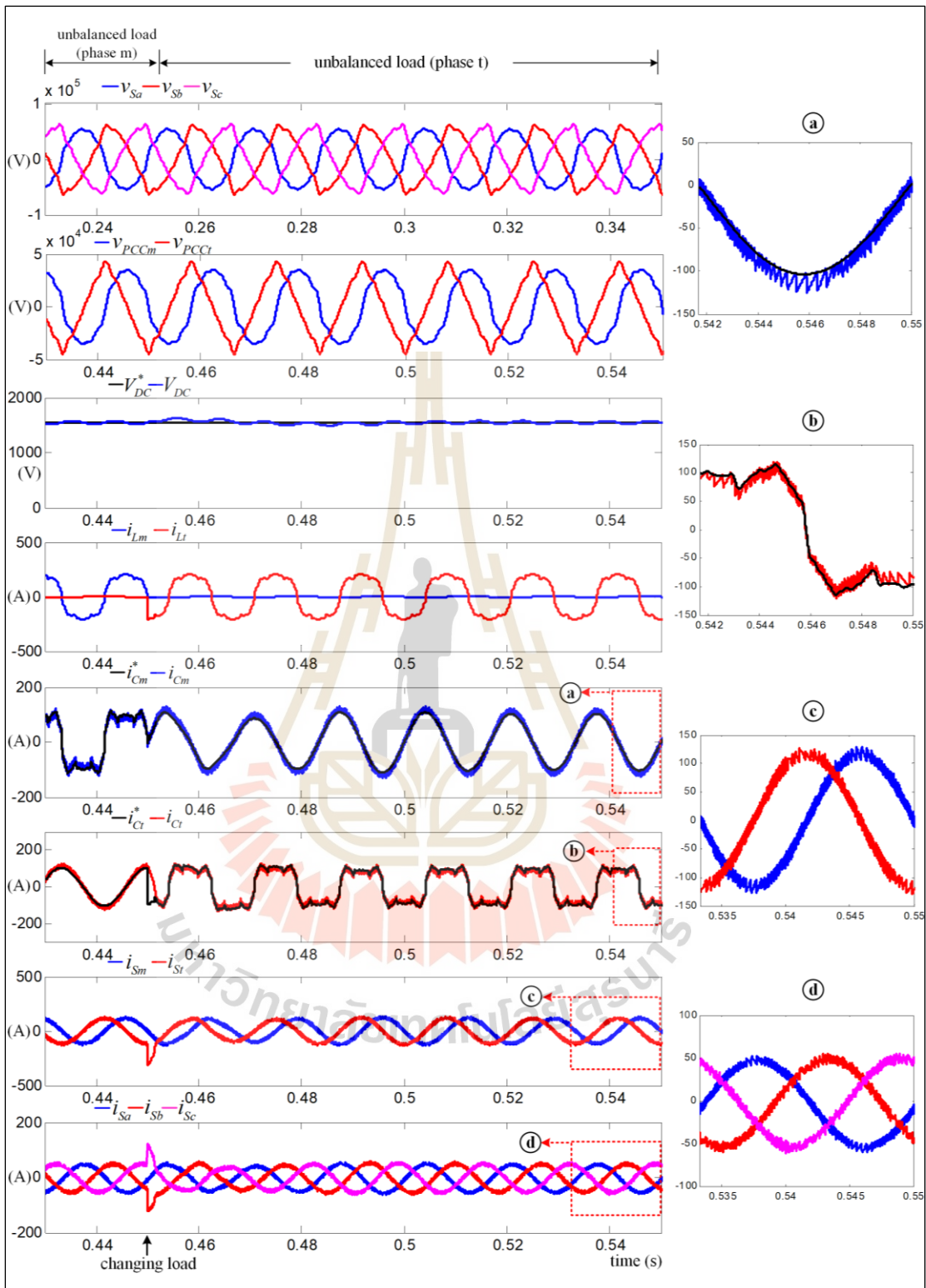
6.3.2 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม MPC กรณีโหลดไม่สมดุล

ระบบแรงไฟฟ้าที่มีการจ่ายโหลดรถไฟความเร็วสูงแบบไม่สมดุล เป็นระบบทดสอบที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ โดยรูปสัญญาณแรงดัน v_{Sa} , v_{Sb} และ v_{Sc} มีค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 10.3% ทั้งสามเฟส ส่งผลให้รูปสัญญาณแรงดัน v_{PCCm} และ v_{PCCi} มี

ลักษณะผิดเพี้ยนตามไปด้วย โดยมีค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 10.17% และ 10.18% ตามลำดับ และทำการพิจารณาลักษณะการจ่ายโหลดตรงไฟความเร็วสูงออกเป็นสามช่วง คือ ช่วงแรกมีการจ่ายโหลดแบบสมดุล ช่วงที่สองมีการจ่ายโหลดตรงไฟฟ้าเฉพาะเฟส m และช่วงที่สามมีการจ่ายโหลดตรงไฟฟ้าเฉพาะเฟส t รายละเอียดของระบบทดสอบดังกล่าวสามารถศึกษาได้จากหัวข้อที่ 4.5.4 สำหรับโครงสร้างส่วนอื่น ๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบทดสอบกรณีโหลดสมดุลตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.5.4 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 6.10 ถึง 6.12 โดยเป็นการพิจารณากรณีโหลดสมดุล (กรณีกระแสโหลดที่พิจารณา) กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m และกรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภายหลังการฉีดกระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Ct}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเข้าสู่ระบบที่จุด PCC พบว่า ผลการฉีดกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{sm} และ i_{st} กลับมามีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์และมีลักษณะสมดุลตามไปด้วย โดยมีค่า $\%THD_i$ ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยในแต่เฟสมีค่าลดลงจากก่อนการชดเชย นอกจากนี้ ภายหลังการชดเชย $\%CUF$ ยังมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก ดัชนีชี้วัดดังกล่าว ให้ความหมายว่า รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} สามารถกลับมามีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์และอยู่ในสภาวะสมดุลได้ ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบความไม่สมดุลยังได้ช่วยปรับปรุงค่า PF ของระบบให้มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสำหรับทั้งสามช่วงของระบบทดสอบได้ถูกนำเสนอไว้ ดังตารางที่ 6.4 แต่อย่างไรก็ตาม $\%THD_i$ ในกรณีโหลดไม่สมดุลมีค่าเกินข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 เนื่องจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองมีการฉีดกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ที่เกิดการกระเพื่อมของรูปสัญญาณสูง ส่งผลให้กระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ภายหลังการชดเชยมีการกระเพื่อมของรูปสัญญาณสูงตามไปด้วย เป็นผลให้ $\%THD_i$ ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยในแต่เฟสมีค่าเกินมาตรฐาน ซึ่งปัญหาในส่วนนี้ได้เกิดขึ้นทั้งในระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญในประเด็นปัญหาดังกล่าวสำหรับการพัฒนาระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ นอกจากนี้ ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดัน V_{DC} ให้มีค่าใกล้เคียงแรงดัน V_{DC}^* ตลอดทุกช่วงการทดสอบ ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าทั้งสามช่วงการทดสอบ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.4



รูปที่ 6.10 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุม MPC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m

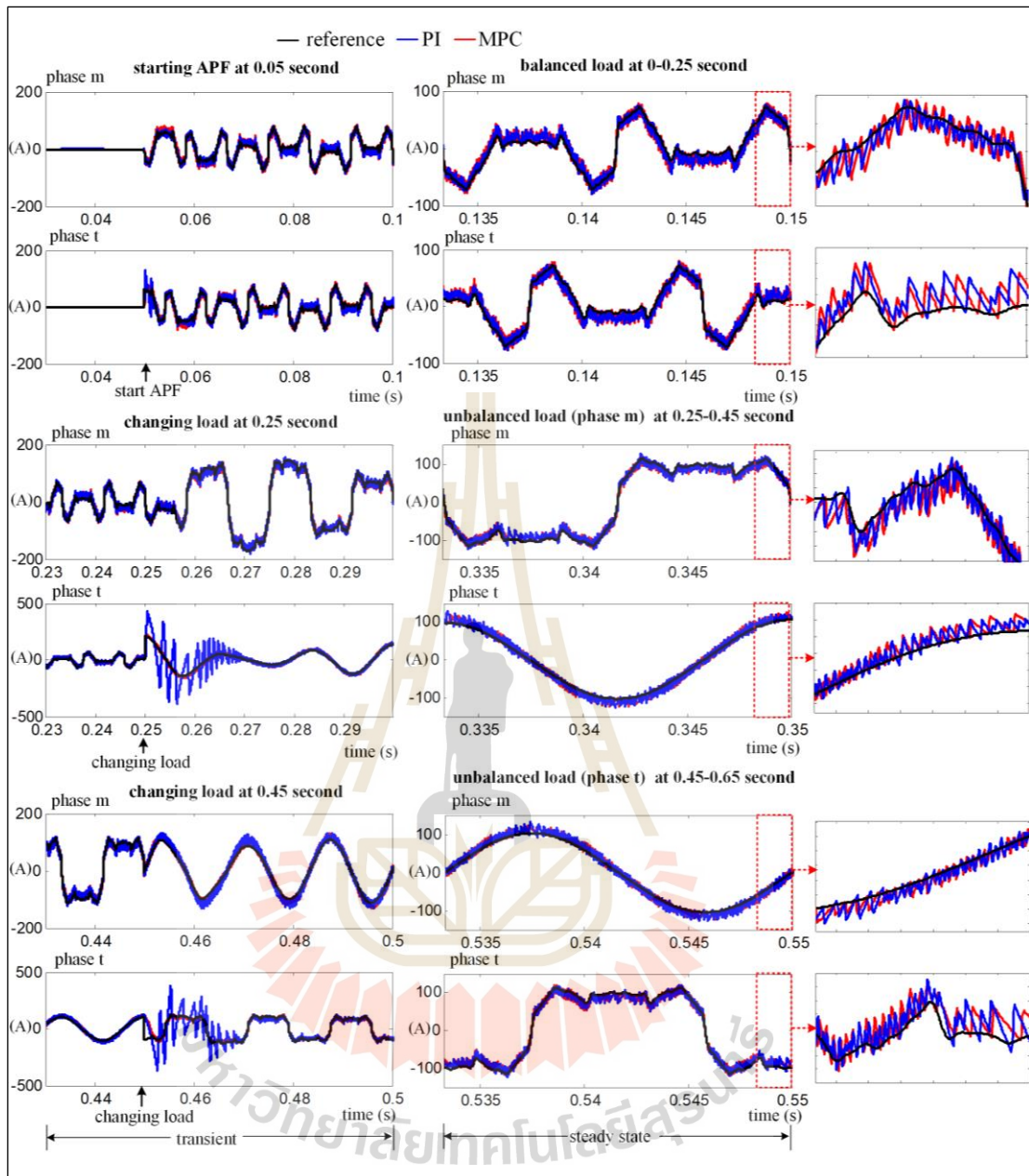


รูปที่ 6.11 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม MPC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t

สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของเฟส m และเฟส t ระหว่างตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง แสดงได้ดังรูปที่ 6.12 จากรูปดังกล่าว ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยออกเป็นสองประเด็น คือ สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยในสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัว จากผลการศึกษา พบว่า ในสภาวะอยู่ตัว ตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง สามารถควบคุมให้กระแสชดเชยมีลักษณะคล้อยตามกระแสอ้างอิงทั้งในกรณีโหลดสมดุลและโหลดไม่สมดุล แต่อย่างไรก็ตาม ลักษณะการคล้อยตามของกระแสชดเชยมีการกระเพื่อมของรูปสัญญาณสูงเมื่อโหลดไม่สมดุล ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย ทำให้ $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายสูงกว่ามาตรฐาน IEEE standard 519-2014 และเมื่อพิจารณาสภาวะชั่วคราว ปรากฏว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ให้ผลการตอบสนองที่เร็วกว่าตัวควบคุมพีไอ พิจารณาได้จากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ให้มีลักษณะคล้อยตามกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ได้อย่างทันทีทันใด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลด ผลการทดสอบดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองมีสมรรถนะในการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ

ตารางที่ 6.4 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุล ระหว่างตัวควบคุม PI และตัวควบคุม MPC

ประเภทของตัวควบคุม	สถานะของกระแสโหลด	$\%THD_i$ ด้านเฟสร่วม		$\%THD_i$ ด้านสามเฟส			$\%CUF$	PF
		เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c		
		ก่อนการชดเชย						
ควบคุมกระแสชดเชย	สมดุล	22.23	21.21	22.19	21.51	21.33	0.00	0.976
	ไม่สมดุลเฟส m	22.22	0.00	22.17	20.52	24.14	95.45	0.694
	ไม่สมดุลเฟส t	0.00	21.19	8.04	21.85	20.46	95.45	0.703
ภายหลังการชดเชย								
PI	สมดุล	3.36	3.45	3.35	3.34	3.50	0.00	0.997
	ไม่สมดุลเฟส m	8.25	8.20	8.19	8.19	8.13	0.50	0.987
	ไม่สมดุลเฟส t	8.29	8.45	8.24	8.49	8.21	0.51	0.987
MPC	สมดุล	3.36	3.45	3.35	3.34	3.50	0.00	0.997
	ไม่สมดุลเฟส m	8.29	8.02	8.23	8.24	7.82	0.25	0.987
	ไม่สมดุลเฟส t	8.10	8.29	8.04	8.14	8.23	0.26	0.987



รูปที่ 6.12 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุม MPC สำหรับระบบโหลดไม่สมดุล

6.4 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวมีจุดเด่น คือ การลดผลกระทบจากการประวิงเวลาทางดิจิทัลส่งผลให้มีผลตอบสนองที่รวดเร็ว ด้วยเหตุนี้ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง จึงให้สมรรถนะการติดตามกระแสอ้างอิงสำหรับกระแสชดเชยในสถานะชั่วคราวที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ สามารถแก้ไขปัญหาการเพิ่มขึ้นของกระแสที่แหล่งจ่ายในสถานะชั่วคราวจากการฉีดกระแสชดเชยที่ผิดพลาดไปจากกระแสอ้างอิงของตัวควบคุมพีไอ และการฉีดกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองไม่ส่งผลกระทบต่อความเร็วของระบบรางไฟฟ้า โดยมีการยืนยันผลการทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองด้วยเทคนิคฮาร์แวร์ในรูป อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ยังปรากฏว่า ในสถานะกระแสไหลลดลงจากกระแสที่พิจารณา โหลดไม่สมดุลเฟส m และโหลดไม่สมดุลเฟส t ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการกำจัดฮาร์โมนิก ($\%THD$) ภายหลังจากชดเชยมีค่าสูงขึ้นเกินกรอบมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 เนื่องด้วยกระแสชดเชยมีการกระเพื่อมของรูปสัญญาณสูง ข้อดีในส่วนนี้ของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองจะได้รับการพัฒนา ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 7

ระบบควบคุมกระแสตเซชด้วยตัวควบคุมแบบทำนาย ที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต

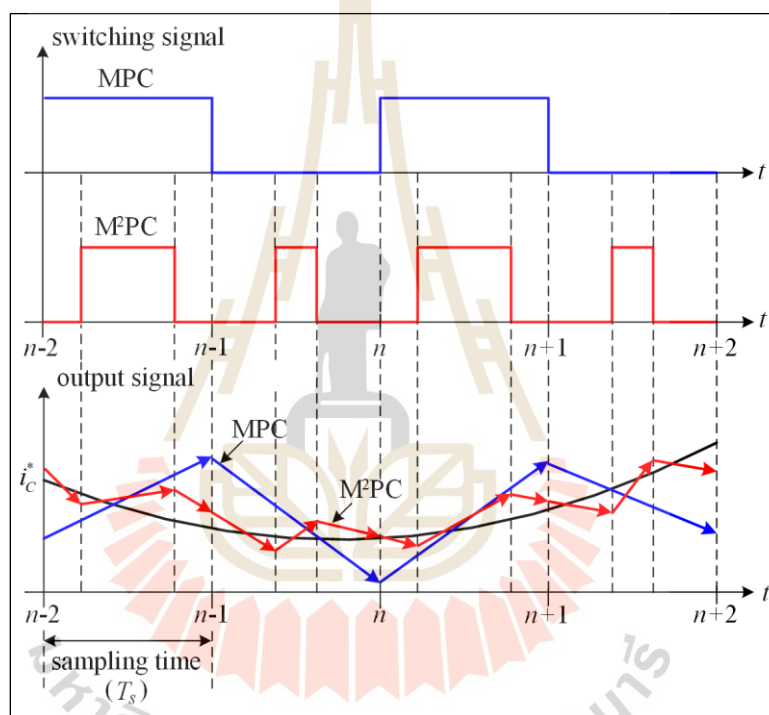
7.1 บทนำ

ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต (Modulated Model Predictive Control: M²PC) ได้ถูกนำเสนอในปี ค.ศ. 2014 โดย Tarisciotti และคณะ (L. Tarisciotti et al., 2014) ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวได้รับการพัฒนาจากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง (MPC) โดยการนำเทคนิคการสร้างสัญญาณสวิตช์ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์มอดูเลเตอร์ (Space Vector Modulator : SVM) มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ทำให้สัญญาณการสวิตช์ในช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างมีค่าไม่คงตัว เนื่องด้วยมีการพิจารณาตัวจกักรหน้าที (duty cycle) ของสัญญาณการสวิตช์ ทำให้มีประสิทธิผลการสวิตช์ที่ดีขึ้น สามารถลดการกระเพื่อมของสัญญาณเอาต์พุต และลดปริมาณฮาร์โมนิกอันเนื่องจากการสวิตช์ เป็นการปรับปรุงข้อด้อยของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ด้วยเหตุนี้ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตมาใช้ในการควบคุมกระแสตเซชของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ เพื่อวัตถุประสงค์ในการแก้ไขปัญหาค่าการกระเพื่อมของรูปสัญญาณกระแสตเซชที่ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิก (%THD_i) ภายหลังการชดเซช มีค่าสูงขึ้นเกินกรอบมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ตามที่ได้นำเสนอในบทก่อนหน้านี้ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตจึงให้สมรรถนะการควบคุมกระแสตเซชให้มีค่าใกล้เคียงกระแสอ้างอิงในสภาวะอยู่ตัวที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง รายละเอียดหลักการทำงานและแนวทางการควบคุมกระแสตเซชด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต สำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ รวมทั้งผลการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบเพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะด้านการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าและสมรรถนะด้านการควบคุมกระแสตเซชของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตได้ถูกนำเสนอไว้อย่างละเอียดในบทนี้

7.2 ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต

ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต มีพื้นฐานมาจากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง โดยตัวควบคุมดังกล่าวมีการนำเทคนิคการสวิตช์ด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์มอดูเลเตอร์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ทำให้สัญญาณการสวิตช์ในช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างมีค่าไม่คงตัว เนื่องจากมีการพิจารณาตัวจกักรหน้าที (duty cycle) ตามเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลเตอร์ในการสร้างสัญญาณการสวิตช์ ซึ่งแตกต่างจากตัวควบคุมแบบ

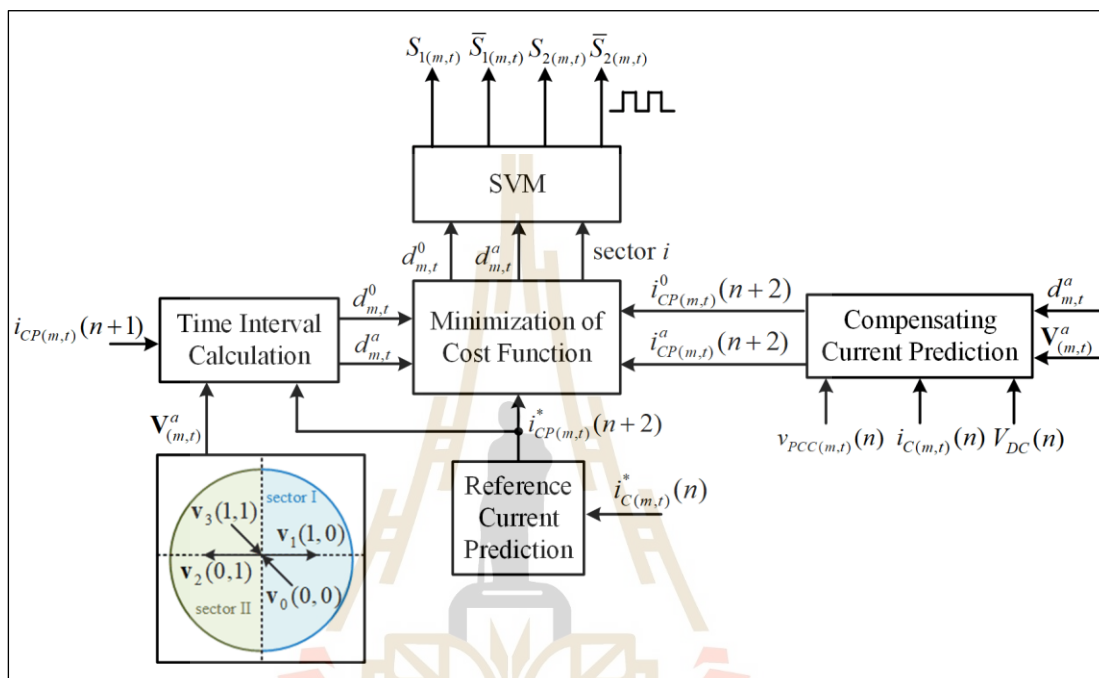
ทำนายที่ใช้แบบจำลองที่มีสัญญาณการสวิตช์คงตัวในหนึ่งช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง จึงทำให้ตัวควบคุมดังกล่าวสามารถให้ประสิทธิผลการสวิตช์ที่ดีขึ้น และลดปริมาณฮาร์มอนิกของสัญญาณเอาต์พุตจากผลการสวิตช์ โดยสามารถพิจารณาได้จากการกระเพื่อม (ripple) ของรูปสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตมีค่าน้อยกว่าจากการใช้งานตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 7.1 นอกจากนี้ จากรูปดังกล่าวยังสังเกตเห็นได้ว่า ผลจากการลดการกระเพื่อมทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะใกล้เคียงสัญญาณอ้างอิงมากขึ้นอีกด้วย ดังนั้นตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตจึงมีสมรรถนะในการควบคุมสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าใกล้เคียงสัญญาณอ้างอิงที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง



รูปที่ 7.1 สัญญาณการสวิตช์และสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุม MPC และตัวควบคุม M²PC

จากจุดเด่นของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบแรงไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต เพื่อวัตถุประสงค์ในการแก้ไขปัญหาการกระเพื่อมของรูปสัญญาณกระแสชดเชยที่ส่งผลให้ %THD; ภายหลังการชดเชย มีค่าสูงขึ้นเกินข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 โดยสามารถแสดงโครงสร้างของระบบควบคุมดังกล่าวดังรูปที่ 7.2 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตมีส่วนที่สำคัญ 4 ส่วน ประกอบด้วย การทำนายกระแสอ้างอิงในอนาคต (reference current prediction) การทำนายกระแสชดเชยในอนาคต (compensating

current prediction) การคำนวณค่าวัฏจักรหน้าที่ในช่วงเวลาสุ่มตัวอย่าง (time interval calculation) และกระบวนการหาฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุดเพื่อให้ได้สถานะการสวิตช์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้กระแสชดเชยมีค่าใกล้เคียงกระแสอ้างอิง (Minimization of cost function) องค์ประกอบทั้ง 4 ส่วนของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองรวมกับการมอดูเลตสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



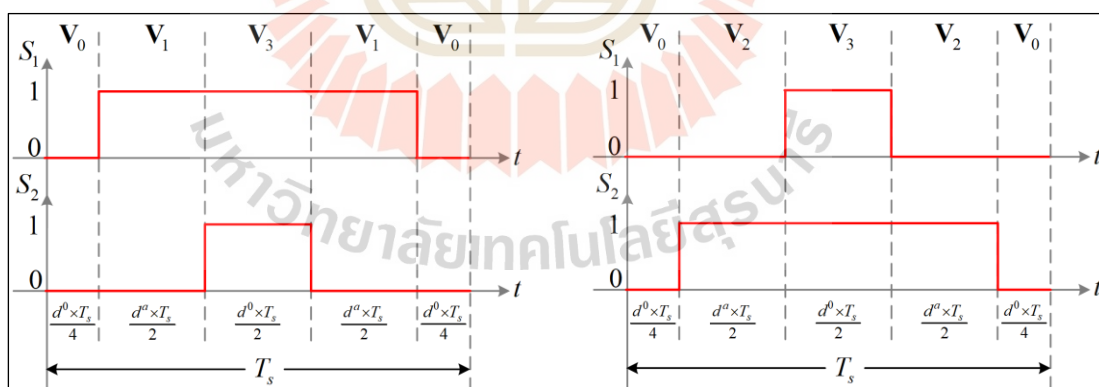
รูปที่ 7.2 โครงสร้างการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกที่พัวด้วยตัวควบคุม M^2PC

7.2.1 การทำนายกระแสอ้างอิงในอนาคตสำหรับตัวควบคุม M^2PC

การทำนายค่ากระแสอ้างอิงในอนาคตของเฟส m และเฟส t ของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองรวมกับการมอดูเลตมีการคำนวณในลักษณะเดียวกันกับการทำนายกระแสอ้างอิงในอนาคตของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองที่ได้นำเสนอในบทที่ 6 โดยสามารถคำนวณได้จากค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ และทำการทำนายค่ากระแสอ้างอิงของเฟส m และเฟส t ในรอบ $n+2$ ($i_{C_m}^*(n+2)$, $i_{C_t}^*(n+2)$) เพื่อวัตถุประสงค์ในการชดเชยการประวิงเวลาทางดิจิทัลที่เกิดจากการคำนวณบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และกระบวนการส่งข้อมูลจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังนั้น กระแส $i_{C_m}^*(n+2)$ และ $i_{C_t}^*(n+2)$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6.2) และ (6.3) ตามลำดับ (รายละเอียดของการคำนวณค่าดังกล่าวสามารถศึกษาได้จากหัวข้อที่ 6.2.1)

7.2.2 การทำนายกระแสชดเชยในอนาคตสำหรับตัวควบคุม M²PC

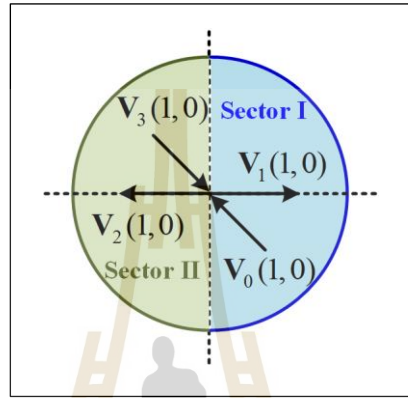
การทำนายกระแสชดเชยของเฟส m และเฟส t เริ่มต้นจากการพิจารณาโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับระบบรางไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 เพื่อหาแบบจำลองไม่ต่อเนื่อง (discrete model) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จากนั้นทำนายกระแสชดเชยทางด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส m และเฟส t ในอนาคตรอบที่ $n+2$ ($i_{CPm}(n+2)$, $i_{CPr}(n+2)$) โดยพิจารณาจากแบบจำลองไม่ต่อเนื่องของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ แสดงได้ดังสมการที่ (6.10) และ (6.11) ตามลำดับ (รายละเอียดที่มาของสมการได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.2.2) การคำนวณ $i_{CPm}(n+2)$ และ $i_{CPr}(n+2)$ ในสมการที่ (6.10) และ (6.11) พบว่า สมการดังกล่าวติดอยู่ในเทอมของค่าแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์เฟส m และเฟส t ในอนาคตรอบที่ $n+1$ ($v_{INVm}(n+1)$, $v_{INVt}(n+1)$) และค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ทางด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส m และเฟส t ในอนาคตรอบที่ $n+1$ ($v_{Pm}(n+1)$, $v_{Pt}(n+1)$) โดยในเทอมของ $v_{INVm}(n+1)$, และ $v_{INVt}(n+1)$ จะต้องพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ในแต่ละเฟสร่วมกับเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลเตอร์สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟส ซึ่งเทคนิคดังกล่าวมีรูปแบบการสวิตช์ของไอจีบีที (S_1, S_2) (K. Antar, et al., 2018) แสดงได้ดังรูปที่ 7.3 จากรูปดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 สถานะเวกเตอร์ ประกอบด้วย $V_0(0,0)$ $V_1(1,0)$ $V_2(0,1)$ $V_3(1,1)$ โดยที่ V_0 และ V_3 คือ เวกเตอร์ศูนย์ (zero vector: V^0) ในส่วน V_1 และ V_2 คือ เวกเตอร์แอกทีฟ (active vector: V^a) ตำแหน่งของเวกเตอร์แรงดันทั้งหมดแบ่งได้เป็นสองส่วน เรียกว่า เซกเตอร์ (sector) ในแต่ละเซกเตอร์จะมีมุมกว้างเท่ากัน คือ π เรเดียน แสดงได้ดังรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.3 รูปแบบการสวิตช์ของไอจีบีที

จากการพิจารณารูปแบบการสร้างสัญญาณการสวิตช์ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลเตอร์จะมีเวกเตอร์แอกทีฟ และเวกเตอร์ศูนย์เข้ามาเกี่ยวข้องในการพิจารณาเทอมของ $v_{INV,m}(n+1)$ และ $v_{INVt}(n+1)$ ดังนั้น การทำนายกระแสชดเชย $i_{CPm}(n+2)$ และ $i_{CPr}(n+2)$ จึง

ประกอบไปด้วย กระแสชดเชยในอนาคตเวกเตอร์แอกทีฟของเฟส m และเฟส t ($i_{CPm}^a(n+2)$, $i_{CPt}^a(n+2)$) และกระแสชดเชยในอนาคตเวกเตอร์ศูนย์ของเฟส m และเฟส t ($i_{CPm}^0(n+2)$, $i_{CPt}^0(n+2)$) โดยการคำนวณค่ากระแสชดเชยในอนาคตเวกเตอร์แอกทีฟและเวกเตอร์ศูนย์แสดงได้ดังสมการที่ (7.1) ถึง (7.4) ตามลำดับ ซึ่งสมการดังกล่าวอ้างอิงมาจากแบบจำลองไม่ต่อเนื่องของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ตามที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อ 6.2.2



รูปที่ 7.4 สถานะเวกเตอร์แรงดันในแต่ละเซกเตอร์

$$i_{CPm}^a(n+2) = \left(1 - \frac{R_C T_s}{L_C}\right) i_{CPm}(n+1) + \frac{T_s}{L_c} (v_{INVm}^a(n+1) - v_{Pm}(n+1)) \quad (7.1)$$

$$i_{CPt}^a(n+2) = \left(1 - \frac{R_C T_s}{L_C}\right) i_{CPt}(n+1) + \frac{T_s}{L_c} (v_{INVt}^a(n+1) - v_{Pt}(n+1)) \quad (7.2)$$

$$i_{CPm}^0(n+2) = \left(1 - \frac{R_C T_s}{L_C}\right) i_{CPm}(n+1) + \frac{T_s}{L_c} (v_{INVm}^0(n+1) - v_{Pm}(n+1)) \quad (7.3)$$

$$i_{CPt}^0(n+2) = \left(1 - \frac{R_C T_s}{L_C}\right) i_{CPt}(n+1) + \frac{T_s}{L_c} (v_{INVt}^0(n+1) - v_{Pt}(n+1)) \quad (7.4)$$

การคำนวณค่ากระแสชดเชยในอนาคตของเวกเตอร์แอกทีฟและเวกเตอร์ศูนย์ ในสมการที่ (7.1) ถึง (7.4) ค่าดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับเทอมของค่าแรงดันของวงจรอินเวอร์เตอร์ใน

อนาคตรอบที่ $n+1$ ของเวกเตอร์แอกทีฟและเวกเตอร์ศูนย์ ($v_{INVm}^a(n+1)$, $v_{INVt}^a(n+1)$, $v_{INVm}^0(n+1)$, $v_{INVt}^0(n+1)$) โดยการคำนวณหาค่า $v_{INVm}^a(n+1)$ และ $v_{INVt}^a(n+1)$ สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ในแต่ละเฟสร่วมกับสถานะการสวิตช์ของเวกเตอร์แอกทีฟตามรูปแบบการสวิตช์ แสดงได้ดังสมการที่ (7.5) และ (7.6) ตามลำดับ นอกจากนี้ การคำนวณหาค่า $v_{INVm}^0(n+1)$ และ $v_{INVt}^0(n+1)$ จะพิจารณาร่วมกับสถานะการสวิตช์ของเวกเตอร์ศูนย์ตามรูปแบบการสวิตช์ แสดงได้ดังสมการที่ (7.7) และ (7.8) ตามลำดับ

$$v_{INVm}^a(n+1) = d_m^a (S_{1m}^a - S_{2m}^a) \times V_{DC}(n) \quad (7.5)$$

$$v_{INVt}^a(n+1) = d_t^a (S_{1t}^a - S_{2t}^a) \times V_{DC}(n) \quad (7.6)$$

$$v_{INVm}^0(n+1) = d_m^0 (S_{1m}^0 - S_{2m}^0) \times V_{DC}(n) \quad (7.7)$$

$$v_{INVt}^0(n+1) = d_t^0 (S_{1t}^0 - S_{2t}^0) \times V_{DC}(n) \quad (7.8)$$

จากการพิจารณารูปแบบการสวิตช์ในรูปที่ 7.3 พบว่า ในกรณีเวกเตอร์ศูนย์มีรูปแบบการ on (1) และ off (0) ของสวิตช์ไอจีบีที ($S_{1(m,t)}^0, S_{2(m,t)}^0$) คือ 0,0 และ 1,1 เมื่อแทนค่าดังกล่าวลงในสมการที่ (7.7) และ (7.8) ปรากฏว่า แรงดัน $v_{INVm}^0(n+1)$ และ $v_{INVt}^0(n+1)$ มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นสามารถคำนวณกระแส $i_{CPm}^0(n+2)$ และ $i_{CPt}^0(n+2)$ ได้ใหม่ดังสมการที่ (7.9) และ (7.10) ตามลำดับ

$$i_{CPm}^0(n+2) = \left(1 - \frac{R_C T_s}{L_C}\right) i_{CPm}(n+1) - \frac{T_s}{L_C} v_{Pm}(n+1) \quad (7.9)$$

$$i_{CPt}^0(n+2) = \left(1 - \frac{R_C T_s}{L_C}\right) i_{CPt}(n+1) - \frac{T_s}{L_C} v_{Pt}(n+1) \quad (7.10)$$

ในส่วนของคุณค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ทางด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส m และเฟส t ในอนาคตรอบที่ $n+1$ ($v_{Pm}(n+1)$, $v_{Pt}(n+1)$) สามารถพิจารณาได้ในลักษณะเดียวกับการทำนาย

กระแสอ้างอิง โดยการใช้วิธีลากรานจ์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (7.11) โดยมีสัมประสิทธิ์ของลากรานจ์แต่ละอันดับในกรณีการทำนายในรอบที่ $n+1$ แสดงได้ในตารางที่ 7.1 (M. Odavic et al., 2010) งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้สมการลากรานจ์อันดับที่หนึ่งสำหรับการคำนวณแรงดัน $v_{Pm}(n+1)$ และ $v_{Pt}(n+1)$ เนื่องจากต้องการลดความซับซ้อนในการคำนวณ และสมการลากรานจ์อันดับที่หนึ่งมีความเพียงพอสำหรับการทำนายค่าแรงดันดังกล่าวสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้นแรงดัน $v_{Pm}(n+1)$ และ $v_{Pt}(n+1)$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7.12) และ (7.13) ตามลำดับ

$$v_{P(m,t)}(n+1) = a_0 v_{P(m,t)}(n) + a_1 v_{P(m,t)}(n-1) + \dots + a_x v_{P(m,t)}(n-x) \quad (7.11)$$

โดยที่ a_0 จนถึง a_x คือ สัมประสิทธิ์ของลากรานจ์ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.1
 x คือ อันดับของลากรานจ์

ตารางที่ 7.1 สัมประสิทธิ์ของลากรานจ์แต่ละอันดับในกรณีการทำนายในรอบที่ $n+1$

x	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
1	2	-1	0	0	0	0
2	3	-3	1	0	0	0
3	4	-6	4	-1	0	0
4	5	-10	10	-5	1	0
5	6	-15	20	-15	6	-1

$$v_{Pm}(n+1) = 2v_{Pm}(n) - v_{Pm}(n-1) \quad (7.12)$$

$$v_{Pt}(n+1) = 2v_{Pt}(n) - v_{Pt}(n-1) \quad (7.13)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ (7.1) และ (7.9) สามารถคำนวณค่ากระแส $i_{CPm}^a(n+2)$ ในรูปของกระแส $i_{CPm}^0(n+2)$ ได้ดังสมการที่ (7.14) และในทำนองเดียวกันความสัมพันธ์จากสมการที่ (7.2) และ (7.10) สามารถคำนวณค่ากระแส $i_{CPT}^a(n+2)$ ในรูปของกระแส $i_{CPT}^0(n+2)$ ได้ดังสมการที่ (7.15)

$$i_{CPm}^a(n+2) = i_{CPm}^0(n+2) + \frac{T_s}{L_c} v_{INVm}^a(n+1) \quad (7.14)$$

$$i_{CPt}^a(n+2) = i_{CPt}^0(n+2) + \frac{T_s}{L_c} v_{INVt}^a(n+1) \quad (7.15)$$

7.2.3 การคำนวณช่วงเวลาการสวิตช์

สัญญาณการสวิตช์ในหนึ่งช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตจะมีค่าไม่คงตัว เนื่องจากการพิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของเวกเตอร์แอกทีฟ ($d_{(m,t)}^a$) และเวกเตอร์ศูนย์ ($d_{(m,t)}^0$) ตามรูปแบบการสวิตช์ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 7.3 โดยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้รูปแบบการควบคุมแบบเดดบิต (Dead Beat Control: DBC) สำหรับการคำนวณค่าวัฏจักรหน้าที่ของเวกเตอร์แอกทีฟและเวกเตอร์ศูนย์ (Y. Shen, 2016) ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการทำนายแรงดันอ้างอิงของวงจรรองกำลังอินเวอร์เตอร์ในรอบที่ $n+1$ ของเฟส m และเฟส t ($v_{INVm}^*(n+1)$, $v_{INVt}^*(n+1)$) ซึ่งกำหนดให้ค่าทั้งสองเป็นค่าแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟ สำหรับการควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง การคำนวณค่าดังกล่าว เริ่มต้นจากการพิจารณาแบบจำลองไม่ต่อเนื่องของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ดังสมการที่ (6.10) และ (6.11) (รายละเอียดที่มาของสมการได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.2.2) จากนั้นทำการทำนายแรงดันอ้างอิง $v_{INVm}^*(n+1)$ และ $v_{INVt}^*(n+1)$ ตามวัตถุประสงค์การควบคุมที่ต้องการให้กระแสชดเชยในอนาคตรอบที่ $n+2$ ($i_{CPm}(n+2)$, $i_{CPt}(n+2)$) มีค่าเป็นไปตามกระแสอ้างอิงในอนาคตรอบที่ $n+2$ ($i_{CPm}^*(n+2)$, $i_{CPt}^*(n+2)$) โดยพิจารณากระแสชดเชยในอนาคตของเวกเตอร์ศูนย์ $i_{CPm}^0(n+2)$ และ $i_{CPt}^0(n+2)$ เนื่องจากค่าดังกล่าวไม่มีเทอมของแรงดันอินเวอร์เตอร์ปรากฏอยู่ดังที่แสดงในสมการที่ (7.9) และ (7.10) ตามลำดับ ดังนั้น สมการแรงดัน $v_{INVm}^*(n+1)$ และ $v_{INVt}^*(n+1)$ แสดงได้ดังสมการที่ (7.16) และ (7.17) ตามลำดับ

$$v_{INVm}^*(n+1) = \frac{L_c}{T_s} (i_{CPm}^0(n+2) - i_{CPm}^*(n+2)) + R_c i_{CPm}(n+1) + v_{Pm}(n+1) \quad (7.16)$$

$$v_{INVt}^*(n+1) = \frac{L_c}{T_s} (i_{CPt}^0(n+2) - i_{CPt}^*(n+2)) + R_c i_{CPt}(n+1) + v_{Pt}(n+1) \quad (7.17)$$

นำสมการกระแส $i_{CPm}^0(n+2)$ และ $i_{CPt}^0(n+2)$ ในสมการที่ (7.9) และ (7.10) แทนลงในสมการที่ (7.16) และ (7.17) ตามลำดับ จะสามารถจัดรูปแรงดัน $v_{INVm}^*(n+1)$ และ $v_{INVt}^*(n+1)$ ได้ใหม่ดังสมการที่ (7.18) และ (7.19) ตามลำดับ

$$v_{INVm}^*(n+1) = \frac{L_C}{T_s} (i_{CPm}(n+1) - i_{CPm}^*(n+2)) \quad (7.18)$$

$$v_{INVt}^*(n+1) = \frac{L_C}{T_s} (i_{Cpt}(n+1) - i_{Cpt}^*(n+2)) \quad (7.19)$$

เมื่อได้ค่าแรงดัน $v_{INVm}^*(n+1)$ และ $v_{INVt}^*(n+1)$ สามารถคำนวณค่าวัฏจักรหน้าที่ของเวกเตอร์แอกทีฟเฟส m และ เฟส t (d_m^a, d_t^a) เพื่อกำหนดช่วงเวลาการสวิตช์ของเวกเตอร์แอกทีฟ ($\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$) ตามรูปแบบการสวิตช์ ดังสมการที่ (7.20) และ (7.21) ตามลำดับ ในส่วนค่าวัฏจักรหน้าที่ของเวกเตอร์ศูนย์เฟส m และ เฟส t (d_m^0, d_t^0) สามารถพิจารณาได้จากผลรวมค่าวัฏจักรหน้าที่ของการสวิตช์มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น ค่าวัฏจักรหน้าที่ d_m^0 และ d_t^0 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7.22) และ (7.23) ตามลำดับ

$$d_m^a = \frac{v_{INVm}^*(n+1)}{(S_{1m}^a - S_{2m}^a) \times V_{DC}(n)} \quad (7.20)$$

$$d_t^a = \frac{v_{INVt}^*(n+1)}{(S_{1t}^a - S_{2t}^a) \times V_{DC}(n)} \quad (7.21)$$

$$d_m^0 = 1 - d_m^a \quad (7.22)$$

$$d_t^0 = 1 - d_t^a \quad (7.23)$$

7.2.4 การหาฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุดสำหรับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต

การคำนวณฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุดสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีวัตถุประสงค์เพื่อให้กระแสชดเชยมีค่าใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิง ดังนั้น ฟังก์ชันต้นทุนสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างกระแสอ้างอิงกำลังสองและกระแสชดเชยกำลังสองของเฟส m และเฟส t ในอนาคตรอบที่ $n+2$ ซึ่งการคำนวณกระแสชดเชยในอนาคตของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ประกอบไปด้วย กระแสชดเชยในอนาคตของเวกเตอร์แอกทีฟ และกระแสชดเชยในอนาคตของเวกเตอร์ศูนย์ ดังนั้น การคำนวณค่าฟังก์ชันต้นทุนจึงประกอบด้วยฟังก์ชันต้นทุนของเวกเตอร์แอกทีฟ

เฟส m และเฟส t (g_m^a, g_t^a) แสดงได้ดังสมการที่ (7.24) และ (7.25) ตามลำดับ และฟังก์ชันต้นทุนของเวกเตอร์ศูนย์เฟส m และเฟส t (g_m^0, g_t^0) (g_m^a, g_t^a) แสดงได้ดังสมการที่ (7.26) และ (7.27) ตามลำดับ การพิจารณาฟังก์ชันต้นทุนของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตของเฟส m และเฟส t (g_{M^2PCm}, g_{M^2PCt}) จะต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันต้นทุนและค่าวัฏจักรหน้าที่ของเวกเตอร์แอกทีฟและเวกเตอร์ศูนย์ เนื่องจากค่าดังกล่าวมีผลต่อช่วงเวลาการสวิตช์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ แสดงได้ดังสมการที่ (7.28) และ (7.29) ตามลำดับ

$$g_m^a = \left| i_{CPm}^{*2}(n+2) - i_{CPm}^{a2}(n+2) \right| \quad (7.24)$$

$$g_t^a = \left| i_{Cpt}^{*2}(n+2) - i_{Cpt}^{a2}(n+2) \right| \quad (7.25)$$

$$g_m^0 = \left| i_{CPm}^{*2}(n+2) - i_{CPm}^{02}(n+2) \right| \quad (7.26)$$

$$g_t^0 = \left| i_{Cpt}^{*2}(n+2) - i_{Cpt}^{02}(n+2) \right| \quad (7.27)$$

$$g_{M^2PCm} = d_m^0 g_m^0 + d_m^a g_m^a \quad (7.28)$$

$$g_{M^2PCt} = d_t^0 g_t^0 + d_t^a g_t^a \quad (7.29)$$

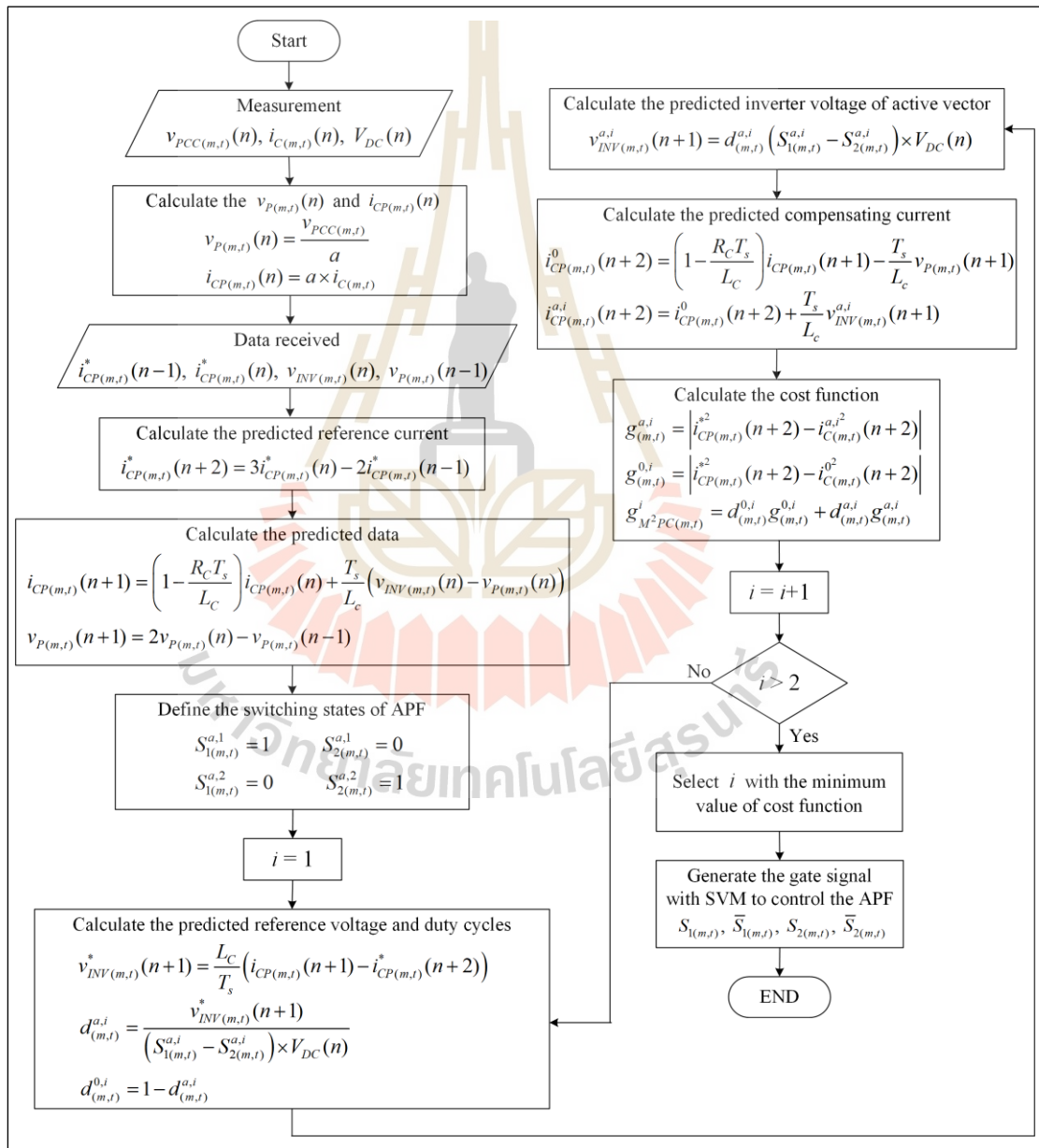
การคำนวณฟังก์ชันต้นทุน ($g_{M^2PC(m,t)}$) ในหนึ่งช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างจะทำการ

คำนวณตามจำนวนเซกเตอร์ของการสร้างสัญญาณการสวิตช์ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลเตอร์ โดยใช้ค่าฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุดเป็นค่าอ้างอิงสำหรับเลือกเซกเตอร์ตามรูปแบบการสวิตช์ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.3 เพื่อเป็นรูปแบบในการสร้างสัญญาณการสวิตช์ โดยมีการคำนวณช่วงเวลาการ on และ off ของสัญญาณการสวิตช์โดยใช้ค่าวัฏจักรหน้าที่ $d_{(m,t)}^a$ และ $d_{(m,t)}^0$ แผนภาพกระบวนการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต แสดงได้ดังรูปที่ 7.5 กระบวนการควบคุมกระแสชดเชยจากรูปดังกล่าวสามารถอธิบายลำดับขั้นตอนการคำนวณได้ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 วัดค่าทางไฟฟ้าในรอบปัจจุบันประกอบไปด้วย กระแส $i_{C(m,t)}(n)$ แรงดัน $v_{PCC(m,t)}(n)$ และแรงดัน $V_{DC}(n)$ จากนั้นทำการคำนวณค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้ เพื่อให้ค่าดังกล่าว

อ้างอิงทางด้านวงจกรองกำลังแอกทีฟ ($i_{CP(m,t)}(n)$, $v_{P(m,t)}(n)$) โดยใช้ความสัมพันธ์ของหม้อแปลงเชิงเส้น

ขั้นที่ 2 รับค่ากระแสอ้างอิงจากการคำนวณด้วยวิธีการตรวจจับเชิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ ($i_{CP(m,t)}^*(n)$) จากนั้นทำการคำนวณค่าดังกล่าวโดยใช้ความสัมพันธ์ของหม้อแปลงเชิงเส้นเพื่อให้ได้กระแสอ้างอิงทางด้านวงจกรองกำลังแอกทีฟ ($i_{CP(m,t)}^*(n)$) นอกจากนี้ ยังทำการรับค่าแรงดัน $v_{INV(m,t)}(n)$ และ $v_{P(m,t)}(n-1)$



รูปที่ 7.5 แผนภาพการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม M²PC ในหนึ่งช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง

ขั้นที่ 3 คำนวณกระแส $i_{CP(m,t)}^*(n+2)$ ด้วยวิธีลากรางจ์ดังสมการที่ (6.2) และ (6.3) จากนั้นทำการทำนายกระแส $i_{CP(m,t)}(n+1)$ โดยใช้สมการที่ (6.8) และ (6.9) นอกจากนี้ ในขั้นนี้มีการคำนวณแรงดัน $v_{P(m,t)}(n+1)$ ด้วยวิธีลากรางจ์ตามสมการที่ (7.12) และ (7.13)

ขั้นที่ 4 เริ่มต้นพิจารณาเซกเตอร์ของสถานะการสวิตช์ที่ i เท่ากับ 1 จากนั้นทำการคำนวณค่าทางไฟฟ้าตามเซกเตอร์ของสถานะการสวิตช์ i นั้น ๆ โดยเริ่มจากการคำนวณแรงดันอ้างอิง $v_{INV(m,t)}^*(n+1)$ ตามสมการที่ (7.18) และ (7.19) จากนั้นคำนวณค่าวัฏจักรหน้าที่ของเวกเตอร์แอกทีฟ ($d_{(m,t)}^{a,i}$) และเวกเตอร์ศูนย์ ($d_{(m,t)}^{0,i}$) เพื่อกำหนดช่วงเวลาการ on และ off ของการสวิตช์ในช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง ดังสมการที่ (7.20) ถึง (7.23) ตามลำดับ ค่าวัฏจักรหน้าที่ $d_{(m,t)}^{a,i}$ ที่ได้จากสมการข้างต้นถูกใช้สำหรับการคำนวณแรงดันอินเวอร์เตอร์ของแอกทีฟเวกเตอร์ $v_{INV(m,t)}^{a,i}(n+1)$ ดังสมการที่ (7.11) และ (7.12) ตามลำดับ

ขั้นที่ 5 คำนวณกระแสชดเชยของเวกเตอร์ศูนย์ $i_{CP(m,t)}^{0,i}(n+2)$ ด้วยสมการที่ (7.9) และ (7.10) จากนั้นทำการคำนวณกระแสชดเชยของแอกทีฟ $i_{CP(m,t)}^{a,i}(n+2)$ โดยใช้สมการที่ (7.14) และ (7.15)

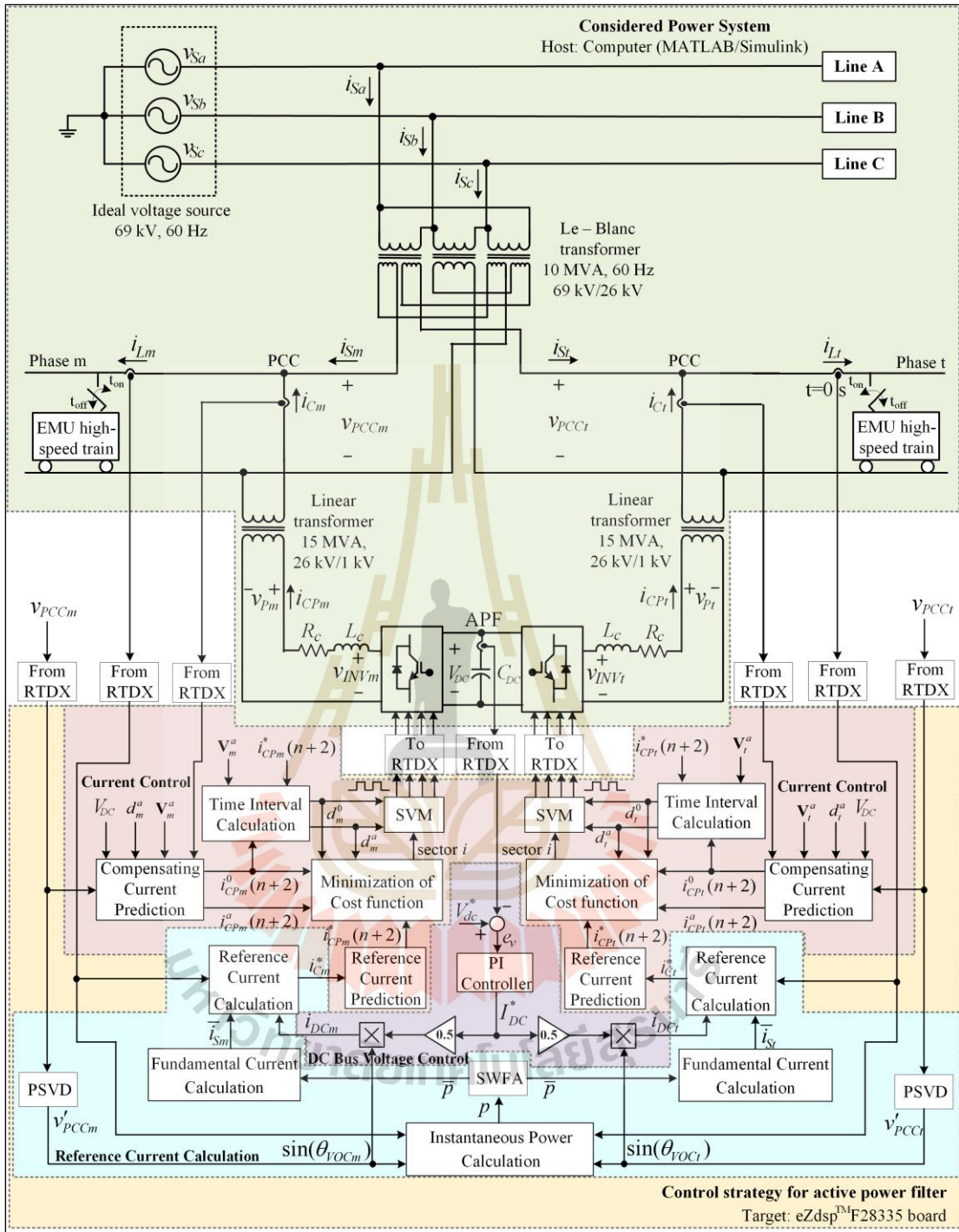
ขั้นที่ 6 คำนวณค่าฟังก์ชันต้นทุนตามเซกเตอร์ของสถานะการสวิตช์ i โดยการคำนวณจะแยกการพิจารณาออกเป็นฟังก์ชันต้นทุนของแอกทีฟ ($g_{(m,t)}^{a,i}$) และฟังก์ชันต้นทุนของเวกเตอร์ศูนย์ ($g_{(m,t)}^{0,i}$) ดังสมการที่ (7.24) ถึง (7.27) จากนั้นทำการคำนวณฟังก์ชันต้นทุน $g_{M^2PC(m,t)}^i$ โดยใช้สมการที่ (7.28) และ (7.29)

ขั้นที่ 7 วนรอบการคำนวณในขั้นตอนที่ 4 ถึง 6 จนครบจำนวนเซกเตอร์ของสถานะการสวิตช์ที่ i เท่ากับ 2

ขั้นที่ 8 เลือกเซกเตอร์ของสถานะการสวิตช์ i ที่มีค่าฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุด พร้อมทั้งส่งค่าวัฏจักรหน้าที่ $d_{(m,t)}^a$ และ $d_{(m,t)}^0$ ของสถานะการสวิตช์ i ดังกล่าวเพื่อใช้อ้างอิงในการสร้างสัญญาณการสวิตช์ ($S_{1(m,t)}, \bar{S}_{1(m,t)}, S_{2(m,t)}, \bar{S}_{2(m,t)}$) ด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลเตอร์ สำหรับการควบคุมโวลิจีปีทีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อให้กระแสชดเชยมีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง

7.3 การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต

การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งประกอบด้วย การกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่ภาวะสมดุล สามารถแสดงได้ดังหัวข้อที่ 7.3.1 ถึง 7.3.3 โดยผลการทดสอบสมรรถนะดังกล่าวอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป เพื่อวัตถุประสงค์ในการทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ดังนั้น ในหัวข้อนี้ใช้



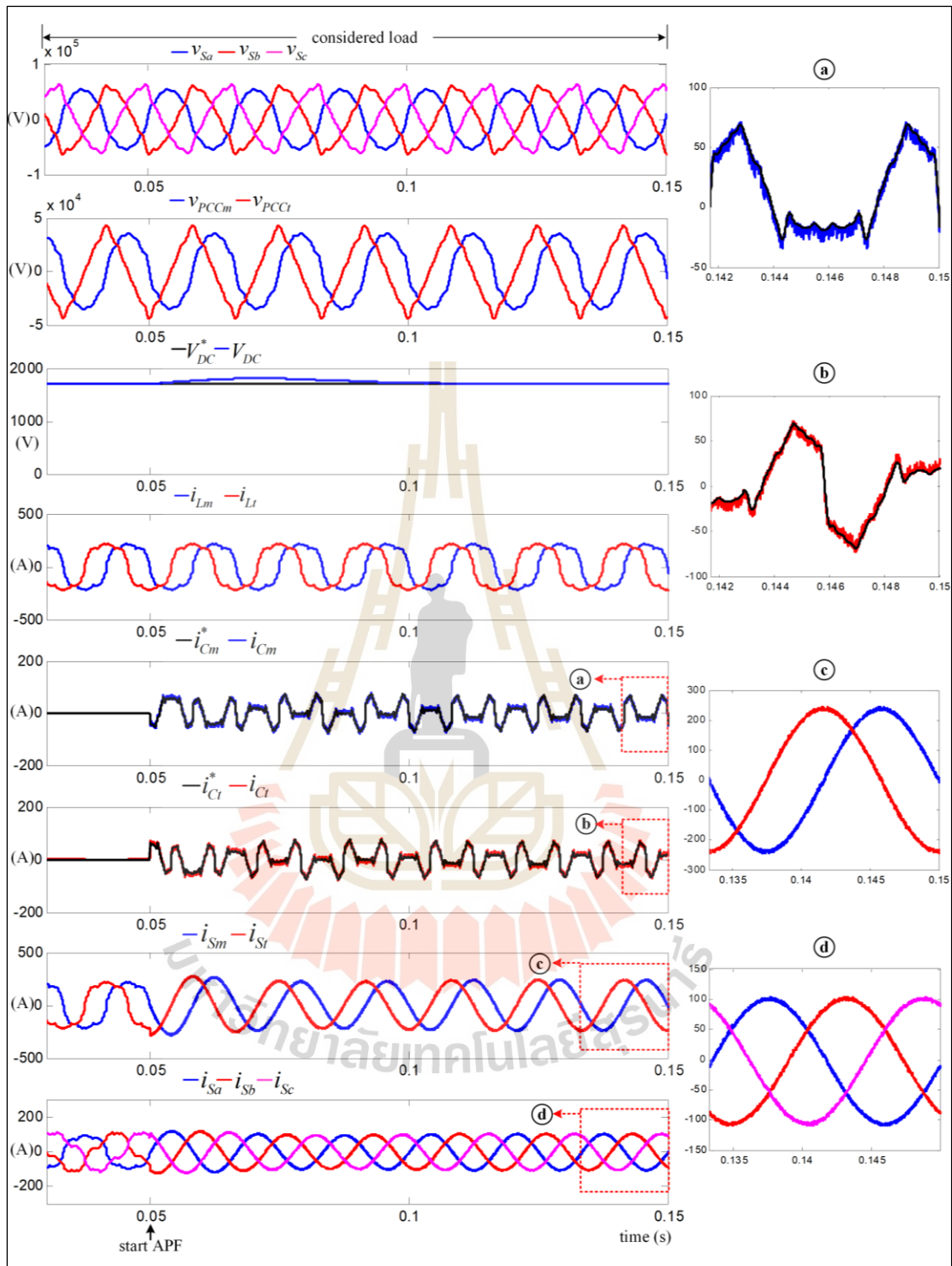
รูปที่ 7.6 โครงสร้างระบบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุม M²PC สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย

ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองในส่วนของระบบควบคุมกระแสชดเชย อย่างไรก็ตาม ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสำหรับวงจรรอกกำลังแยกที่พินหัวข้อนี้ยังคงใช้ตัวควบคุมพีไอ อีกทั้ง

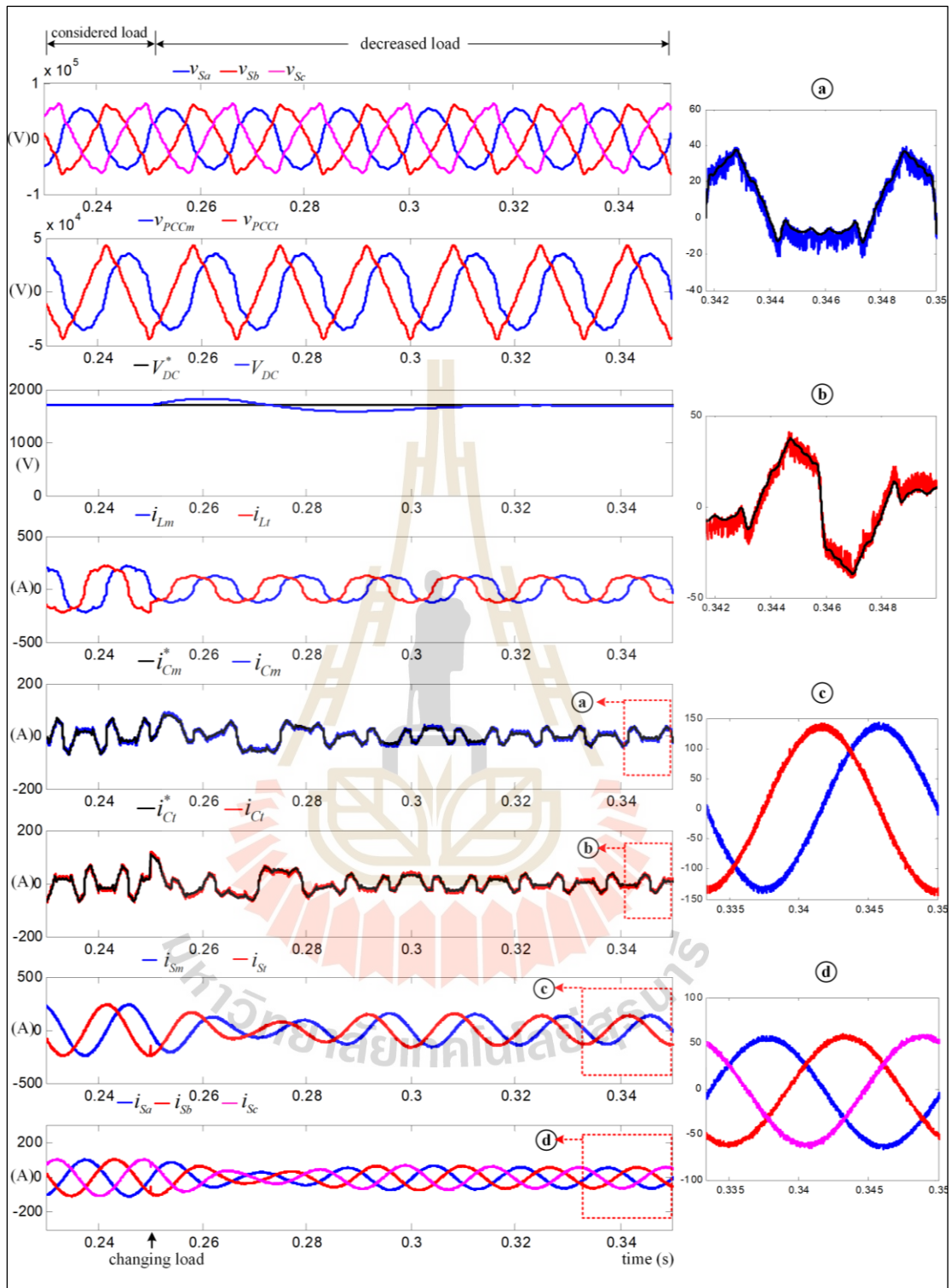
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟจะเป็นไปตามการออกแบบที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 โครงสร้างของระบบทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต แสดงได้ดังรูปที่ 7.6 ซึ่งได้ทำการทดสอบกับระบบโหลดสมดุล และโหลดไม่สมดุล เช่นเดียวกับการทดสอบในหัวข้อที่ 5.5.1 และ 5.5.2 ตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 เพื่อใช้สำหรับการยืนยันสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า และสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตกับระบบทดสอบที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานเพื่อให้สอดคล้องลักษณะการใช้งานโหลดรถไฟในระบบรางไฟฟ้าที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบผสมผสานอย่างทันทีทันใด

7.3.1 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M²PC กรณีโหลดสมดุล

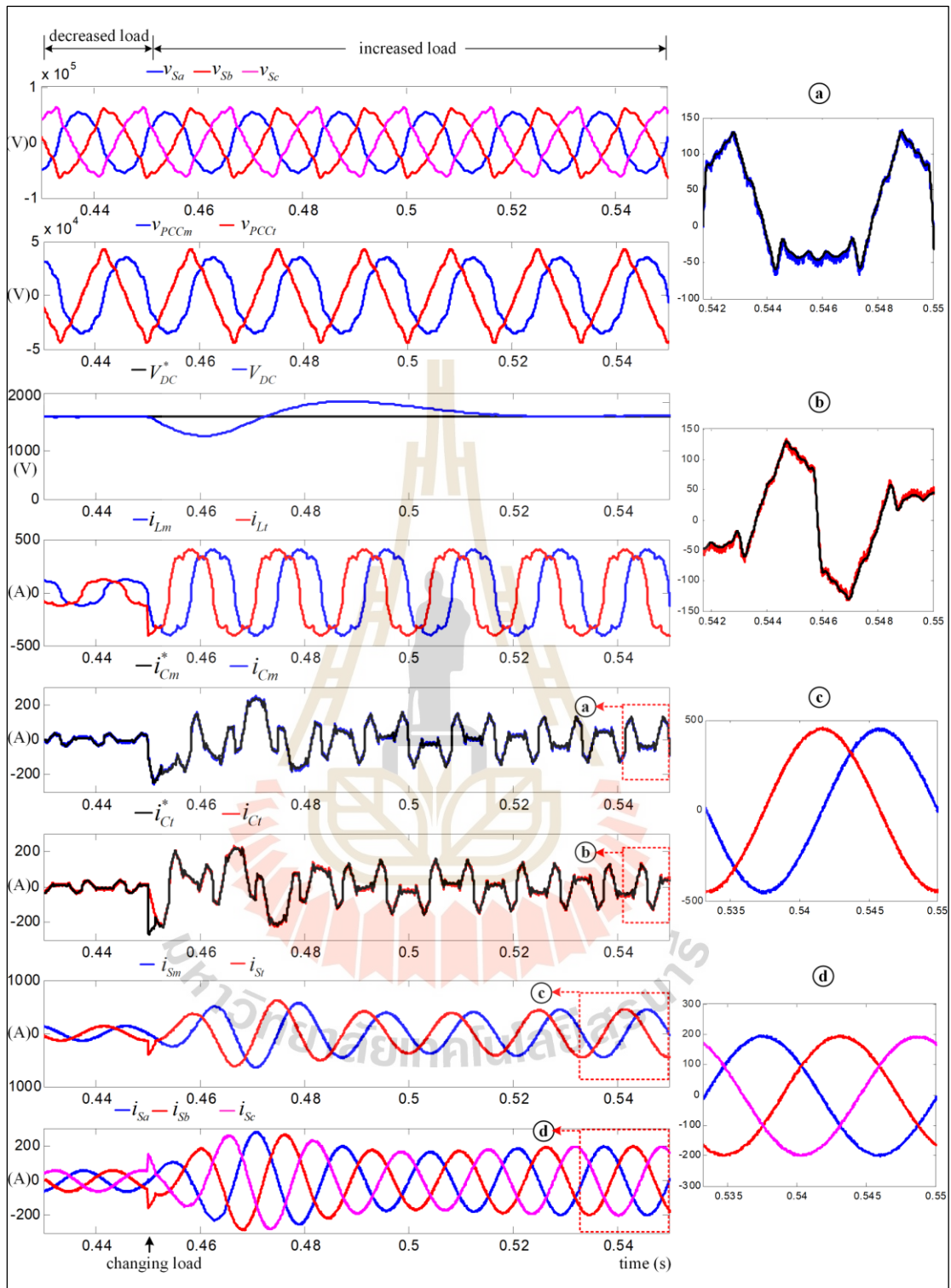
การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่พิจารณาในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ในการทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตสำหรับระบบที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (v_{sa} , v_{sb} , v_{sc}) มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า %THD_v เท่ากับ 10.3% และมีการใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้าแบบสมดุล (รายละเอียดของระบบรางไฟฟ้าสามารถศึกษาได้จากหัวข้อที่ 4.5.2) โดยมีค่าความถี่การสุ่มตัวอย่าง (sampling frequency) ของตัวควบคุมเท่ากับ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากรณีกระแสโหลดที่พิจารณา กรณีกระแสโหลดลดลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา และกรณีกระแสโหลดเพิ่มขึ้นจากกระแสโหลดที่พิจารณา สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.7 ถึง 7.9 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากรณีกระแสโหลดที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 7.7 พบว่า ก่อนการชดเชยในช่วงเวลา 0 ถึง 0.05 วินาที รูปสัญญาณ i_{sm} และ i_{st} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ เช่นเดียวกับรูปสัญญาณ i_{Lm} และ i_{Lt} ตามลำดับ ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า %THD_i ในแต่ละเฟส เกินกรอบของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ดังแสดงในตารางที่ 7.2 ภายหลังจากชดเชยตั้งแต่เวลา 0.05 วินาที พบว่า วงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตสามารถควบคุมกระแส i_{cm} และ i_{ct} ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแส i_{cm}^* และ i_{ct}^* ตามลำดับ ส่งผลให้เมื่อฉีดกระแส i_{cm} และ i_{ct} เข้าสู่จุด PCC ของระบบ รูปสัญญาณกระแส i_{sm} และ i_{st} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ ทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ตามไปด้วย โดยที่ค่า %THD_i ภายหลังจากชดเชย อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.2 นอกจากนี้ วงจรรองกำลังแอกทีฟดังกล่าวยังสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.976 เป็น 0.998 อีกด้วย



รูปที่ 7.7 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุม M²PC กรณีกระแสโหลดที่พิจารณา



รูปที่ 7.8 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุม M²PC กรณีกระแสโหลดลดลง



รูปที่ 7.9 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีกระแสโหลดเพิ่มขึ้น

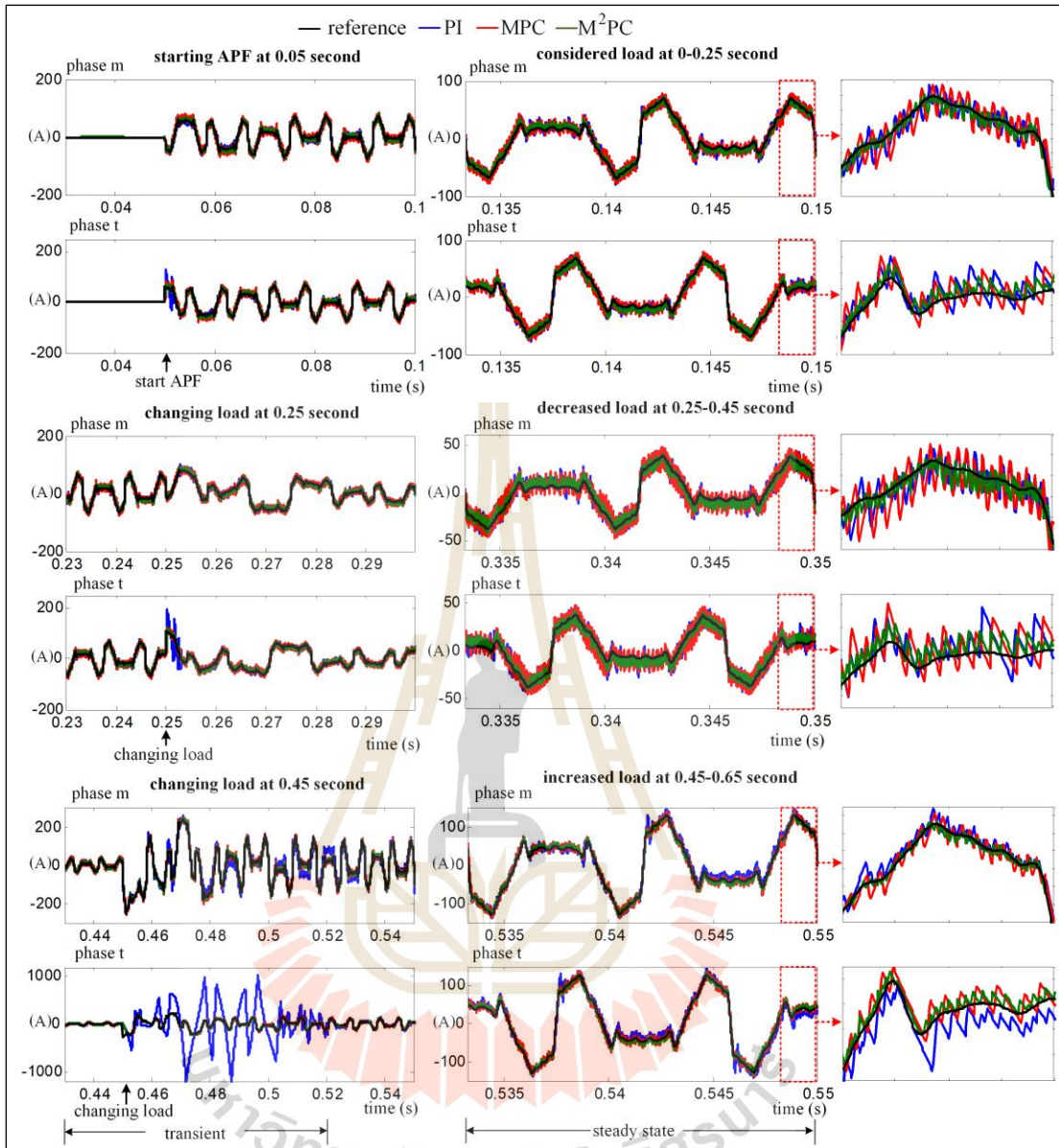
ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 7.8 เป็นกรณีกระแสโหลดลดลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา โดยมีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบทันทีทันใดที่เวลา 0.25 วินาที ซึ่งพบว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ให้มีลักษณะคล้ายตาม i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ตามลำดับ ได้ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว เป็นผลให้ภายหลังการชดเชยรูปสัญญาณกระแส $i_{Sm}, i_{St}, i_{Sa}, i_{Sb}$ และ i_{Sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_i$ ในแต่ละเฟสอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 แสดงได้ดังตารางที่ 7.2 นอกจากนี้ ระบบที่พิจารณามีการใช้งานโหลดสมดุล ส่งผลให้ $\%CUF$ ก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 0% และการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแยกที่ไปด้วยตัวควบคุมพีไอให้ผลการปรับปรุงค่า PF ที่ดีขึ้น โดยพิจารณาจากค่า PF ที่เพิ่มขึ้นภายหลังการชดเชย และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดเพิ่มขึ้นจากกระแสโหลดที่พิจารณาแบบทันทีทันใดที่เวลา 0.45 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7.9 พบว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตยังคงสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ได้แบบทันทีทันใดทั้งในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว ส่งผลให้รูปสัญญาณ i_{Sm} และ i_{St} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ อีกทั้งกระแส i_{Sa}, i_{Sb} และ i_{Sc} ยังมี

ตารางที่ 7.2 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดสมดุลระหว่างตัวควบคุม PI ตัวควบคุม MPC และตัวควบคุม M²PC

ประเภทของตัวควบคุมกระแส	สถานะของกระแสโหลด	$\%THD_i$ ด้านเฟสรวม		$\%THD_i$ ด้านสามเฟส			$\%CUF$	PF
		เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c		
		ก่อนการชดเชย						
ควบคุมกระแสชดเชย	พิจารณา	22.23	21.21	22.19	21.51	21.33	0.00	0.976
	ลดลง	21.35	19.58	21.25	20.09	19.17	0.00	0.974
	เพิ่มขึ้น	22.77	22.22	22.75	22.39	22.29	0.00	0.976
ภายหลังการชดเชย								
PI	พิจารณา	3.36	3.45	3.35	3.34	3.50	0.00	0.997
	ลดลง	5.52	5.86	5.49	5.65	5.83	0.00	0.991
	เพิ่มขึ้น	2.50	2.46	2.59	1.98	1.93	0.00	0.999
MPC	พิจารณา	3.38	3.40	3.37	3.33	3.45	0.00	0.997
	ลดลง	5.75	5.62	5.70	5.54	5.69	0.00	0.990
	เพิ่มขึ้น	2.14	2.32	2.45	2.34	2.36	0.00	0.999
M ² PC	พิจารณา	2.03	1.99	2.03	2.01	1.98	0.00	0.998
	ลดลง	3.33	3.43	3.32	3.37	3.41	0.00	0.992
	เพิ่มขึ้น	1.17	1.17	1.17	1.16	1.18	0.00	0.999

ลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_i$ อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 และมีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังที่ดีขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 7.2 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ พบว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดัน V_{DC} ให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดัน V_{DC}^* ถึงแม้ว่ากระแสไหลของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด แสดงได้ดังรูปที่ 7.7 ถึง 7.9 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตในสภาวะโหลดต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 7.2

การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.10 สังเกตได้ว่า ในช่วงสภาวะชั่วคราว ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตให้ผลตอบสนองของกระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Ci}) ในการติดตามกระแสอ้างอิง (i_{Cm}^* , i_{Ci}^*) ที่รวดเร็วเช่นเดียวกับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาการเพิ่มขึ้นของกระแสที่แหล่งจ่ายในสภาวะชั่วคราวจากการฉีดกระแสชดเชยที่ผิดพลาดไปจากกระแสอ้างอิงของตัวควบคุมพีไอ และเมื่อพิจารณาในสภาวะอยู่ตัว พบว่า กระแส i_{Cm} และ i_{Ci} จากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเกิดการกระเพื่อมของรูปสัญญาณน้อยกว่าการควบคุมกระแสชดเชยตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองในทุก ๆ สภาวะกระแสโหลดที่พิจารณา ซึ่งทำให้ตัวควบคุมแบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตให้ลักษณะรูปสัญญาณกระแส i_{Cm} และ i_{Ci} ที่ใกล้เคียงรูปสัญญาณกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ci}^* มากกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ดังนั้น การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตสามารถแก้ไขปัญหาการกระเพื่อมของรูปสัญญาณกระแส i_{Cm} และ i_{Ci} ที่เป็นผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายในแต่ละเฟสเกิดการกระเพื่อมของรูปสัญญาณตามไปด้วย ผลการลดการกระเพื่อมของกระแส i_{Cm} และ i_{Ci} จะทำให้ $\%THD_i$ มีค่าลดลงและอยู่ภายในข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ในทุก ๆ สภาวะกระแสโหลดที่พิจารณา แสดงได้ดังตารางที่ 7.2 จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตมีสมรรถนะในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง



รูปที่ 7.10 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างตัวควบคุมพีไอ
ตัวควบคุม MPC และตัวควบคุม M^2PC สำหรับระบบโหลดสมดุล

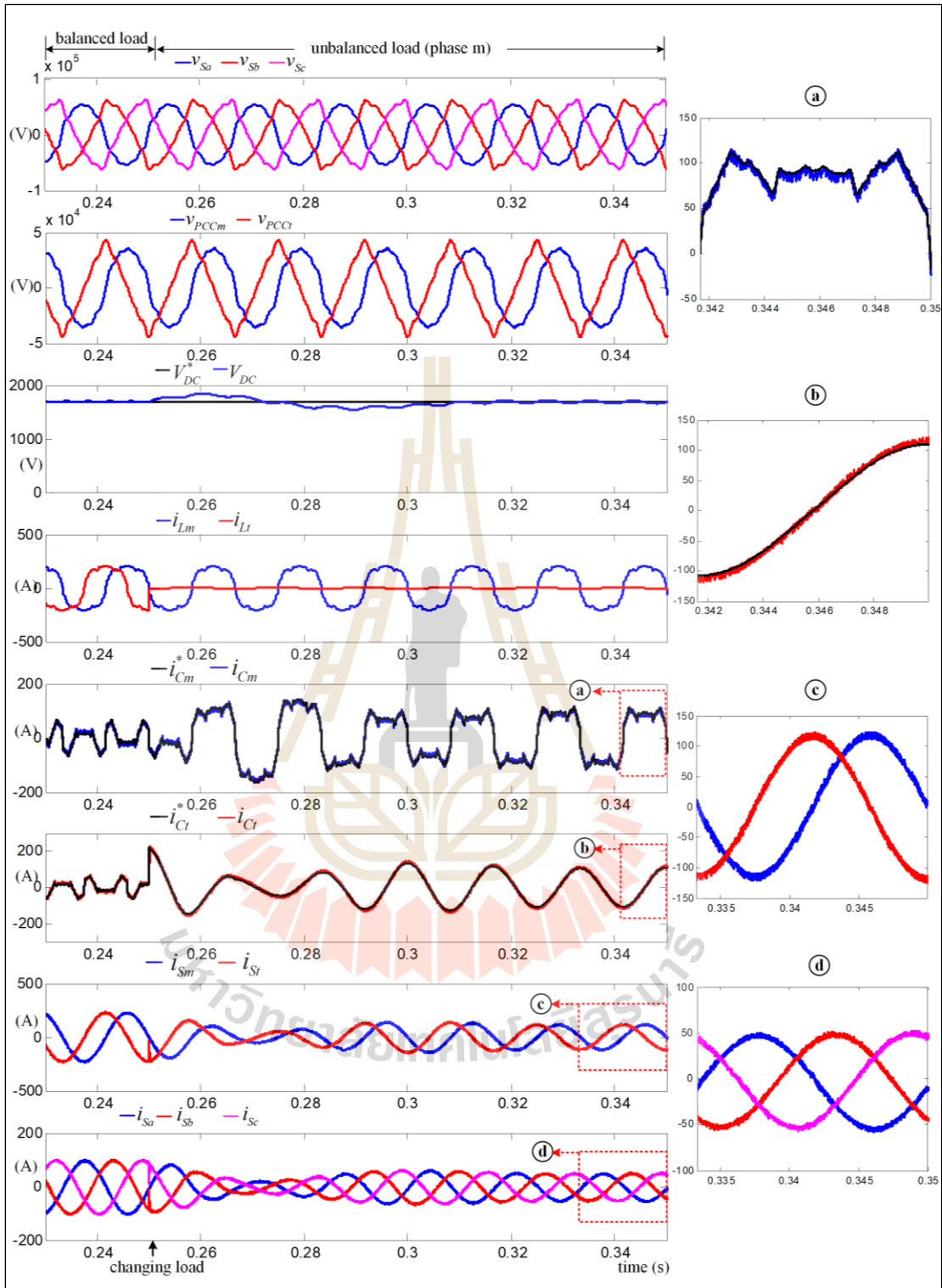
7.3.2 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีโหลดไม่สมดุล

การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุล เป็นระบบทดสอบที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (v_{sa} , v_{sb} , v_{sc}) มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์โดยมีค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 10.3% ทั้งสามเฟส ส่งผลให้รูปสัญญาณแรงดัน v_{PCCm} และ v_{PCCt} มีลักษณะผิดเพี้ยนตามไปด้วย ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบทดสอบกรณีโหลดสมดุล แต่กระแสโหลดในระบบ

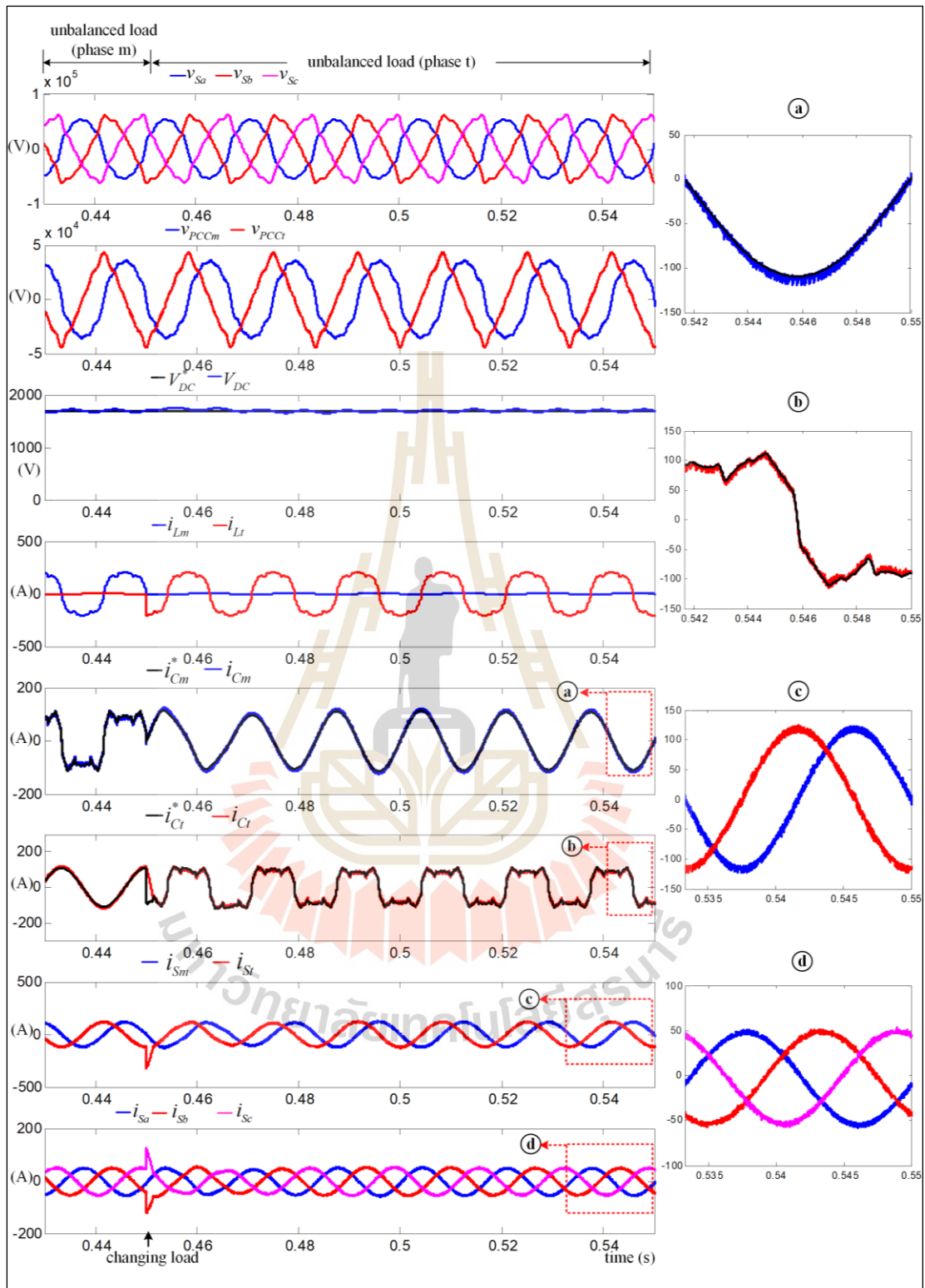
ทดสอบนี้จะแตกต่างออกไป โดยทำการพิจารณาลักษณะการจ่ายโหลดแบบไม่สมดุล ซึ่งบางช่วงของการทดสอบมีการการจ่ายโหลดตรงไฟฟ้าเฉพาะเฟส m หรือ เฟส t เพียงหนึ่งเฟสเท่านั้น การจ่ายโหลดในลักษณะนี้ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า (รายละเอียดของระบบทดสอบดังกล่าวได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.5.4) สำหรับโครงสร้างส่วนอื่น ๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบทดสอบกรณีโหลดสมดุลตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.6 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบทดสอบดังกล่าว กรณีโหลดสมดุล (กรณีกระแสโหลดที่พิจารณา) แสดงได้ดังรูปที่ 7.7 ในส่วนของกรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m และโหลดไม่สมดุลเฟส t แสดงได้ดังรูปที่ 7.11 และ 7.12 ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมพีโอ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.13

ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบที่จุดต่อร่วม ปรากฏว่า ทั้งกรณีกระแสโหลดสมดุล และกระแสโหลดไม่สมดุลเฟส m และเฟส t รูปสัญญาณกระแส i_{sm} และ i_s มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_i$ ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยในแต่ละเฟสมีค่าลดลงจากก่อนการชดเชย ซึ่งมีค่าอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ในทุกสภาวะการเปลี่ยนของกระแสโหลด ดังแสดงในตารางที่ 7.3 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ภายหลังการชดเชย พบว่า มีลักษณะสมดุล ส่งผลให้ค่า $\%CUF$ ภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงจากก่อนการชดเชยเป็นอย่างมาก จากดัชนีชี้วัดสมรรถนะดังกล่าว ให้ความหมายว่า รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} สามารถกลับมา มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์และอยู่ในสภาวะสมดุลได้ ผลการกำจัดฮาร์โมนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบความไม่สมดุลยังได้ช่วยปรับปรุงค่า PF ของระบบให้ดีขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จาก PF ที่เพิ่มขึ้นภายหลังการชดเชย นอกจากนี้ ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีโอสามารถควบคุมแรงดัน V_{DC} ให้มีค่าใกล้เคียงแรงดัน V_{DC}^* ตลอดทุกช่วงการทดสอบ ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าทั้งสามช่วงการทดสอบ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.3

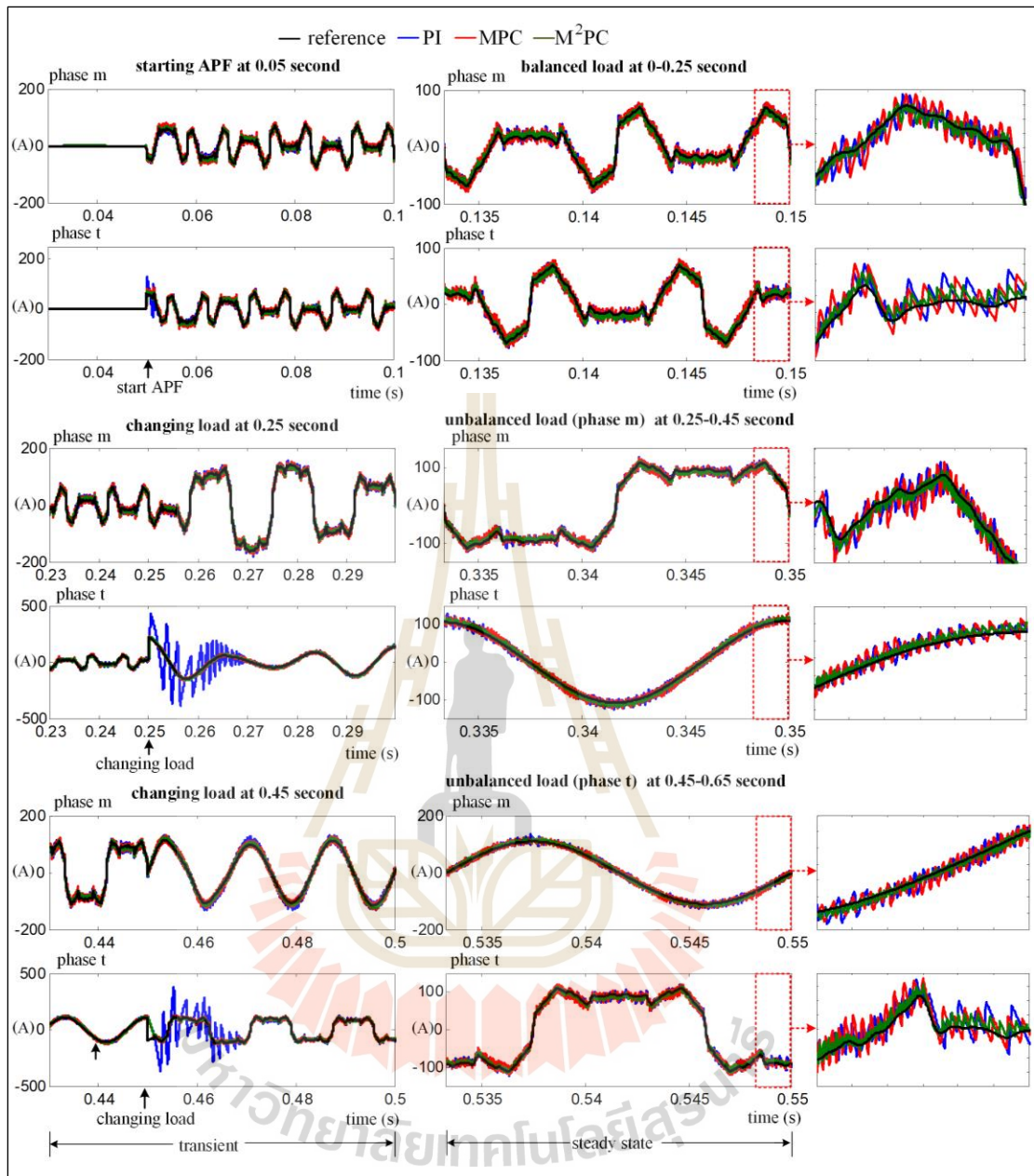
สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมพีโอ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ดังแสดงในรูปที่ 7.13 ผู้วิจัยได้นำเสนอประเด็นการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยออกเป็นสองประเด็น คือ สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยในสภาวะชั่วคราว และสภาวะคงอยู่ตัว จากผลการศึกษา พบว่า ในสภาวะชั่วคราว ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วเช่นเดียวกับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง พิจารณาได้จากตัวควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ให้มีลักษณะคล้อยตามกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ได้อย่างทันทีทันใดเมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลตอบสนองที่เร็วกว่าตัวควบคุมพีโอ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสภาวะอยู่ตัว พบว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ให้มีลักษณะคล้อยตามกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ได้ดีกว่าการใช้



รูปที่ 7.11 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m



รูปที่ 7.12 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุม M²PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t



รูปที่ 7.13 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุม MPC และตัวควบคุม M^2PC สำหรับระบบโหลดไม่สมดุล

งานตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง โดยพิจารณาได้จากรูปสัญญาณกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} จากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตมีการกระเพื่อมน้อยกว่ารูปสัญญาณกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ที่ได้จากตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง อีกทั้งยังสังเกตได้ว่า ผลจากการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบ

ทำนายที่ใช้แบบจำลอง โดยพิจารณาได้จาก $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยในแต่ละเฟสมีค่าน้อยกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง และ $\%THD_i$ ดังกล่าวยังมีค่าอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ในทุกสภาวะการเปลี่ยนของกระแสโหลด แสดงได้ดังตารางที่ 7.3 จากผลทดสอบข้างต้นชี้ให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตมีสมรรถนะในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบแรงไฟฟ้าที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง

ตารางที่ 7.3 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุล ระหว่างตัวควบคุม PI ตัวควบคุม MPC และตัวควบคุม M²PC

ประเภท ของ ตัว ควบคุม	สถานะของ กระแสโหลด	$\%THD_i$ ด้านเฟสรวม		$\%THD_i$ ด้านสามเฟส			$\%CUF$	PF
		เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c		
		ก่อนการชดเชย						
กระแส ชดเชย	สมดุล	22.23	21.21	22.19	21.51	21.33	0.00	0.976
	ไม่สมดุลเฟส m	22.22	0.00	22.17	20.52	24.14	95.45	0.694
	ไม่สมดุลเฟส t	0.00	21.19	8.04	21.85	20.46	95.45	0.703
ภายหลังการชดเชย								
PI	สมดุล	3.36	3.45	3.35	3.34	3.50	0.00	0.997
	ไม่สมดุลเฟส m	8.25	8.20	8.19	8.19	8.13	0.50	0.987
	ไม่สมดุลเฟส t	8.29	8.45	8.24	8.49	8.21	0.51	0.987
MPC	สมดุล	3.36	3.45	3.35	3.34	3.50	0.00	0.997
	ไม่สมดุลเฟส m	8.29	8.02	8.23	8.24	7.82	0.25	0.987
	ไม่สมดุลเฟส t	8.10	8.29	8.04	8.14	8.23	0.26	0.987
M ² PC	สมดุล	2.03	1.99	2.03	2.01	1.98	0.00	0.998
	ไม่สมดุลเฟส m	4.08	3.85	4.05	3.83	3.94	0.23	0.990
	ไม่สมดุลเฟส t	3.93	4.06	3.91	3.95	4.05	0.25	0.990

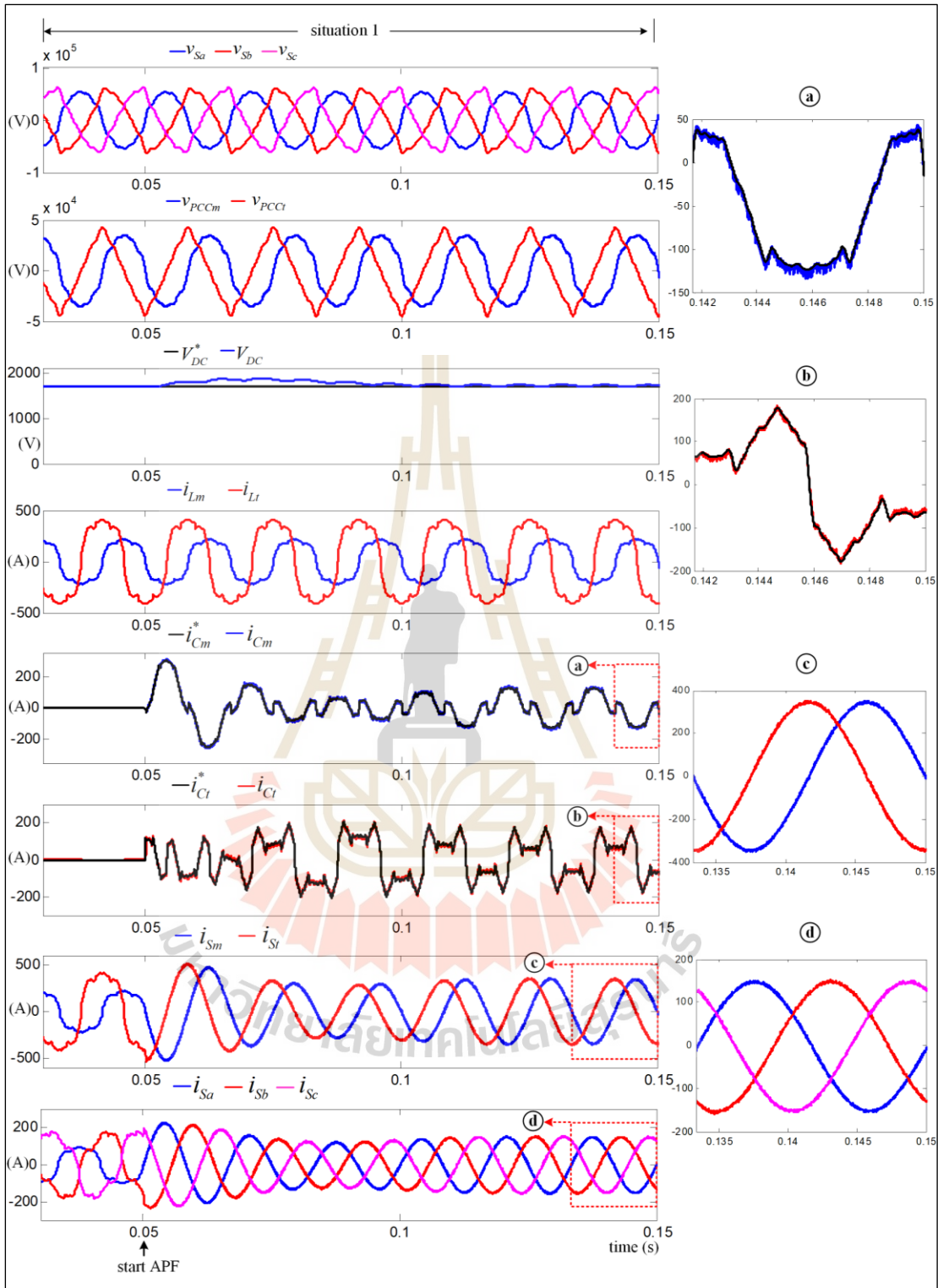
7.3.3 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M²PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสาน

ระบบทดสอบที่พิจารณาในหัวข้อนี้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดของระบบแรงไฟฟ้าแบบผสมผสาน เพื่อให้สอดคล้องลักษณะการใช้งานโหลดรถไฟฟ้าในระบบแรงไฟฟ้าที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบผสมผสานอย่างทันทีทันใด (L. Yu-quan, et al., 2011) โดยในระบบทดสอบดังกล่าวกำหนดให้ มีการจ่ายโหลดแบบผสมผสานแบ่งออกเป็นสามช่วง คือช่วงแรกเป็นเวลา 0 ถึง 0.25 วินาที มีการจ่ายโหลดเฟส m ด้วยกระแสโหลดที่พิจารณา (รายละเอียดของกระแสโหลดที่พิจารณาสามารถศึกษาได้บทที่ 3) และจ่ายโหลดเฟส t ที่มีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในแต่ละ

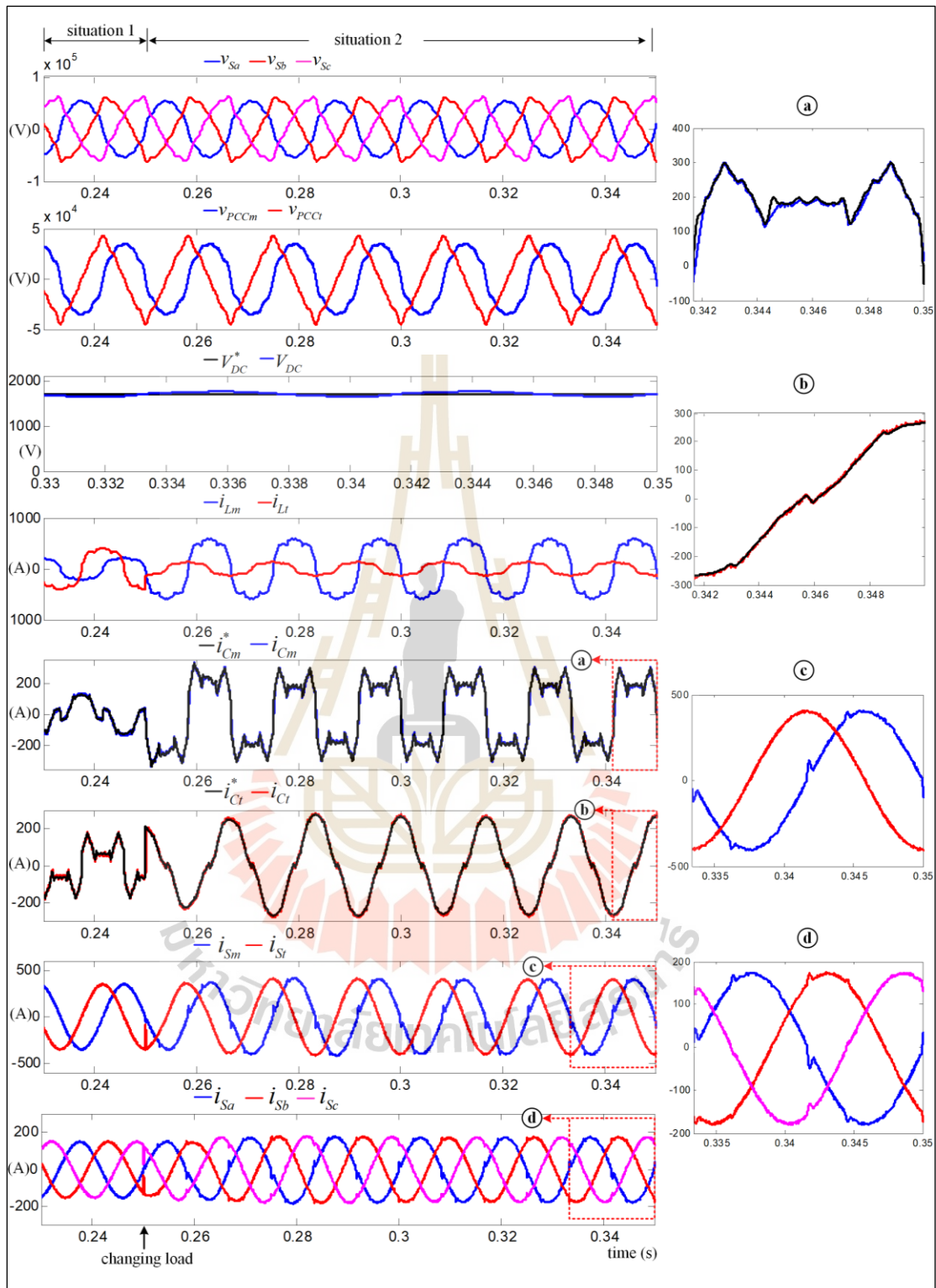
อันดับฮาร์มอนิกของกระแสไหลดที่พิจารณา สำหรับช่วงที่สองตั้งแต่เวลา 0.25 ถึง 0.45 วินาที ได้ทำการจ่ายโหลดเฟส m ที่มีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นเป็นสามเท่าในแต่ละอันดับฮาร์มอนิกของกระแสไหลดที่พิจารณาและจ่ายโหลดเฟส t ที่มีแอมพลิจูดลดลงครึ่งหนึ่งในแต่ละอันดับฮาร์มอนิกของกระแสไหลดที่พิจารณา และในช่วงสุดท้ายตั้งแต่เวลา 0.45 ถึง 0.65 วินาที มีการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส t ที่มีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นเป็นสามเท่าในแต่ละอันดับฮาร์มอนิกของกระแสไหลดที่พิจารณา สำหรับโครงสร้างส่วนอื่น ๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบทดสอบกรณีโหลดสมดุล และโหลดไม่สมดุลตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.6 ผลการทดสอบทั้งสามช่วงการจ่ายโหลดแสดงได้ดังรูปที่ 7.14 ถึง 7.16 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 7.16 สังเกตได้ว่า ก่อนการชดเชยในช่วงเวลา 0 วินาที ถึง 0.05 วินาที รูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ซึ่งเป็นผลมาจากรูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{St} ที่มีลักษณะผิดเพี้ยนตามการใช้งานโหลดของระบบแรงไฟฟ้า โดยมีค่า $\%THD_i$ สูงกว่าข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 แสดงได้ดังตารางที่ 7.4 อีกทั้ง รูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะไม่สมดุล เนื่องจากมีการใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงแบบไม่สมดุล ภายหลังจากฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบที่เวลา 0.05 วินาที ปรากฏว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตสามารถควบคุมกระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Ct}) ให้มีลักษณะคล้อยตามกระแสอ้างอิง (i_{Cm}^* , i_{Ct}^*) ได้แบบทันทีทันใดทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{St} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์และมีขนาดสมดุล จึงทำให้ รูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นและมีลักษณะสมดุล โดยมีค่า $\%THD_i$ และ $\%CUF$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังจากการชดเชยมีค่าลดลงจากก่อนการชดเชย และอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 แสดงได้ดังตารางที่ 7.4

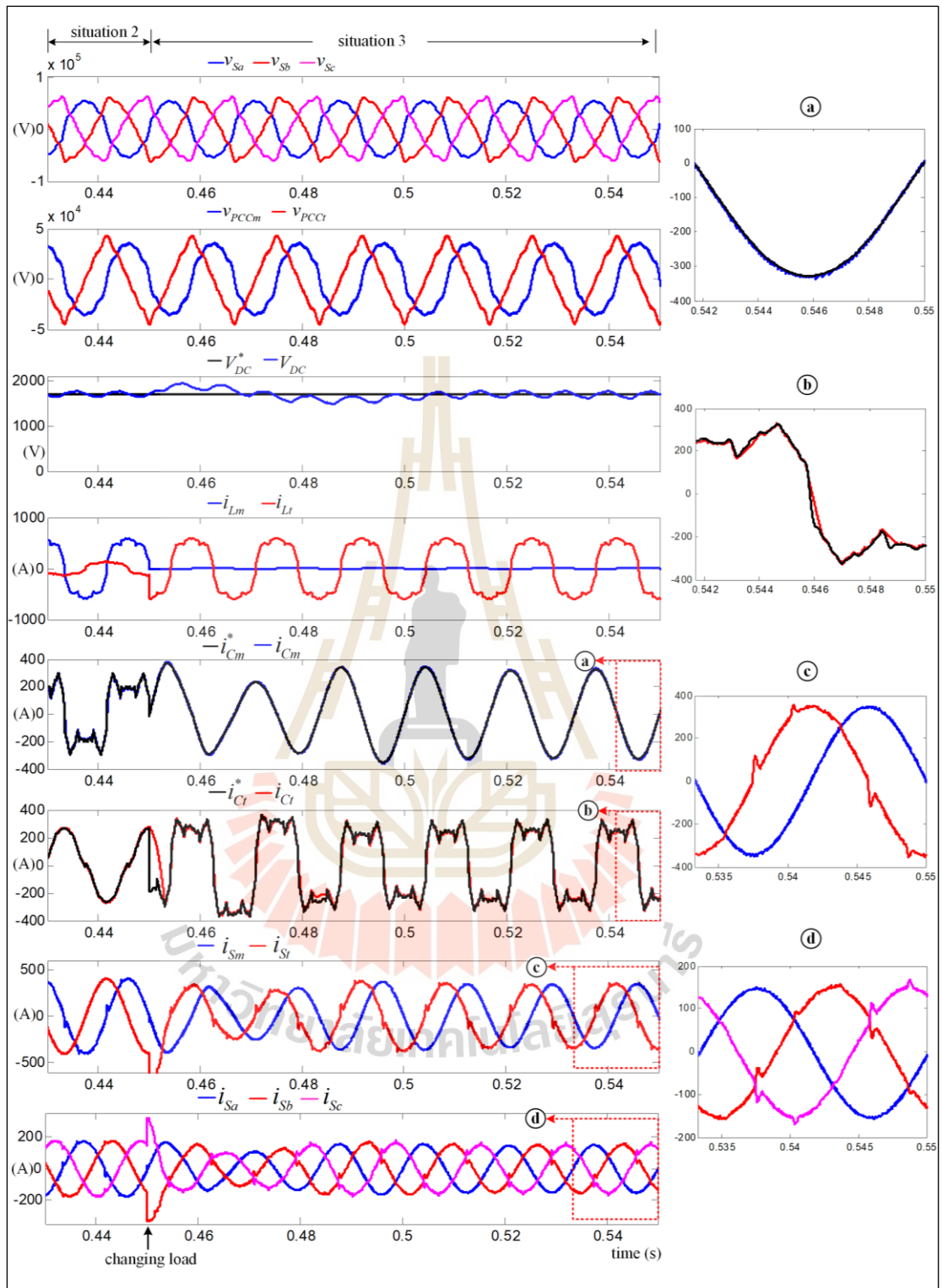
ผลการทดสอบในรูปที่ 7.15 เป็นการพิจารณาการจ่ายโหลดของระบบแรงไฟฟ้า ในช่วงที่สอง โดยมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไหลดแบบทันทีทันใดที่เวลา 0.25 วินาที สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ให้มีลักษณะคล้อยตามกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ได้แบบทันทีทันใดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไหลดทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว ทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} , i_{St} , i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย อีกทั้งผลการชดเชยดังกล่าวทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} กลับมาอยู่ในสภาวะสมดุล โดยสามารถแสดงค่า $\%THD_i$ และ $\%CUF$ ภายหลังจากการชดเชยได้ดังตารางที่ 7.4 นอกจากนี้ การฉีดกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟยังช่วยปรับปรุงค่า PF ของระบบให้มีค่าใกล้เคียงหนึ่งอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่า $\%THD_i$ ภายหลังจากการชดเชย พบว่า กระแสที่แหล่งจ่ายเฟส m และเฟส a มีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 เนื่องจากเมื่อกระแสไหลดของเฟส m (i_{Lm}) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสอ้างอิงมีช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งในช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตไม่สามารถควบคุมให้กระแสชดเชยของเฟส



รูปที่ 7.14 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานในช่วงที่ 1



รูปที่ 7.15 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานในช่วงที่ 2



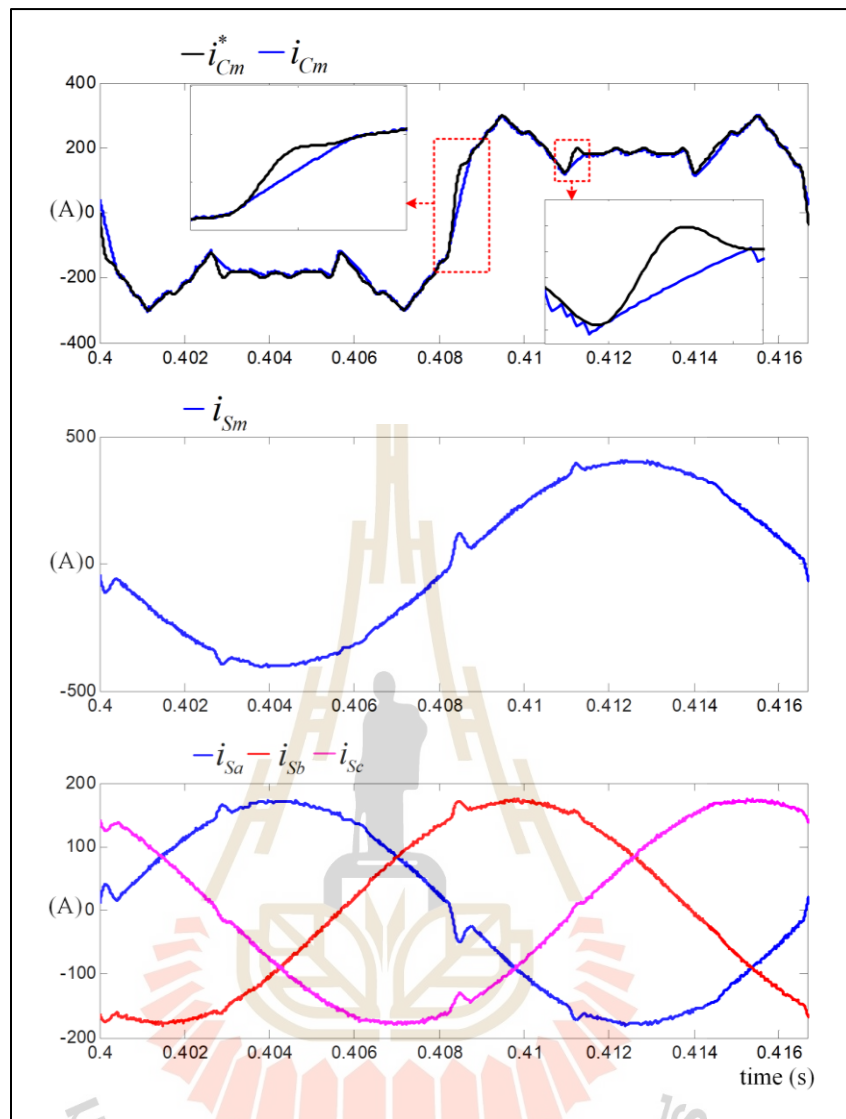
รูปที่ 7.16 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M²PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานในช่วงที่ 3

เฟส m มีลักษณะใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิงของเฟส m ส่งผลให้รูปสัญญาณ i_{sm} ในช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ซึ่งส่งผลให้ รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} ผิดเพี้ยนตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 7.17 เพื่อให้การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ามีสมรรถนะที่ดีขึ้นและอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 เมื่อกระแสโหลดมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณสูง ผู้วิจัยจึงนำประเด็นในส่วนนี้มาใช้สำหรับการพัฒนาระบบควบคุมกระแสชดเชยของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ 3 มีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบทันทีทันใดที่เวลา 0.45 วินาที โดยทำการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส t ที่ซึ่งมีแอมพลิจูดของกระแสโหลดเพิ่มขึ้นสามเท่าจากกระแสโหลดที่พิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 7.16 สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตสามารถควบคุมกระแส i_{cm} และ i_{ct} ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแส i_{cm}^* และ i_{ct}^* ได้แบบทันทีทันใด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลด ซึ่งบ่งบอกได้ว่า ตัวควบคุมดังกล่าวให้เป็นผลตอบสนองที่รวดเร็วในสภาวะชั่วคราว และเมื่อพิจารณาที่สภาวะอยู่ตัว พบว่า ภายหลังจากชดเชยรูปสัญญาณกระแส i_{sm} และ i_{st} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ตามไปด้วย อีกทั้งรูปสัญญาณกระแสดังกล่าว ยังมีลักษณะสมดุลอีกด้วย ส่งผลให้ค่า $\%THD_i$ และ $\%CUF$ ภายหลังจากชดเชยมีค่าลดลงจากก่อนการชดเชย แสดงได้ดังตารางที่ 7.4 แต่อย่างไรก็ตาม ค่า $\%THD_i$ ภายหลังจากชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายเฟส t มีค่าเท่ากับ 7.10% ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสโหลดของเฟส t (i_{Lt}) ส่งผลให้กระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นในช่วงซึ่งในช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตไม่

ตารางที่ 7.4 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M²PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสาน

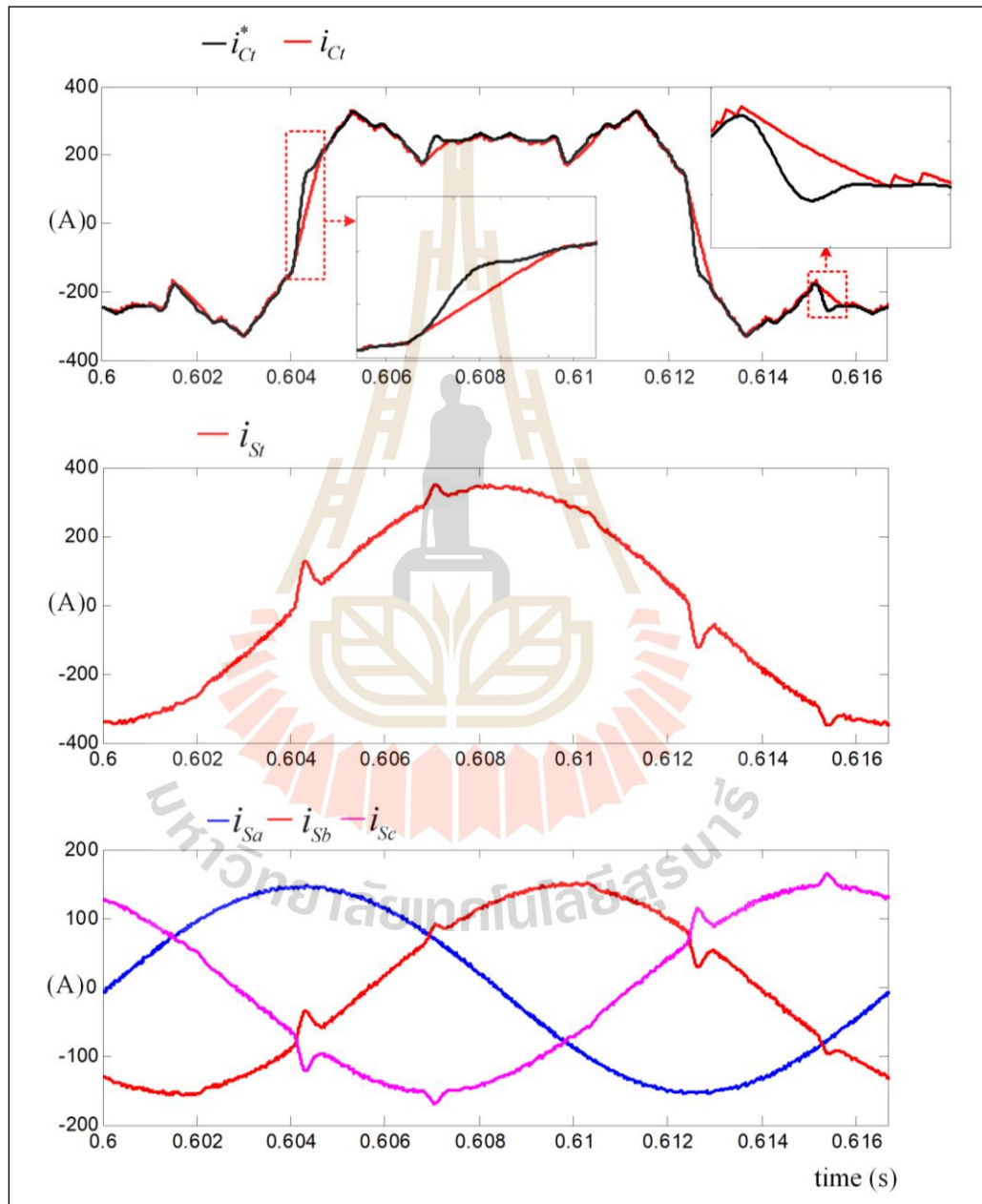
สถานะของ กระแสโหลด	$\%THD_i$ ด้านเฟสร่วม		$\%THD_i$ ด้านสามเฟส			$\%CUF$	PF
	เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c		
ก่อนการชดเชย							
ช่วงที่ 1	21.57	22.41	21.53	22.47	22.17	30.54	0.936
ช่วงที่ 2	22.72	20.30	22.71	21.92	22.92	63.64	0.814
ช่วงที่ 3	22.41	22.71	18.04	22.95	22.47	94.80	0.720
ภายหลังการชดเชย							
ช่วงที่ 1	1.42	1.56	1.42	1.54	1.51	0.33	0.999
ช่วงที่ 2	5.69	1.10	5.69	2.99	3.06	0.48	0.999
ช่วงที่ 3	1.17	7.10	1.17	6.23	6.16	0.89	0.998



รูปที่ 7.17 สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยในช่วงกระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงกรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบพหุสมพสามช่วงที่ 2

สามารถควบคุมให้กระแส i_{Ct} มีลักษณะคล้ายตามกระแส i_{Ct}^* ทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sr} ในช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ดังแสดงในรูปที่ 7.18 ซึ่งส่งผลต่อค่า $\%THD_i$ ที่สูงเกินกรอบของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 อีกทั้งรูปสัญญาณกระแส i_{Sr} มีผลโดยตรงต่อรูปสัญญาณกระแส i_{Sb} และ i_{Sc} จึงทำให้รูปสัญญาณ i_{Sb} และ i_{Sc} ผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์และมีค่า $\%THD_i$ สูงกว่าข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ตามไปด้วย แสดงได้ดังตารางที่ 7.4 ปัญหาในส่วนนี้ได้เกิดขึ้นทั้งการทดสอบในช่วงที่ 2 และช่วงที่ 3 ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญในประเด็นปัญหาดังกล่าวสำหรับการพัฒนาระบบ

ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟ เพื่อให้การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ามีสมรรถนะที่ดีขึ้นและอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 นอกจากนี้ ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดัน V_{DC} ให้มีค่าใกล้เคียงแรงดัน V_{DC}^* ตลอดทุกช่วงการทดสอบในกรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสาน



รูปที่ 7.18 สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยในช่วงกระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงกรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานช่วงที่ 3

7.4 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าว ได้รับการพัฒนา มาจากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง โดยการนำเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลเตอร์มาใช้ในการ สร้างสัญญาณการสวิตช์ เพื่อลดการกระเพื่อมของรูปสัญญาณกระแสชดเชย ด้วยเหตุนี้ ตัวควบคุม แบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตจึงมีสมรรถนะในการควบคุมกระแสชดเชยให้มีค่า ใกล้เคียงสัญญาณอ้างอิงที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง อีกทั้ง ยังคงรักษาจุดเด่นในเรื่องผลตอบสนองที่รวดเร็วของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง สามารถ แก้ไขปัญหาการเพิ่มขึ้นของกระแสที่แหล่งจ่ายในสภาวะชั่วคราวจากการฉีดกระแสชดเชยที่ผิดพลาดไป จากกระแสอ้างอิงของตัวควบคุมพีไอ และลดการกระเพื่อมของรูปสัญญาณกระแสชดเชยที่ใช้ ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง โดยทำการยืนยันผลการทดสอบสมรรถนะ การควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้เทคนิคฮาร์แวร์ในรูป นอกจากนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบดัชนีชี้วัด สมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยกำจัดกระแสฮาร์โมนิก การปรับปรุง ค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุลด้วยตัวควบคุม พีไอ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการ มอดูเลตกับระบบทดสอบที่มีการจ่ายโหลดของระบบรางไฟฟ้าในลักษณะสมดุลและไม่สมดุล ปรากฏว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตให้ค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะการ ปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่ดีกว่าจากตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในกรณีการเปลี่ยนแปลงกระแส โหลดแบบผสมผสานมีค่า $%THD$ สูงเกินกรอบมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 เนื่องจากการ เพิ่มขึ้นของกระแสโหลด ส่งผลให้กระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นในช่วง อัตรา การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตไม่สามารถ ควบคุมให้กระแส ชดเชยมีลักษณะคล้อยตามกระแสตามกระแสอ้างอิงได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้รูป สัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายในช่วงดังกล่าวมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ ประเด็นปัญหา ในส่วนนี้ของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการ มอดูเลตจะได้รับการพัฒนา ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 8

ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนาย ที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว

8.1 บทนำ

การใช้งานโหลดความเร็วสูงในระบบแรงไฟฟ้ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงกระแสไหลของระบบแรงไฟฟ้าแบบผสมผสานอย่างทันทีทันใด (L. Yu-quan, et al., 2011) ส่งผลให้ปริมาณฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับมอดูเลตมีสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยที่ไม่สมบูรณ์ในช่วงที่กระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสำหรับกรณีกระแสไหลมีการเปลี่ยนแปลงแบบผสมผสานตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 7 เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมกระแสชดเชยควรมีการเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมกับกระแสไหลของระบบแรงไฟฟ้า เพื่อสมรรถนะที่ดีในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกำลังแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมมีความจำเป็นต้องปิดระบบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ทำให้วงจรกำลังแอกทีฟไม่สามารถชดเชยกระแสชดเชยเพื่อปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้น ในบทนี้จึงได้นำเสนอระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว (Adaptive Modulated Model Predictive Control: AM²PC) โดยตัวควบคุมดังกล่าวประกอบด้วย ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (L. Zadeh, 1965) ทำหน้าที่ร่วมกับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต (นำเสนอไว้ในบทที่ 7) เพื่อควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกำลังแอกทีฟให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงได้อย่างสมบูรณ์ และมีดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 รายละเอียดการออกแบบและหลักการทำงานของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกร่วมกับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต รวมทั้งผลการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปเพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะด้านการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าและสมรรถนะด้านการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวได้ถูกนำเสนอไว้อย่างละเอียดในบทนี้

8.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตที่มีผลต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชย

การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว มีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

แบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตที่มีผลต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชย เนื่องจากจะใช้ค่าดังกล่าวเป็นพื้นฐานในการออกแบบตัวควบคุมฟิซซีลอจิกสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชยเชิงปรับตัว เมื่อทำการพิจารณาระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต พบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ($\frac{di_{C(m,t)}}{dt}$) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 8.1 โดยที่ a คือ อัตราส่วนขดลวดจากการฉีกกระแสชดเชยผ่านหม้อแปลงเชิงเส้น

$$\frac{di_{C(m,t)}}{dt} = \frac{v_{INV(m,t)}}{aL_C} - \frac{R_C i_{C(m,t)}}{L_C} - \frac{v_{PCC(m,t)}}{a^2 L_C} \quad (8.1)$$

จากสมการที่ (8.1) เมื่อกำหนดให้ตัวต้านทาน (R_C) มีค่าน้อยมาก ๆ สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (8.2) เมื่อพิจารณาสมการดังกล่าว สังเกตได้ว่า $\frac{di_{C(m,t)}}{dt}$ มีความสัมพันธ์กับตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองกำลังแอกทีฟ (L_C) แบบแปรผกผัน นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับแรงดันอินเวอร์เตอร์ ($v_{INV(m,t)}$) และแรงดันที่จุด PCC ($v_{PCC(m,t)}$) แบบแปรผันตรงอีกด้วย ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตที่มีผลต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ L_C แรงดัน $v_{INV(m,t)}$ และแรงดัน $v_{PCC(m,t)}$ แต่เมื่อพิจารณาวจรรองกำลังแอกทีฟ พบว่า ตัวเหนี่ยวนำ L_C ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาเมื่อกระแสไหลมีการเปลี่ยนแปลง อีกทั้งค่าดังกล่าวยังส่งผลต่อการกระเพื่อมของรูปสัญญาณกระแสชดเชย ในส่วนค่าแรงดัน $v_{PCC(m,t)}$ จะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าทางด้านเฟสรวม ไม่สามารถทำการเปลี่ยนแปลงได้ แต่แรงดัน $v_{INV(m,t)}$ สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ด้วยเหตุนี้ จึงได้พิจารณาแรงดัน $v_{INV(m,t)}$ จากการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ปรากฏว่า ค่าแรงดัน $v_{INV(m,t)}$ สามารถทำการควบคุมผ่านแรงดันอ้างอิงในการสวิตช์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟในรอบที่ $n+1$ ($v_{INV(m,t)}^*(n+1)$) แสดงได้ดังสมการที่ (8.3) ซึ่งแรงดัน $v_{INV(m,t)}^*(n+1)$ เป็นแรงดันที่ใช้ในการคำนวณช่วงเวลาการสวิตช์ (รายละเอียดที่มาของสมการดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 7)

$$\frac{di_{C(m,t)}}{dt} = \frac{v_{INV(m,t)}}{aL_C} - \frac{v_{PCC(m,t)}}{a^2 L_C} \quad (8.2)$$

$$v_{INV(m,t)}^*(n+1) = \frac{L_C}{T_s} (i_{CP(m,t)}(n+1) - i_{CP(m,t)}^*(n+2)) \quad (8.3)$$

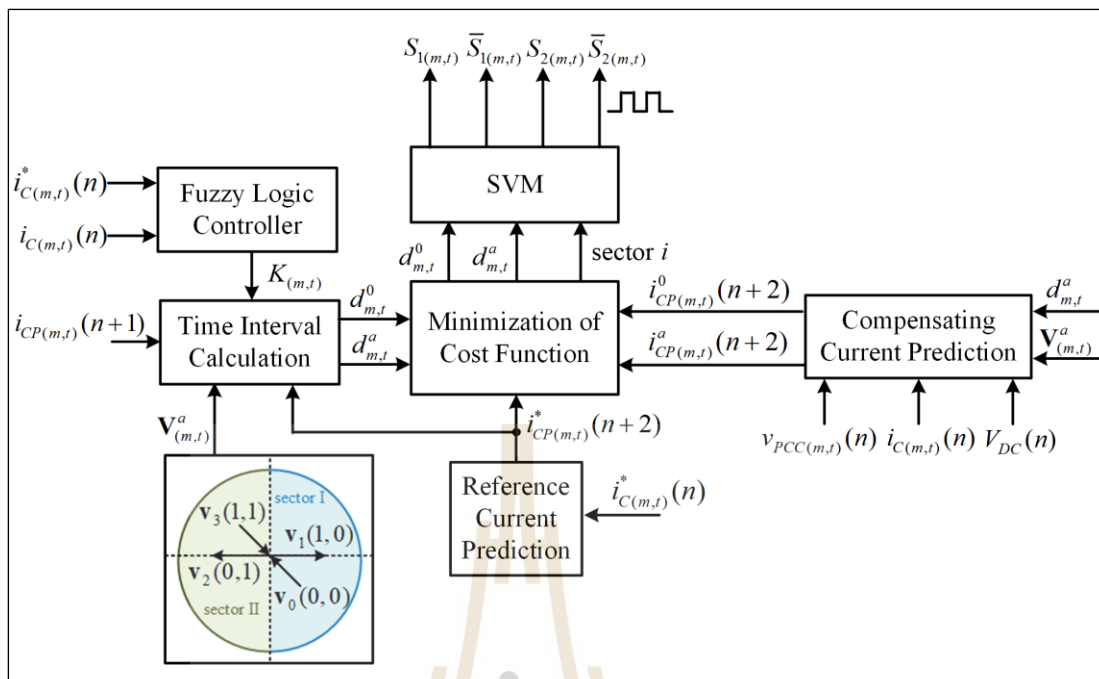
แรงดัน $v_{INV(m,t)}^*(n+1)$ จะถูกจำกัดด้วยช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่าง (sampling time: T_s) ดังแสดงในสมการที่ (8.3) ซึ่งในทางปฏิบัติค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการประมวลผลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ผู้วิจัยได้พิจารณาการปรับค่าแรงดัน $v_{INV(m,t)}^*(n+1)$ โดยใช้ค่าอัตราขยาย ($K_{(m,t)}$) แสดงได้ดังสมการที่ (8.4)

$$v_{INV(m,t)}^*(n+1) = K_{(m,t)} \times \left[\frac{L_C}{T_s} (i_{CP(m,t)}(n+1) - i_{CP(m,t)}^*(n+2)) \right] \quad (8.4)$$

จากสมการที่ (8.4) สังเกตได้ว่า การเปลี่ยนแปลงค่า $K_{(m,t)}$ จะส่งผลต่อค่าแรงดัน $v_{INV(m,t)}^*(n+1)$ ซึ่งทำให้แรงดัน $v_{INV(m,t)}$ มีการเปลี่ยนแปลง เป็นผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ($\frac{di_{C(m,t)}}{dt}$) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การปรับค่า $K_{(m,t)}$ ที่เหมาะสมให้กับระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต จะส่งผลให้สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อกระแสไหลตมีการเปลี่ยนแปลงค่า $K_{(m,t)}$ ที่เหมาะสมจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้นำตัวควบคุมฟัซซีลอจิก (fuzzy logic controller) มาใช้สำหรับการปรับค่า $K_{(m,t)}$ ให้กับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต เพื่อเพิ่มสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้า โดยจะเรียกตัวควบคุมนี้ว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว

8.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว

ผลจากการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตที่มีผลต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยในหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่า การปรับค่าอัตราขยาย $K_{(m,t)}$ ให้เหมาะสมเมื่อกระแสไหลตมีการเปลี่ยนแปลง จะส่งผลดีต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ด้วยเหตุนี้ ตัวควบคุมฟัซซีลอจิก ซึ่งถูกนำเสนอโดย L. Zadeh ในปี 1965 ได้ถูกนำมาใช้เป็นกลไกสำหรับการควบคุมค่า $K_{(m,t)}$ ที่เหมาะสมสำหรับระบบควบคุมกระแสชดเชย ซึ่งเรียกระบบควบคุมดังกล่าวว่า ระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.1 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตยังคงมีลักษณะตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 7 ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญทั้ง 4 ส่วน คือ การทำนายกระแสอ้างอิงในอนาคต (reference current prediction) การทำนายกระแสชดเชยในอนาคต (compensating current prediction) การคำนวณค่าวัฏจักรหน้าที่ในช่วงเวลาสุ่มตัวอย่าง



รูปที่ 8.1 โครงสร้างการควบคุมกระแสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุม AM²PC

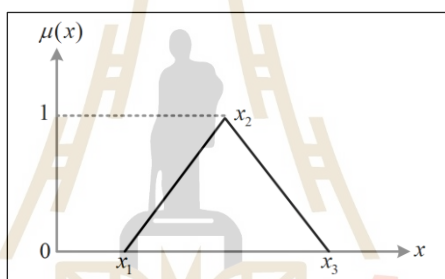
(time interval calculation) และกระบวนการหาฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุดเพื่อให้ได้สถานะการสวิตช์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้กระแสชดเชยมีค่าใกล้เคียงกระแสอ้างอิง (Minimization of cost function) โดยในส่วนของ การคำนวณค่าตัวคูณน้ำหนักในช่วงเวลาสุ่มตัวอย่าง (time interval calculation) มีการนำค่า $K_{(m,t)}$ ที่ได้จากตัวควบคุมฟัซซีลอจิกมาใช้ในการคำนวณแรงดัน $v_{INV(m,t)}^*(n+1)$ แสดงได้ดังสมการที่ (8.4) จากนั้นจะใช้ค่าแรงดันดังกล่าวในการคำนวณค่าตัวคูณน้ำหนักเพื่อกำหนดช่วงเวลาการสวิตช์ในหนึ่งช่วงเวลาสุ่มตัวอย่าง การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเพื่อใช้สำหรับหาค่า $K_{(m,t)}$ ที่เหมาะสมกับการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีโครงสร้างที่สำคัญ 5 ส่วน ประกอบด้วย รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกภาพ ค่าเชิงภาษาและตัวแปรเชิงภาษา กฎของฟัซซี ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพ และการอนุมานฟัซซี ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

8.3.1 รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

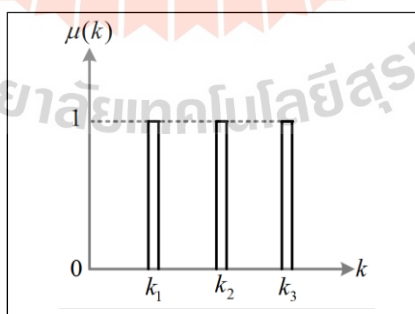
การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกในขั้นเริ่มต้นจะต้องเลือกรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม ซึ่งรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกภาพที่นิยมใช้งานในระบบควบคุมมีหลายรูปแบบ เช่น ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสามเหลี่ยม (triangular membership function) ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function) ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูประฆังคว่ำ (generalized bell membership function) ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปเกาส์เซียน (gaussian membership function) เป็นต้น การเลือกรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของระบบควบคุม หรือถูกกำหนดจากผู้ออกแบบโดยตรง เมื่อพิจารณาการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาโดยใช้รูปร่างฟังก์ชันสมาชิก

รูปแบบต่าง ๆ ผลปรากฏว่า ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม ให้สมรรถนะที่ดีในการกำจัดฮาร์โมนิกและใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่ารูปแบบอื่น ๆ ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตรูปสามเหลี่ยม แสดงได้ดังรูปที่ 8.2 ซึ่งประกอบด้วยตำแหน่ง x_1 , x_2 และ x_3 และมีค่าความเป็นสมาชิกของเซตที่ตำแหน่ง x ใด ๆ ($\mu(x)$) แบ่งออกเป็น 5 ช่วง โดยแต่ละช่วงสามารถนิยามได้ดังสมการที่ (8.5)

$$\mu(x, [x_1 \ x_2 \ x_3]) = \begin{cases} 0 & ; x \leq x_1 \\ (x - x_1) / (x_2 - x_1) & ; x_1 < x < x_2 \\ 1 & ; x = x_2 \\ (x_3 - x) / (x_3 - x_2) & ; x_2 < x < x_3 \\ 0 & ; x \geq x_3 \end{cases} \quad (8.5)$$



รูปที่ 8.2 ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 8.3 ฟังก์ชันสมาชิกภาพรูปแท่งตรงโทน

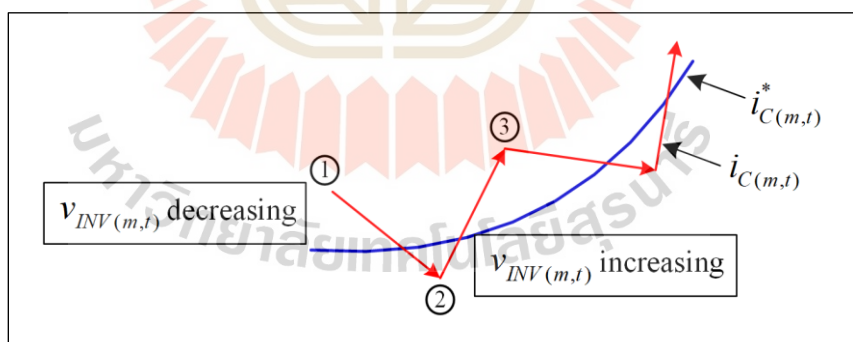
ในส่วนของฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุตจะเลือกใช้รูปแท่งตรงโทนตามหลักการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno (K. Takagi and M. Sugeno, 1985) เนื่องจากการอนุมานฟัซซี

แบบ Takagi-Sugeno ใช้ฟังก์ชันเส้นตรงโทที่มีลักษณะเป็นค่าคงที่แทนการใช้ฟังก์ชันสมาชิกภาพแบบฟัซซีเซต ทำให้กระบวนการอนุมานฟัซซี ซึ่งประกอบด้วย การทำฟัซซี (fuzzification) การประเมินกฎฟัซซี (fuzzy rule evaluation) การรวมกฎ (aggregation) และการทำให้ฟัซซี (defuzzification) มีขั้นตอนที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ส่งผลให้เวลาในการคำนวณด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกมีความรวดเร็วมากขึ้น ตัวอย่างฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุตรูปแท่งตรงโทตามหลักการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.3

8.3.2 ค่าเชิงภาษาและตัวแปรเชิงภาษา

วัตถุประสงค์ของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับการปรับค่าอัตราขยาย $K_{(m,t)}$ ให้เหมาะสม เพื่อให้ระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแยกที่ฟสามารถควบคุมกระแสชดเชยของเฟส m และเฟส t ($i_{C(m,t)}$) ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงของเฟส m และเฟส t ($i_{C(m,t)}^*$) ตามลำดับ ดังนั้น อินพุตของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก คือ ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างกระแสชดเชยและกระแสอ้างอิงของเฟส m และเฟส t ($e_{i_{C(m,t)}}$) แสดงได้ดังสมการที่ (8.6) สำหรับเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็นค่าอัตราขยาย $K_{(m,t)}$ โดยพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่า $K_{(m,t)}$ ที่ส่งผลต่อค่าแรงดัน $v_{INV(m,t)}^*(n+1)$ ซึ่งทำให้แรงดัน $v_{INV(m,t)}$ มีการเปลี่ยนแปลง เป็นผลให้กระแส $i_{C(m,t)}$ มีลักษณะใกล้เคียงกระแส $i_{C(m,t)}^*$ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.4

$$e_{i_{C(m,t)}} = i_{C(m,t)}^* - i_{C(m,t)} \quad (8.6)$$



รูปที่ 8.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน $v_{INV(m,t)}$ และกระแส $i_{C(m,t)}$

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน $v_{INV(m,t)}$ และกระแส $i_{C(m,t)}$ ในรูปที่ 8.4 สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกเพื่อออกแบบค่าเชิงภาษาและตัวแปรเชิงภาษา ได้เป็นสามกรณี คือ เมื่อกระแส $i_{C(m,t)}$ มีค่ามากกว่ากระแส $i_{C(m,t)}^*$ (กระแสในตำแหน่งที่ 1) จะต้องทำการลดแรงดัน $v_{INV(m,t)}$ เพื่อให้กระแส $i_{C(m,t)}$ มีค่าลดลง ส่งผลให้กระแส $i_{C(m,t)}$ ลดลง

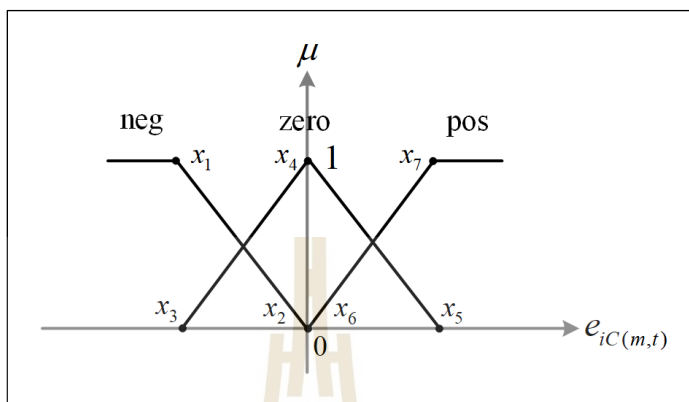
ไปอยู่ตำแหน่งที่ 2 การลดค่าแรงดัน $v_{INV(m,t)}$ ทำได้โดยการลดอัตราขยาย $K_{(m,t)}$ ในทางกลับกัน เมื่อกระแส $i_{C(m,t)}$ มีค่าน้อยกว่ากระแส $i_{C(m,t)}^*$ (กระแสในตำแหน่งที่ 2) จะต้องทำการเพิ่มแรงดัน $v_{INV(m,t)}$ เพื่อให้กระแส $i_{C(m,t)}$ มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้กระแส $i_{C(m,t)}$ ไปอยู่ในตำแหน่งที่ 3 ลักษณะเช่นนี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มอัตราขยาย $K_{(m,t)}$ และในกรณีที่กระแส $i_{C(m,t)}$ มีค่าเท่ากับกระแส $i_{C(m,t)}^*$ ซึ่งค่าแรงดัน $v_{INV(m,t)}$ จะต้องมีค่าคงที่เพื่อให้กระแส $i_{C(m,t)}$ มีค่าคงเดิม โดยให้อัตราขยาย $K_{(m,t)}$ มีค่าคงที่ จากการอธิบายข้างต้น สามารถแสดงการกำหนดค่าเชิงภาษาและตัวแปรเชิงภาษาได้ดังตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ค่าเชิงภาษาและตัวแปรเชิงภาษาของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

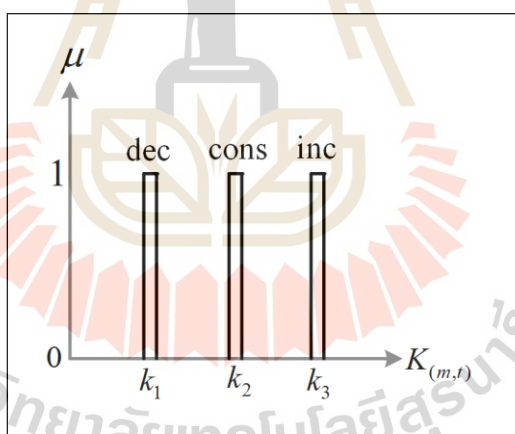
ค่าของระบบ	ตัวแปรเชิงภาษาและความหมาย		ค่าเชิงภาษาและความหมาย	
	ตัวแปรเชิงภาษา	ความหมาย	ค่าเชิงภาษา	ความหมาย
อินพุต	error ($e_{iC(m,t)}$)	ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสชดเชย	neg (negative)	$i_{C(m,t)}^* < i_{C(m,t)}$ (น้อยกว่า)
			zero	$i_{C(m,t)} = i_{C(m,t)}^*$ (เท่ากับ)
			pos (positive)	$i_{C(m,t)}^* > i_{C(m,t)}$ (มากกว่า)
เอาต์พุต	gain ($K_{(m,t)}$)	อัตราขยาย	dec (decrease)	ลดลง
			cons (constant)	คงที่
			inc (increase)	เพิ่มขึ้น

จากการออกแบบค่าเชิงภาษาและตัวแปรทางภาษาในตารางที่ 8.1 สามารถแสดงรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกที่ได้รับการพิจารณาแบบสมมาตร ดังรูปที่ 8.5 และ 8.6 ตามลำดับ การออกแบบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกภาพโดยใช้ค่าเชิงภาษาและตัวแปรเชิงภาษาของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกในรูปที่ 8.5 และ 8.6 สามารถอธิบายได้ว่า อินพุตของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกถูกกำหนดให้เป็นตัวแปร $e_{iC(m,t)}$ มีฟังก์ชันสมาชิกประกอบด้วย เซต neg เซต zero และเซต pos โดยที่เซต neg มี x_1 และ x_2 เป็นตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิก ซึ่งเซต neg จะให้ค่าความเป็นสมาชิกเมื่อกระแส $i_{C(m,t)}$ มีค่ามากกว่ากระแส $i_{C(m,t)}^*$ ส่วนเซต zero จะมีตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิก คือ x_3 , x_4 และ x_5 ที่ให้ค่าความเป็นสมาชิกเมื่อกระแส $i_{C(m,t)}$ มีค่าเท่ากับกระแส $i_{C(m,t)}^*$ และในส่วนสุดท้ายเซต pos จะให้ค่าความเป็นสมาชิกในกรณีที่กระแส $i_{C(m,t)}$ มีค่าน้อยกว่ากระแส $i_{C(m,t)}^*$ โดยมี x_6 และ x_7 เป็นตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิก สำหรับเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี

ซีลोजิกแทนด้วยตัวแปร $K_{(m,t)}$ มีรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกภาพเป็นแท่งตรงโทนประกอบด้วย dec cons และ inc ที่มี k_1 , k_2 และ k_3 เป็นตำแหน่งของฟังก์ชันสมาชิก ตามลำดับ



รูปที่ 8.5 ฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต $e_{iC(m,t)}$



รูปที่ 8.6 ฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต $K_{(m,t)}$

8.3.3 การออกแบบกฎของตัวควบคุมฟัซซีลोजิก

กฎของตัวควบคุมฟัซซีลोजิกเป็นเงื่อนไขและข้อปฏิบัติที่สำคัญในการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซีลोजิก ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะการควบคุม โดยกฎของตัวควบคุมฟัซซีลोजิกถูกกำหนดขึ้นจากความเข้าใจระบบควบคุมของผู้ออกแบบ ซึ่งจำนวนกฎที่ใช้ในการควบคุมควรออกแบบให้เหมาะสมกับระบบนั้น ๆ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบกฎของฟัซซีลोजิกตามจำนวนค่าเชิง

ภาษาและตัวแปรเชิงภาษา ดังนั้น ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกจึงมีกฎสำหรับการควบคุมทั้งหมด 3 ข้อ สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

กฎข้อที่ 1: IF error = neg	THEN gain = dec
กฎข้อที่ 2: IF error = zero	THEN gain = cons
กฎข้อที่ 3: IF error = pos	THEN gain = inc

เงื่อนไขและข้อปฏิบัติจากกฎของฟuzzyลอจิกที่ได้ออกแบบขึ้นสำหรับการควบคุม กระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกที่ฟทั้ง 3 กฎ สามารถอธิบายความหมายได้ดังนี้

ความหมายของกฎข้อที่ 1 ถ้าค่าอินพุต error มีค่าอยู่ในเซต neg แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต gain มีค่าเท่ากับ dec ซึ่งหมายความว่า ถ้ากระแส $i_{C(m,t)}$ มีค่ามากกว่ากระแส i_C^* จะกำหนดให้ลดค่าแรงดัน $v_{INV(m,t)}$ โดยการลดค่าอัตราขยาย $K_{(m,t)}$

ความหมายของกฎข้อที่ 2 ถ้าค่าอินพุต error มีค่าอยู่ในเซต zero แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต gain มีค่าเท่ากับ cons ซึ่งหมายความว่า ถ้ากระแส $i_{C(m,t)}$ มีค่าเท่ากับกระแส i_C^* จะกำหนดให้คงค่าแรงดัน $v_{INV(m,t)}$ โดยการคงค่าอัตราขยาย $K_{(m,t)}$

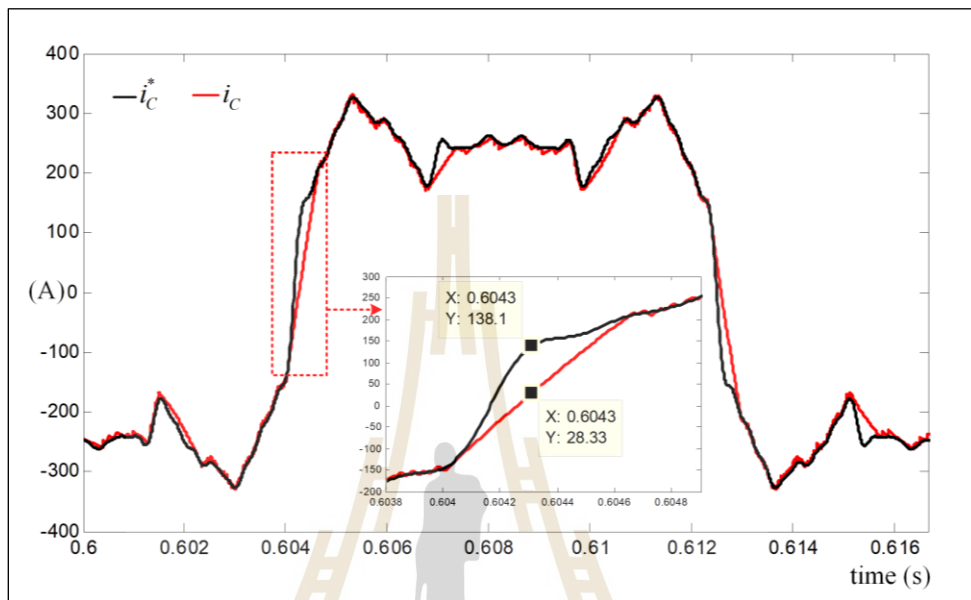
ความหมายของกฎข้อที่ 3 ถ้าค่าอินพุต error มีค่าอยู่ในเซต pos แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต gain มีค่าเท่ากับ inc ซึ่งหมายความว่า ถ้ากระแส $i_{C(m,t)}$ มีค่าน้อยกว่ากระแส i_C^* จะกำหนดให้เพิ่มค่าแรงดัน $v_{INV(m,t)}$ โดยการเพิ่มค่าอัตราขยาย $K_{(m,t)}$

8.3.4 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมฟuzzyลอจิก

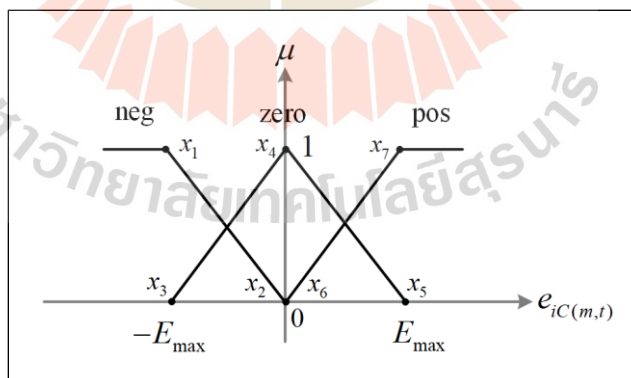
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตและเอาต์พุตเป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญต่อสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชย ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกดังกล่าวจะต้องถูกออกแบบให้เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา โดยการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุต x_1 ถึง x_6 และการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุต k_1 ถึง k_3 ดังแสดงในรูปที่ 8.5 และ 8.6 เริ่มต้นจากการพิจารณาวัตถุประสงค์การนำตัวควบคุมฟuzzyลอจิกมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตในการแก้ไขปัญหาการติดตามกระแสอ้างอิงของกระแสชดเชยในช่วงที่กระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูง (ตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 7) จึงได้พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่เกิดขึ้นในช่วงอัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเพื่อใช้สำหรับการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตแบบสมมาตร ในส่วนของตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุตได้ทำการพิจารณาถึงข้อจำกัดของค่าดรรชนีการมอดูเลต (modulation index: m) ของวงจรรองกำลังแอกที่ฟ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะสมมาตรกัน โดยทำการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างกระแสชดเชยและกระแสอ้างอิงในช่วงที่กระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูง (E_{max}) จากระบบทดสอบที่พิจารณาในกรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 7 ดังแสดงในรูปที่ 8.7 พบว่า มี

ค่า E_{\max} เท่ากับ 109.77 A ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำมาใช้คำนวณเพื่อหาค่า x_1 ถึง x_7 ดังรูปที่ 8.8 ผลการออกแบบค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพอินพุตของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 8.2



รูปที่ 8.7 ข้อมูลสำหรับการพิจารณาค่า E_{\max}



รูปที่ 8.8 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต $e_{iC(m,t)}$

สำหรับการออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของเอาต์พุต ซึ่งประกอบไปด้วย k_1 , k_2 และ k_3 ได้รับการออกแบบโดยพิจารณาข้อจำกัดของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่มีค่าดรรชนีการมอดูเลตอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 แสดงได้ดังสมการที่ (8.7) จากสมการดังกล่าว สังเกตได้ว่า การ

เปลี่ยนแปลงแรงดัน $v_{INV(m,t)}^*(n+1)$ ส่งผลต่อตรรกะการมอดูเลต ซึ่งทำให้แรงดัน $v_{INV(m,t)}$ มีการเปลี่ยนแปลง เป็นผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ $\left(\frac{di_{C(m,t)}}{dt}\right)$ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ v_r คือ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากสัญญาณพาหุรูปสามเหลี่ยม ซึ่งถูกใช้ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดัน $v_{INV(m,t)}^*(n+1)$

$$m = \frac{v_{INV(m,t)}^*(n+1)}{v_r} \quad ; 0 \leq m \leq 1 \quad (8.7)$$

จากสมการที่ (8.7) เมื่อพิจารณาค่าตรรกะการมอดูเลตร่วมกับความสัมพันธ์ของ อัตราขยาย $K_{(m,t)}$ และค่าแรงดัน $v_{INV(m,t)}^*(n+1)$ ดังสมการที่ (8.4) สามารถแสดงขอบเขตของ อัตราขยาย $K_{(m,t)}$ ได้ดังสมการที่ (8.8) โดยที่ $v_{INV \max(m,t)}^*(n+1)$ คือ แรงดันอ้างอิงสูงสุดที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหุรูปสามเหลี่ยม

$$0 \leq K_{(m,t)} \leq \frac{v_r}{v_{INV \max(m,t)}^*(n+1)} \quad (8.8)$$

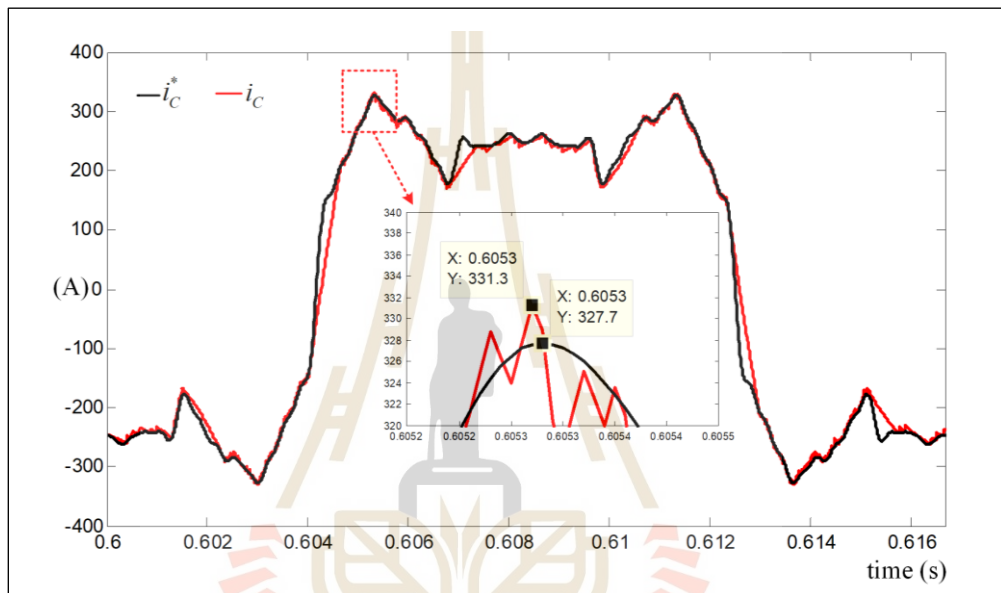
การหาขอบเขตสูงสุดของอัตราขยาย $K_{(m,t)}$ เริ่มต้นจากการพิจารณาแรงดัน $v_{INV \max(m,t)}^*(n+1)$ โดยใช้ค่ากระแสชดเชยและกระแสอ้างอิงสูงสุดในการคำนวณแสดงได้ดังสมการ (8.9) โดยที่มาของสมการดังกล่าวได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 8.2

$$v_{INV \max(m,t)}^*(n+1) = \frac{L_C}{T_s} (i_{CP \max(m,t)}(n+1) - i_{CP \max(m,t)}^*(n+2)) \quad (8.9)$$

เพื่อให้การออกแบบง่าย ไม่ซับซ้อน และเหมาะสมกับการนำไปใช้ในทางปฏิบัติจึงไม่ พิจารณาการทำนายค่าต่าง ๆ ในสมการที่ (8.9) โดยการกำหนดให้กระแส $i_{CP \max(m,t)}(n+1)$ มีค่า เท่ากับ $i_{CP \max(m,t)}$ และกระแส $i_{CP \max(m,t)}^*(n+2)$ มีค่าเท่ากับ $i_{CP \max(m,t)}^*$ ดังนั้นสามารถจัดรูป สมการแรงดัน $v_{INV \max(m,t)}^*(n+1)$ ในรูปของแรงดัน $v_{INV \max(m,t)}^*$ ได้ดังสมการที่ (8.10)

$$v_{INV \max(m,t)}^* = \frac{L_C}{T_s} (i_{CP \max(m,t)} - i_{CP \max(m,t)}^*) \quad (8.10)$$

กระแส $i_{CP\max(m,t)}$ และ $i_{CP\max(m,t)}^*$ สามารถพิจารณาได้จากระบบทดสอบที่มีการจ่ายกระแสโหลดแบบผสมผสานตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 7 ดังแสดงในรูปที่ 8.9 เนื่องจากรูปดังกล่าวมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงสูงสุดที่สุดสำหรับระบบทดสอบที่พิจารณา จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่า กระแส $i_{C\max(m,t)}$ และกระแส $i_{C\max(m,t)}^*$ มีค่าเท่ากับ 331.3 A และ 327.7 A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของการฉีดกระแสชดเชยผ่านหม้อแปลงเชิงเส้นและค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแยกที่ฟ สามารถคำนวณค่าแรงดัน $v_{INV\max(m,t)}^*$ ได้ดังสมการที่ (8.11)



รูปที่ 8.9 ข้อมูลสำหรับการพิจารณาขอบเขตของค่าอัตราการขยาย $K_{(m,t)}$

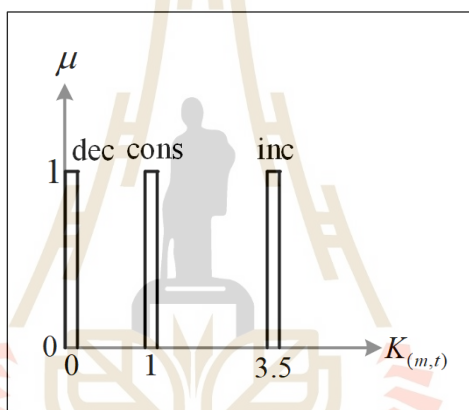
$$v_{INV\max(m,t)}^* = \frac{0.1 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-5}} ((26 \times 331.3) - (26 \times 327.7)) = 936 \quad (8.11)$$

สำหรับค่าแรงดันสัญญาณพาร์รูปสามเหลี่ยม (v_r) ผู้วิจัยได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 โวลต์ เมื่อพิจารณาการส่งข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบสัญญาณในรูปแบบดิจิตอล 14 บิต โดยมีค่าแรงดันอ้างอิงสูงสุด 5 โวลต์ จะได้ว่า แรงดัน v_r มีค่าเท่ากับ 3276 จากข้อมูลทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น สามารถคำนวณหาขอบเขตของอัตราการขยาย $K_{(m,t)}$ ได้ดังสมการที่ (8.12) ซึ่งค่าดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการหาค่า k_1 , k_2 และ k_3 ดังแสดงในรูปที่ 8.10 ผลการออกแบบค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzyสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 8.2

$$0 \leq K_{(m,t)} \leq 3.5 \quad (8.12)$$

ตารางที่ 8.2 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของตัวควบคุมฟuzzyลอจิก

ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต $e_{iC(m,t)}$						
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
-109.77	0	-109.77	0	109.77	0	109.77
ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของเอาต์พุต $K_{(m,t)}$						
k_1		k_2			k_3	
0		1			3.5	



รูปที่ 8.10 การออกแบบตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของเอาต์พุต $K_{(m,t)}$

8.3.5 การอนุมานฟuzzyลอจิก

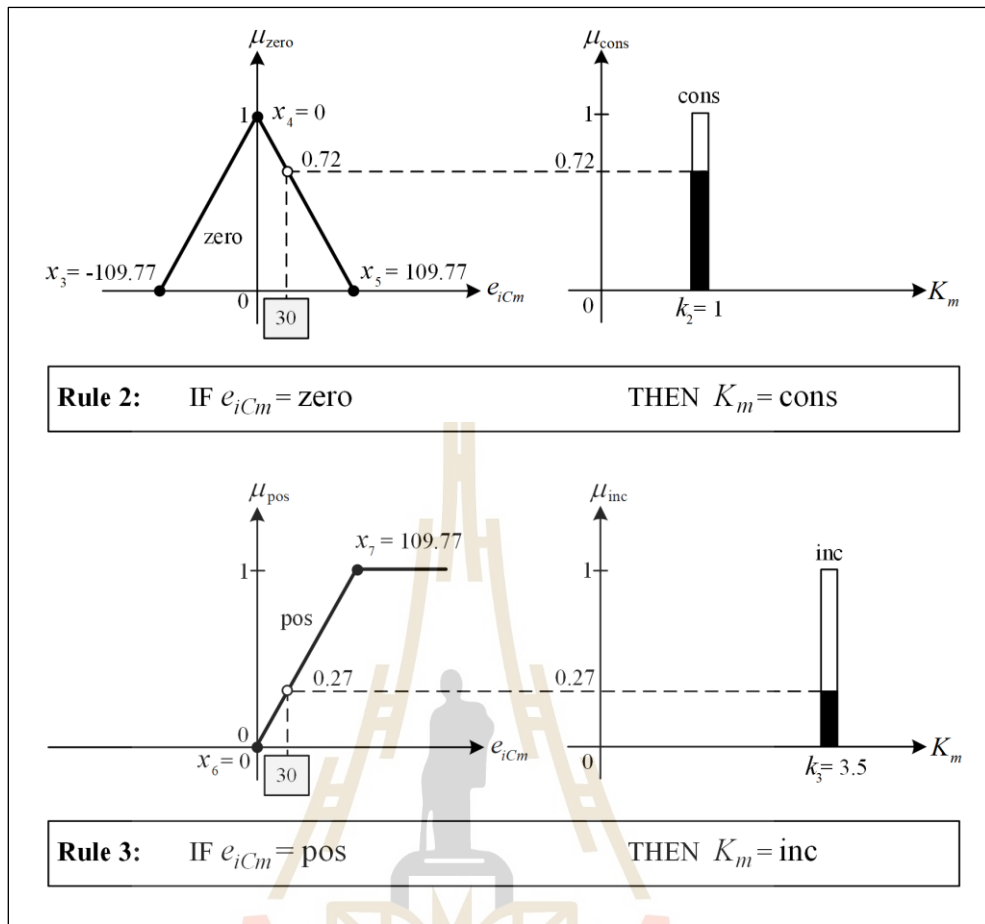
การอนุมานฟuzzy (fuzzy inference) คือ กระบวนการส่งค่าอินพุตของระบบที่พิจารณาไปเป็นค่าเอาต์พุต โดยใช้ทฤษฎีทางฟuzzyลอจิก วิธีการอนุมานฟuzzyที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ คือ การอนุมานฟuzzyแบบ Takagi-Sugeno (K. Takagi and M. Sugeno, 1985) เนื่องจากการอนุมานฟuzzyด้วยวิธี Takagi-Sugeno ใช้ฟังก์ชันเส้นตรงโทที่มีลักษณะเป็นค่าคงที่แทนการใช้ฟังก์ชันสมาชิกภาพแบบฟuzzyเซต ทำให้กระบวนการอนุมานฟuzzyมีขั้นตอนที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ส่งผลให้เวลาในการคำนวณด้วยตัวควบคุมฟuzzyลอจิกมีความรวดเร็ว นอกจากนี้ จุดเด่นของการอนุมานฟuzzyด้วยวิธี Takagi-Sugeno คือ การทำดีฟuzzyด้วยการหาค่าน้ำหนักเฉลี่ย (Weighted Average: WA) ซึ่งเป็นค่าเอาต์พุตที่เหมาะสมกับระบบควบคุม แสดงได้ดังสมการที่ (8.13)

$$K_{(m,t)} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(k_i) \times k_i}{\sum_{i=1}^n \mu(k_i)} \quad (8.13)$$

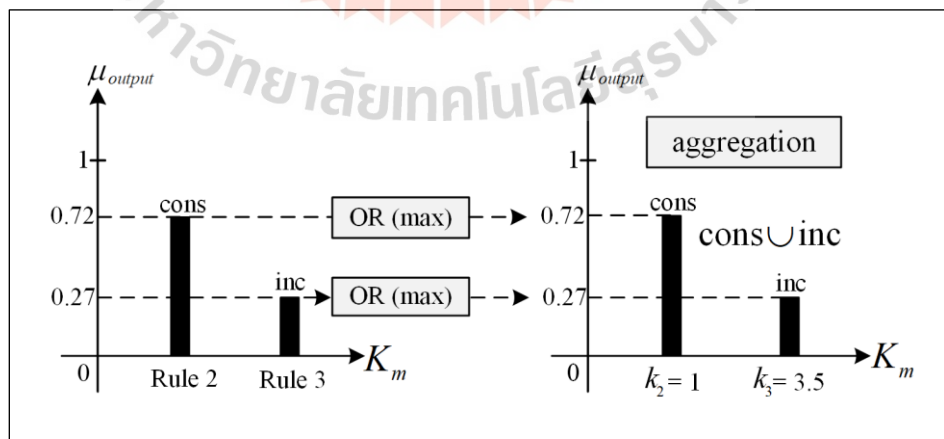
โดยที่ $\mu(k_i)$ คือ ค่าความเป็นสมาชิกของฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต

k_i คือ ค่าคงที่ของเอาต์พุตที่เป็นเส้นโทน

ตัวอย่างการอนุมานฟuzzyด้วยวิธี Takagi-Sugeno สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.11 จากรูปดังกล่าว เป็นการพิจารณาที่ค่ากระแส i_{Cm}^* มีค่าเท่ากับ 120 A และกระแส i_{Cm} มีค่าเท่ากับ 90 A ซึ่งแสดงว่า กระแส i_{Cm}^* มีค่ามากกว่ากระแส i_{Cm} ($i_{Cm}^* > i_{Cm}$) โดยมีค่า $e_{i_{Cm}}$ เท่ากับ 30 A ส่งผลให้ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพของอินพุต $e_{i_{Cm}}$ อยู่ในเซต zero และเซต pos ซึ่งมีค่าความเป็นสมาชิกในแต่ละเซตขึ้นอยู่กับฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (8.5) จากกฎของฟuzzyตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 8.3.3 ทำให้ได้ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต K_m อยู่ในแท่งตรง โทน cons และ inc ตามลำดับ ที่มีตำแหน่งตรงกับค่า k_2 และ k_3 โดยมีค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตจะขึ้นอยู่กับระดับค่าความเป็นสมาชิกของอินพุต $e_{i_{Cm}}$ เมื่อได้ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตจะดำเนินการรวมกฎของฟuzzy ดังแสดงในรูปที่ 8.12 โดยมีขั้นตอนที่สำคัญ คือ การประมวลค่าความเป็นสมาชิกภาพของเอาต์พุตในแต่ละแท่งตรงโทน (cons, inc) โดยใช้ตัวกระทำ OR เพื่อหาค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตสูงสุดในแต่ละแท่งตรงโทน และอีกขั้นตอนหนึ่งเป็นการรวมผลลัพธ์ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตรวมเข้าด้วยกันด้วยตัวกระทำฟuzzyแบบยูเนียน เมื่อผ่านการรวมกฎเรียบร้อยแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการดีฟuzzy ซึ่งเป็นการแปลงค่าความเป็นสมาชิกเอาต์พุตให้อยู่ในรูปของค่าอัตราขยาย K_m สำหรับนำไปใช้งานในระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ ด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ยดังสมการที่ (8.14) การคำนวณในสมการดังกล่าวอ้างอิงผลจากการรวมกฎที่ได้นำเสนอข้างต้น และใช้ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพเอาต์พุตของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกตามการออกแบบที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 8.4.4 ดังนั้น ผลเฉลยของค่าเอาต์พุตชัดเจนหรือค่าอัตราขยาย K_m มีค่าเท่ากับ 1.68 โดยสามารถแสดงฟังก์ชันสมาชิกภาพของเอาต์พุต K_m ดังรูปที่ 8.13 ผลดังกล่าว สามารถอธิบายได้ว่า ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกได้ปรับเพิ่มค่าอัตราขยาย K_m ให้มีค่า 1.68 เพื่อปรับเพิ่มค่าแรงดัน v_{INVm} เป็นผลให้กระแส i_{Cm} มีค่าเพิ่มขึ้นและมีลักษณะใกล้เคียงกระแส i_{Cm}^*

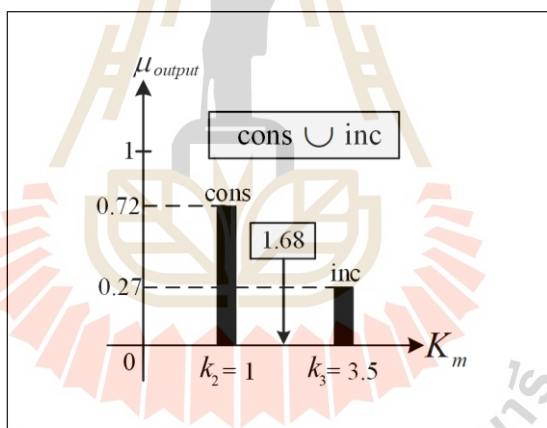


รูปที่ 8.11 การอนุมานฟัซซีด้วยวิธี Takagi-Sugeno



รูปที่ 8.12 การรวมกฎของฟัซซีด้วยการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno

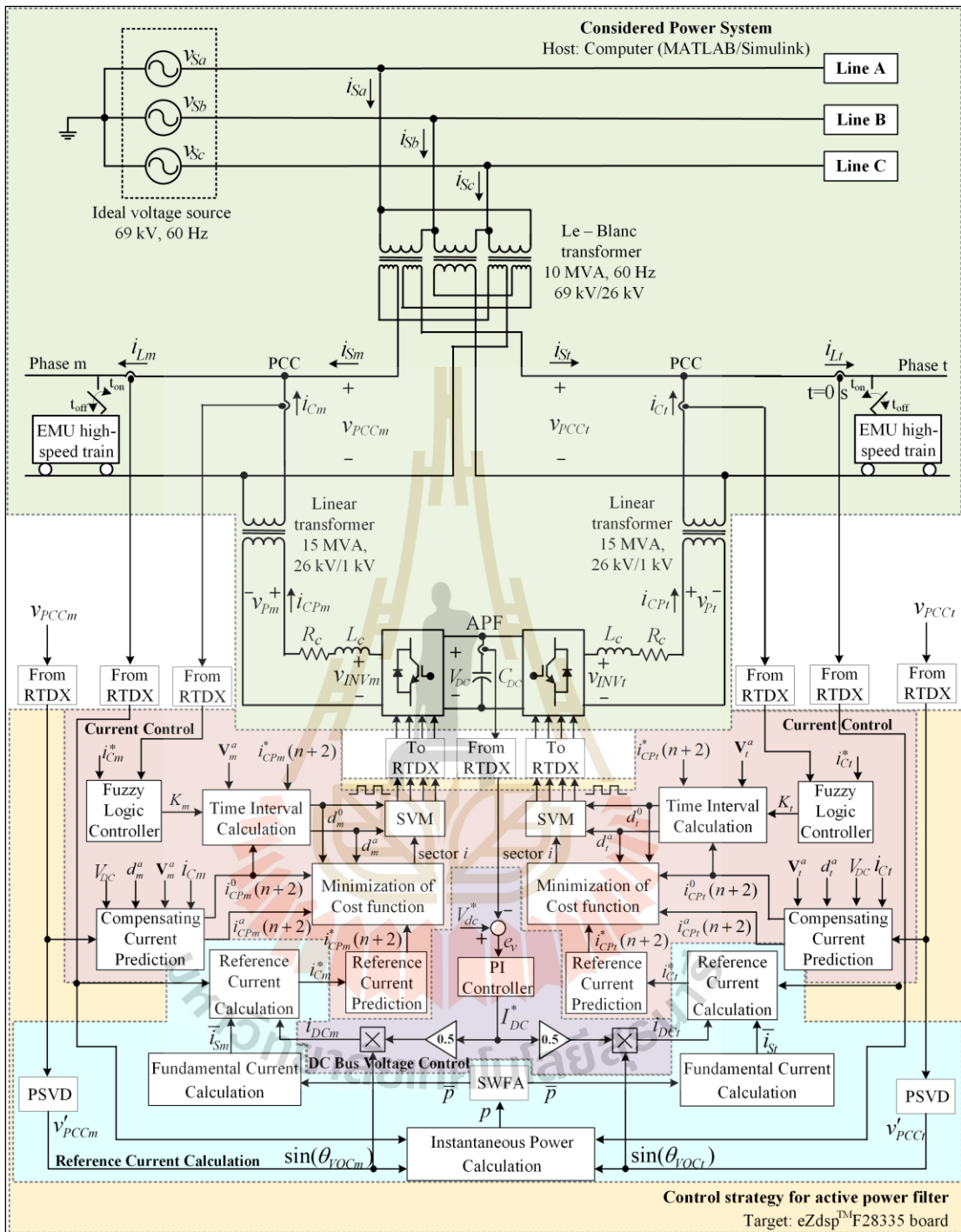
$$\begin{aligned}
 K_m &= \frac{\sum_{i=1}^n \mu(k_i) \times k_i}{\sum_{i=1}^n \mu(k_i)} \\
 &= \frac{[\mu(k_2) \times k_2] + [\mu(k_3) \times k_3]}{\mu(k_2) + \mu(k_3)} \\
 &= \frac{[0.72 \times 1] + [0.27 \times 3.5]}{0.72 + 0.27} \\
 &= 1.68
 \end{aligned}
 \tag{8.14}$$



รูปที่ 8.13 ผลเฉลยของการทำดีฟัซซีด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย

8.4 การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว

การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้ถูกดำเนินการด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว ดังนั้น จึงใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวในส่วนของระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ส่วนระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงยังคงใช้ตัวควบคุมพีไอ นอกจากนี้ ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟยังคงเป็นไปตามการออกแบบ



รูปที่ 8.14 โครงสร้างระบบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุม AM²PC สำหรับการควบคุมกระแสชดเชย

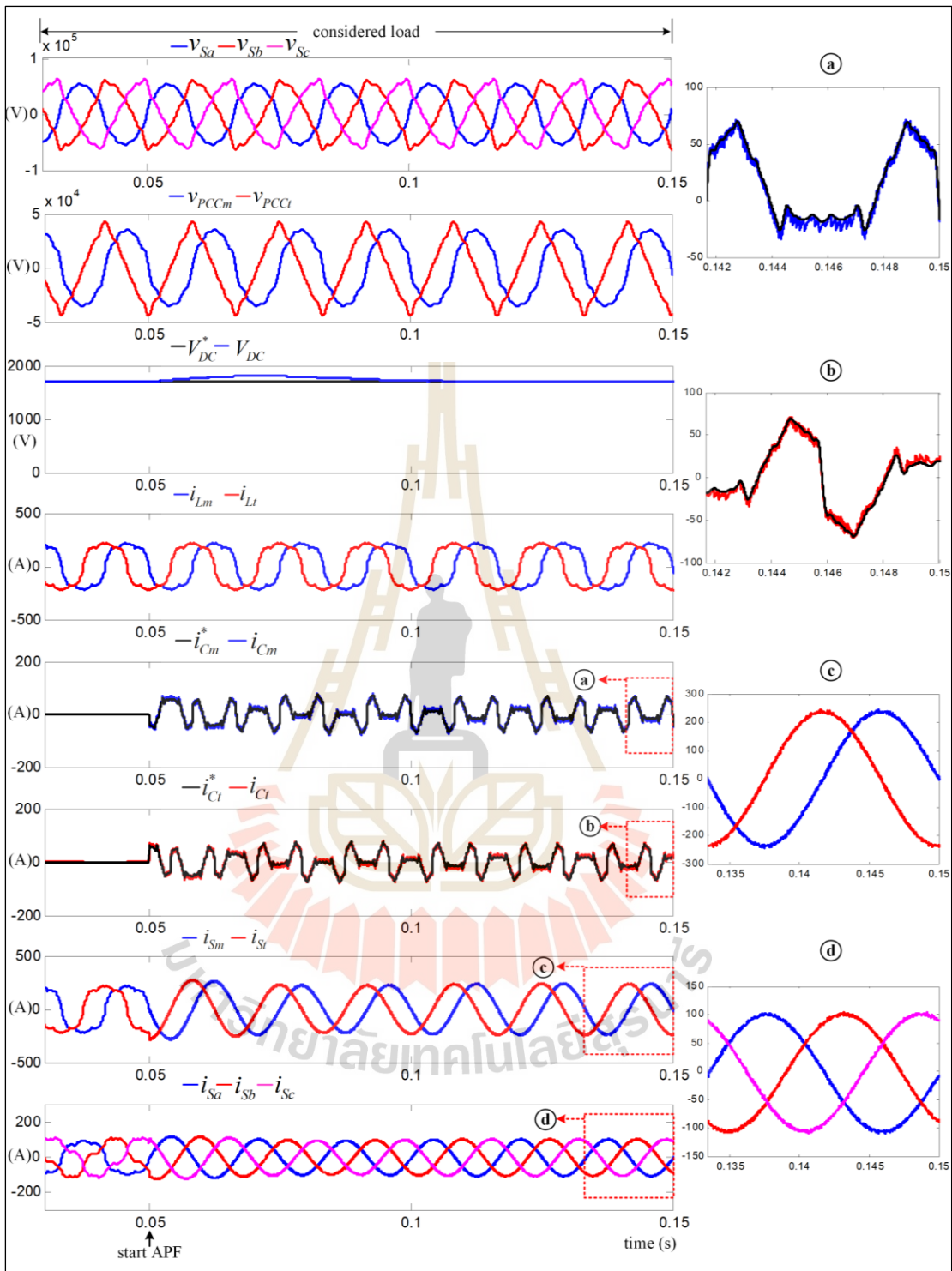
ตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 โดยมีโครงสร้างของระบบทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแยกที่พัวด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง

ร่วมกับมอดูเลตเชิงปรับตัว แสดงได้ดังรูปที่ 8.14 ซึ่งได้ทำการทดสอบกับระบบโหลดสมดุล โหลดไม่สมดุล และโหลดแบบผสมผสาน เช่นเดียวกับการทดสอบในบทที่ 7 เพื่อใช้สำหรับการยืนยันสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า และสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว

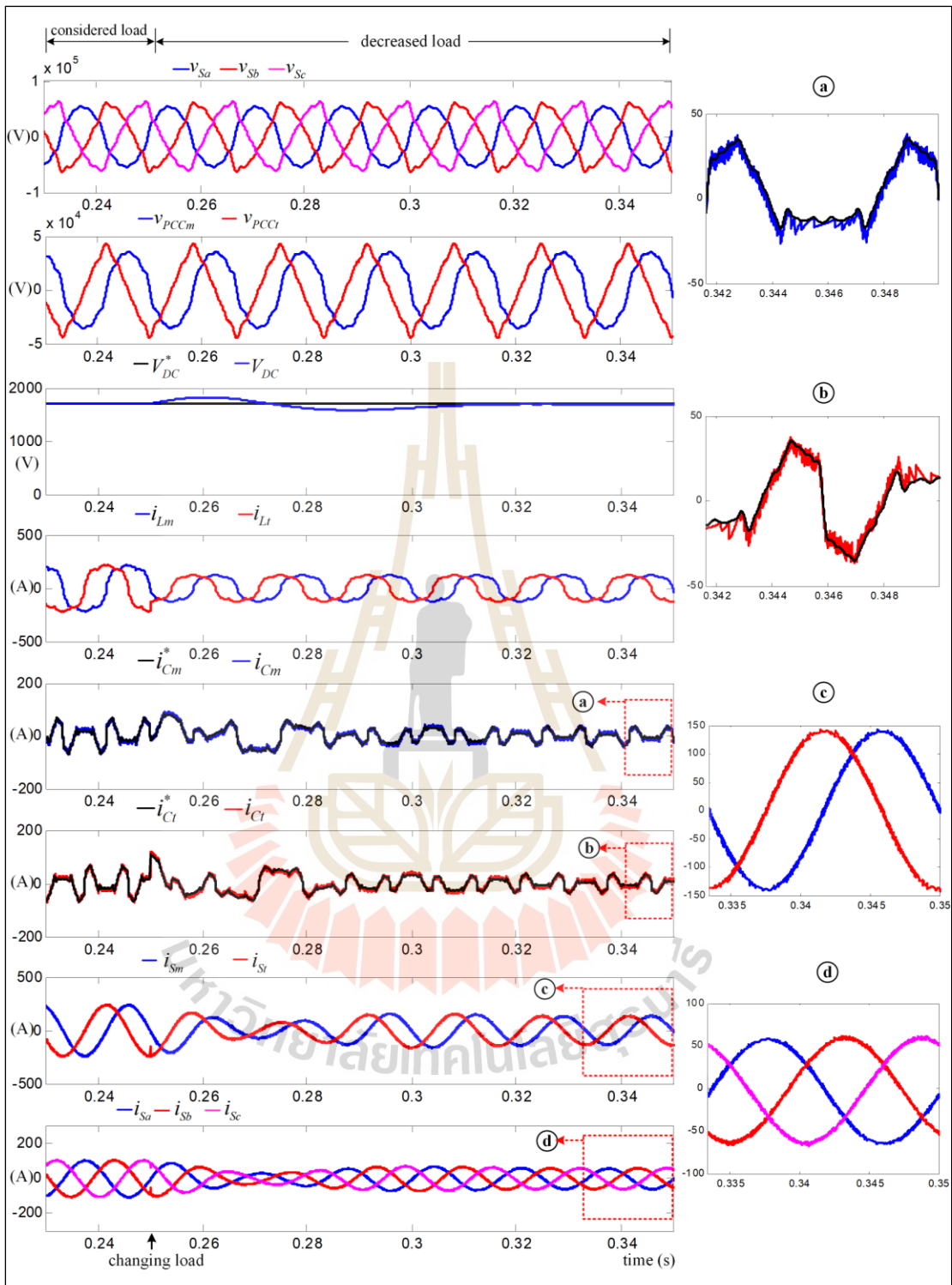
8.4.1 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีโหลดสมดุล

ระบบทดสอบที่พิจารณามีการใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงแบบสมดุล โดยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (v_{Sa} , v_{Sb} , v_{Sc}) มีปริมาณฮาร์มอนิกปะปน ส่งผลให้รูปสัญญาณแรงดัน v_{Sa} , v_{Sb} และ v_{Sc} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 10.3% และมีการใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้าแบบสมดุล (รายละเอียดของระบบรางไฟฟ้าสามารถศึกษาได้จากหัวข้อที่ 4.5.2) ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.15 ซึ่งสังเกตได้ว่า เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟเริ่มฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบที่เวลา 0.05 วินาที ปรากฏว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้มีลักษณะคล้อยตามกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ได้ตามลำดับ ทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{Sr} จากที่มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์กลับมามีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ตามไปด้วย โดยที่ค่า $\%THD_i$ ภายหลังจากชดเชยในแต่ละเฟส อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 แสดงได้ดังตารางที่ 8.3 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า PF พบว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถปรับปรุงค่า PF ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.976 เป็น 0.999 ในส่วนของค่า $\%CUF$ มีค่าเท่ากับ 0% ทั้งก่อนการชดเชยและภายหลังจากชดเชย เนื่องจากระบบที่พิจารณามีลักษณะการจ่ายโหลดแบบสมดุล

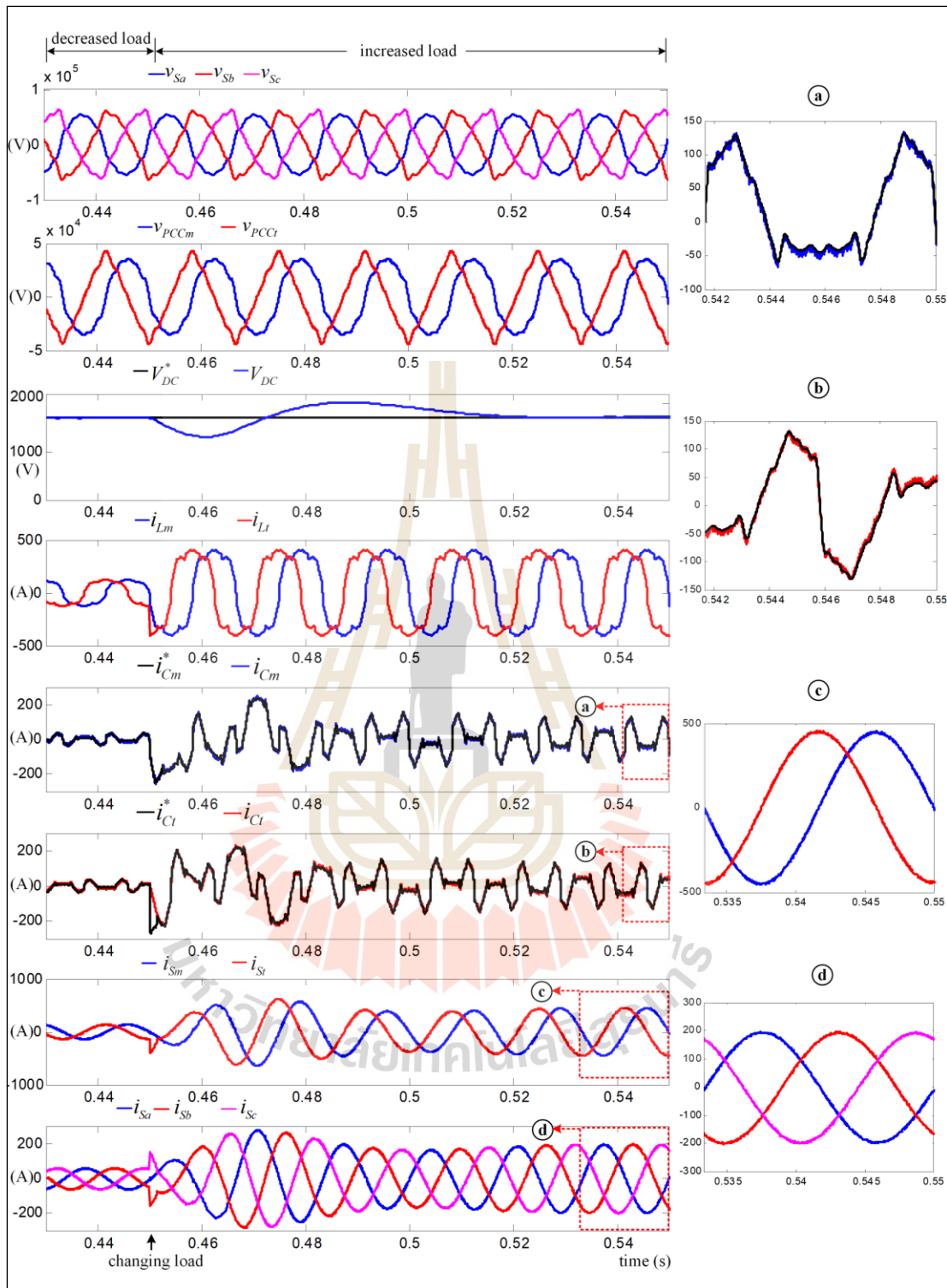
ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในกรณีกระแสโหลดลดลงจากกระแสโหลดที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 8.16 สังเกตได้ว่า ที่เวลา 0.25 วินาที มีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบทันทีทันใด ปรากฏว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ให้มีลักษณะคล้อยตามกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ได้แบบทันทีทันใด ซึ่งเป็นผลตอบสนองที่รวดเร็วในสภาวะชั่วคราว และเมื่อพิจารณาที่สภาวะอยู่ตัวพบว่า ภายหลังจากชดเชยรูปสัญญาณกระแส i_{Sm} , i_{Sr} , i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_i$ ในแต่ละเฟสอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 แสดงได้ดังตารางที่ 8.3 เนื่องจากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ให้มีลักษณะคล้อยตาม i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ ระบบที่พิจารณายังคงมีการใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงแบบสมดุล ส่งผลให้ $\%CUF$ ก่อนและหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 0% และให้ผลการปรับปรุงค่า PF ที่ดีขึ้น โดยพิจารณาจากค่า PF ที่เพิ่มขึ้นภายหลังจากชดเชย แสดงได้ดังตารางที่ 8.3



รูปที่ 8.15 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีกระแสโหลดที่พิจารณา



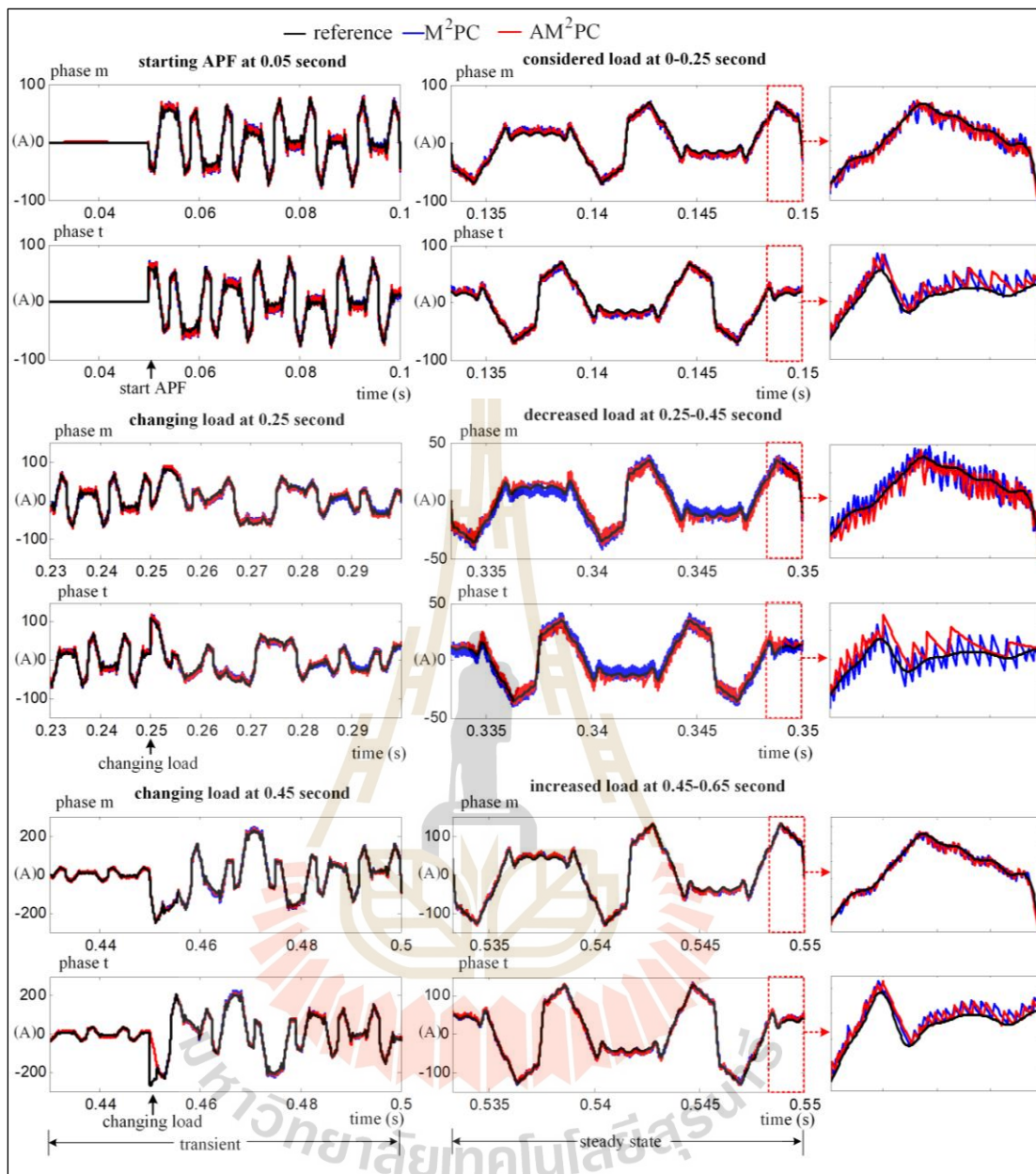
รูปที่ 8.16 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีกระแสโหลดลดลง



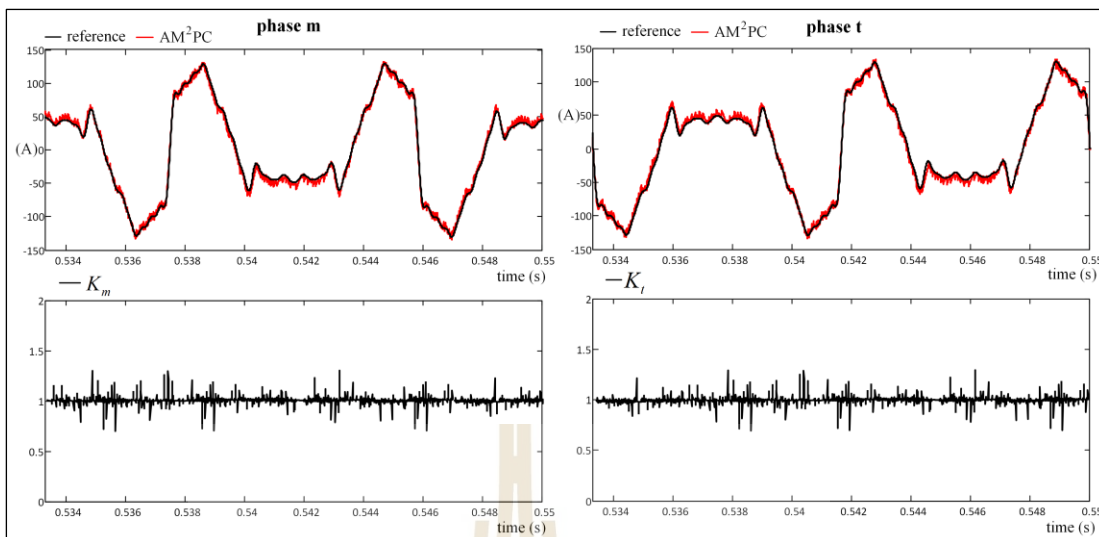
รูปที่ 8.17 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีกระแสโหลดเพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบในรูปที่ 8.17 เป็นการพิจารณาในกรณีกระแสไหลตเพิ่มขึ้นจากกระแสไหลที่พิจารณาอย่างทันทีทันใดที่เวลา 0.45 วินาที ปรากฏว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ci} ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ci}^* ได้แบบทันทีทันใดทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว ส่งผลให้รูปสัญญาณ i_{Sm} และ i_{St} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ อีกทั้งรูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} ยังมีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_i$ อยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 แสดงได้ดังตารางที่ 8.3 นอกจากนี้ ตัวประกอบกำลังภายหลังการชดเชยมีเท่ากับ 0.99 สำหรับค่า $\%CUF$ มีค่าเท่ากับ 0% ทั้งก่อนการชดเชยและภายหลังการชดเชย ในส่วนของระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ พบว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมค่าแรงดัน V_{DC} ให้ใกล้เคียงกับแรงดัน V_{DC}^* ถึงแม้ว่ากระแสไหลของระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ดังแสดงในรูปที่ 8.15 ถึง 8.17 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวกรณีไหลสมดุล สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 8.3

สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว แสดงได้ดังรูปที่ 8.18 สังเกตได้ว่า ในสภาวะชั่วคราว การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมทั้งสองให้ผลตอบสนองของกระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Ci}) ในการติดตามกระแสอ้างอิง (i_{Cm}^* , i_{Ci}^*) ที่รวดเร็ว สามารถแก้ไขปัญหาการเพิ่มขึ้นของกระแสที่แหล่งจ่ายในสภาวะชั่วคราวจากการฉีดกระแสชดเชยที่ผิดพลาดไปจากกระแสอ้างอิงของตัวควบคุมพีไอ และที่สภาวะอยู่ตัว พบว่า รูปสัญญาณกระแส i_{Cm} และ i_{Ci} จากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปสัญญาณกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ci}^* มากกว่าตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต เนื่องจากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวมีกลไกการปรับค่า K_m และ K_t ที่เหมาะสมโดยใช้ตัวควบคุมพีซีลอจิก เพื่อให้รูปสัญญาณกระแส i_{Cm} และ i_{Ci} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ci}^* ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 8.19 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ค่า K_m และ K_t มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาตามกระบวนการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีซีลอจิกที่ได้ออกแบบไว้ ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{Cm} และ i_{Ci} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ci}^* มากกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต จึงทำให้ค่า $\%THD_i$ จากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวมีค่าน้อยกว่าจากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ในทุก ๆ สภาวะกระแสไหลที่พิจารณา แสดงได้ดังตารางที่ 8.3 ผลการทดสอบดังกล่าวสามารถบ่งชี้ได้ว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวมีสมรรถนะในการควบคุมกระแสชดเชยที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต



รูปที่ 8.18 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างตัวควบคุม M^2PC และ ตัวควบคุม AM^2PC สำหรับระบบโหลดสมดุล



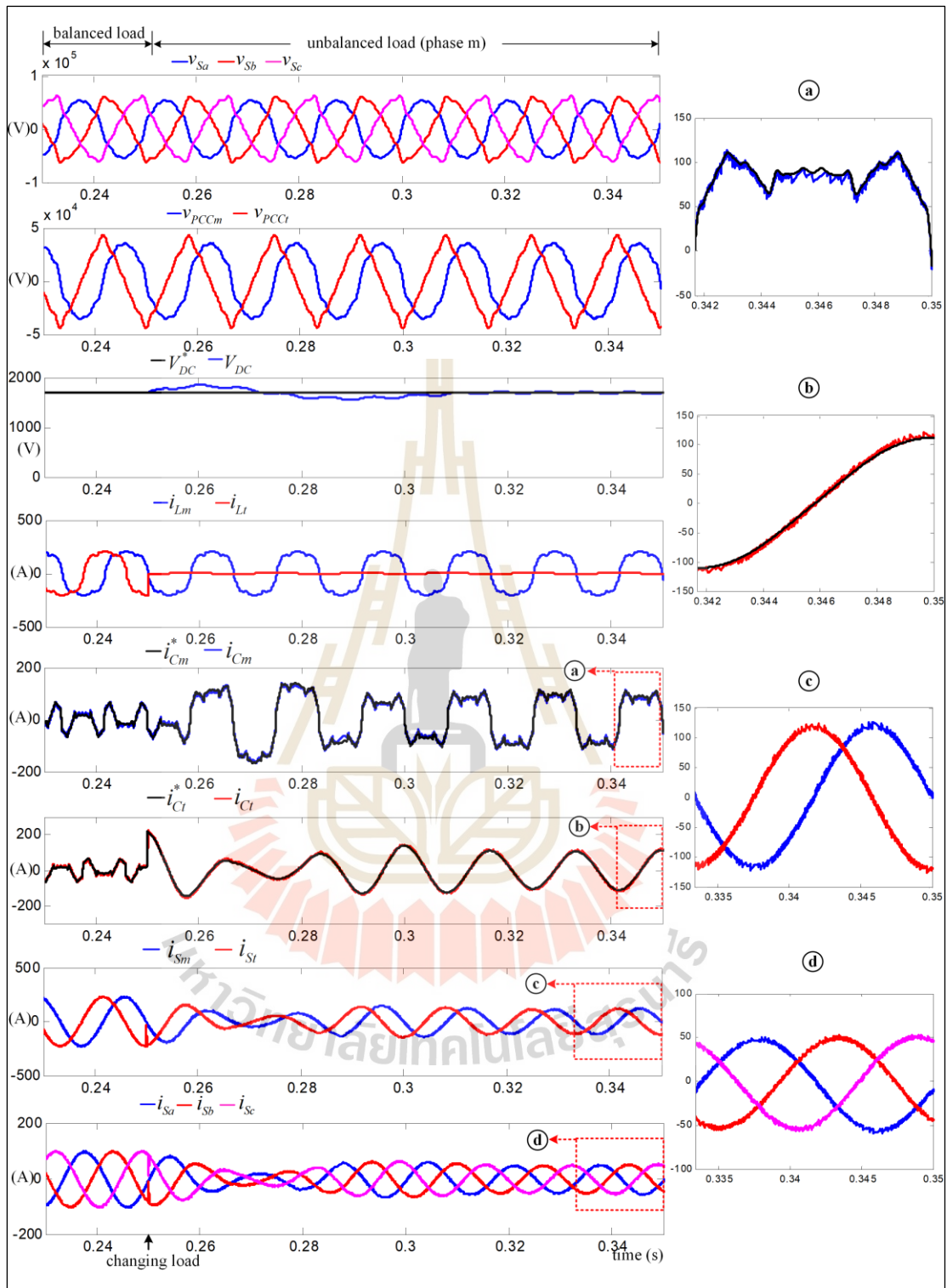
รูปที่ 8.19 ผลการปรับค่า K_m และ K_t ที่เหมาะสมด้วยตัวควบคุมฟuzzyลอจิก สำหรับระบบโหลดสมดุล

ตารางที่ 8.3 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดสมดุล ระหว่างตัวควบคุม M²PC และตัวควบคุม AM²PC

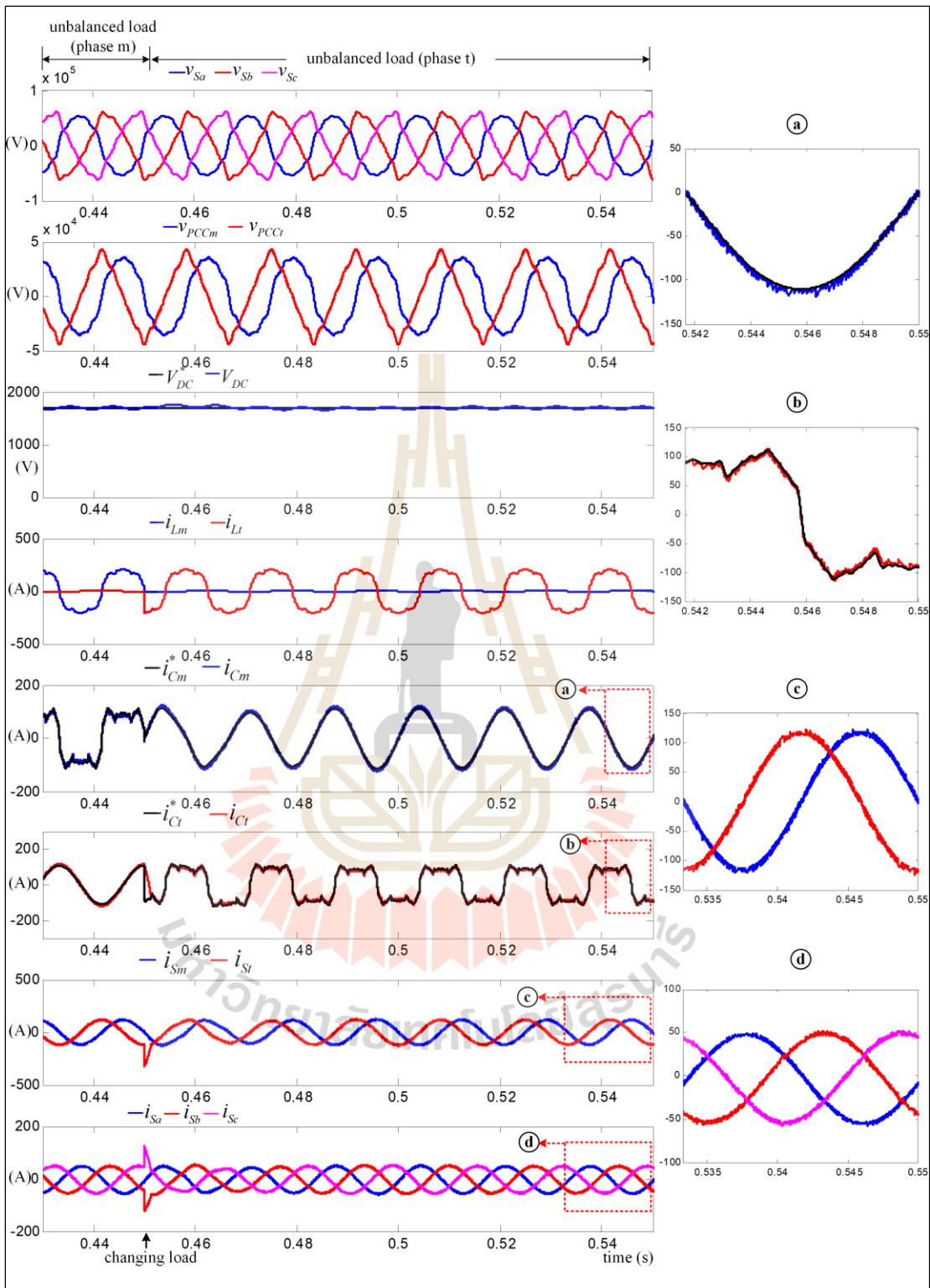
ประเภทของตัวควบคุม	สถานะของกระแสโหลด	%THD _i ด้านเฟสรวม		%THD _i ด้านสามเฟส			%CUF	PF
		เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c		
		ก่อนการชดเชย						
ควบคุมกระแสชดเชย	พิจารณา	22.23	21.21	22.19	21.51	21.33	0.00	0.976
	ลดลง	21.35	19.58	21.25	20.09	19.17	0.00	0.974
	เพิ่มขึ้น	22.77	22.22	22.75	22.39	22.29	0.00	0.976
ภายหลังการชดเชย								
M ² PC	พิจารณา	2.03	1.99	2.03	2.01	1.98	0.00	0.998
	ลดลง	3.33	3.43	3.32	3.37	3.41	0.00	0.992
	เพิ่มขึ้น	1.17	1.17	1.17	1.16	1.18	0.00	0.999
AM ² PC	พิจารณา	1.85	1.81	1.84	1.85	1.78	0.00	0.998
	ลดลง	2.67	2.74	2.65	2.74	2.66	0.00	0.993
	เพิ่มขึ้น	1.02	1.03	1.01	1.02	1.03	0.00	0.999

8.4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีโหลดไม่สมดุล

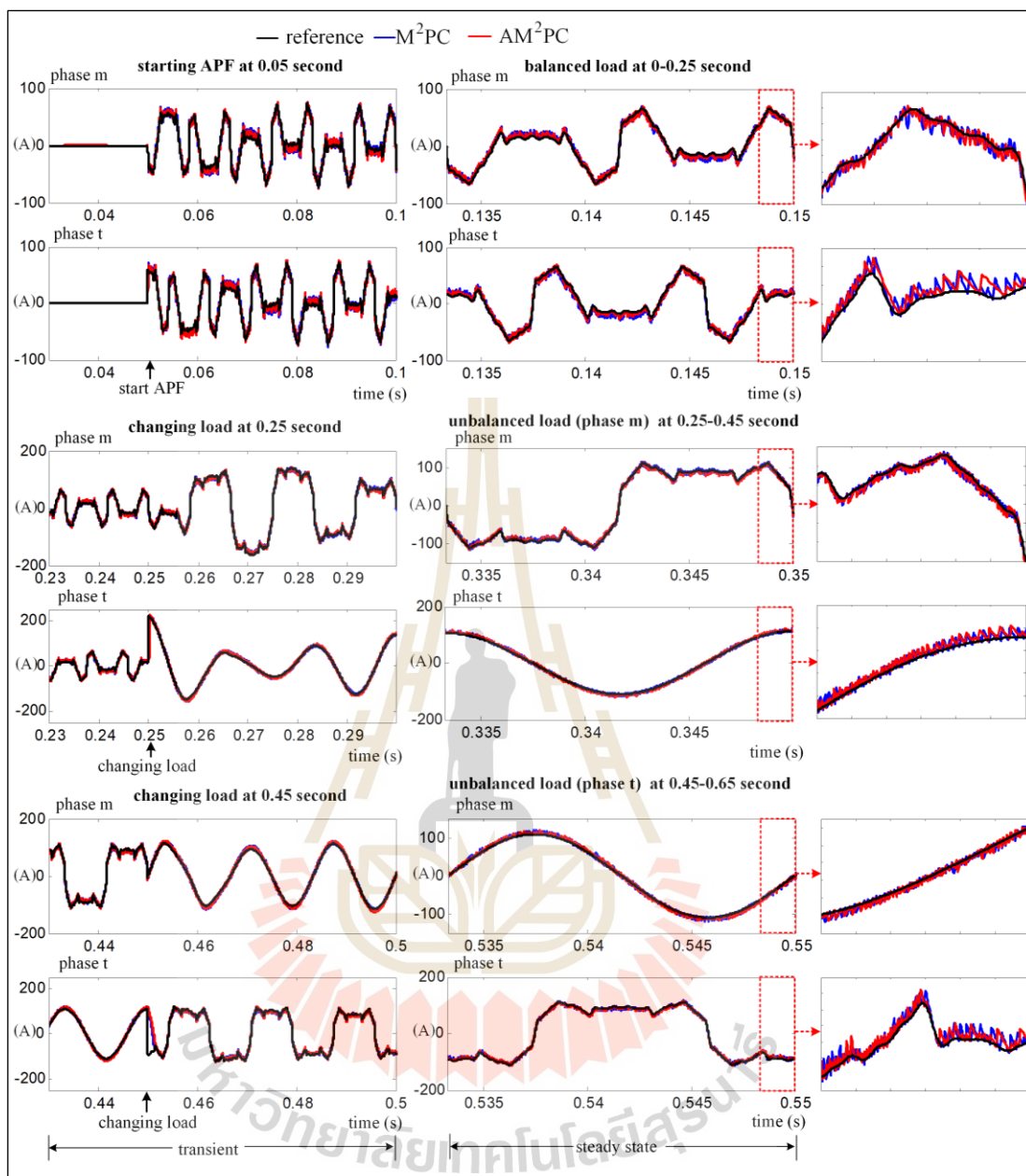
ระบบรางไฟฟ้าที่มีการจ่ายโหลดรถไฟความเร็วสูงแบบไม่สมดุล เป็นระบบทดสอบที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ โดยรูปสัญญาณแรงดัน v_{Sa} , v_{Sb} และ v_{Sc} มีค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 10.3% ทั้งสามเฟส ส่งผลให้รูปสัญญาณแรงดัน v_{PCCm} และ v_{PCCt} มีลักษณะผิดเพี้ยนตามไปด้วย โดยมีค่า $\%THD_v$ เท่ากับ 10.17% และ 10.18% ตามลำดับ และทำการพิจารณาลักษณะการจ่ายโหลดแบบไม่สมดุล ซึ่งบางช่วงของการทดสอบมีการจ่ายโหลดรถไฟเฉพาะเฟส m หรือ เฟส t เพียงหนึ่งเฟสเท่านั้น การจ่ายโหลดในลักษณะนี้ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า (รายละเอียดของระบบทดสอบดังกล่าวได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.5.4) สำหรับโครงสร้างส่วนอื่น ๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบทดสอบกรณีโหลดสมดุลตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.15 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 8.20 และ 8.21 โดยเป็นการพิจารณากรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m และกรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t ตามลำดับ เมื่อทำการพิจารณาภายหลังการฉีดกระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Ct}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเข้าสู่ระบบที่จุด PCC พบว่า ผลการฉีดกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{St} กลับมามีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์และมีลักษณะสมดุล โดยมีค่า $\%THD_i$ และ $\%CUF$ ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยในแต่เฟสลดลงจากก่อนการชดเชย และค่าดังกล่าวยังอยู่ภายใต้กรอบข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ในทุกสภาวะการเปลี่ยนของกระแสโหลด ดังแสดงในตารางที่ 8.4 ผลจากการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบความไม่สมดุลยังได้ช่วยปรับปรุงค่า PF ของระบบให้มีค่าใกล้เคียงหนึ่ง ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้างกล่าว ให้ความหมายว่า ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยรูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} สามารถกลับมา มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์และอยู่ในสภาวะสมดุล นอกจากนี้ ระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดัน V_{DC} ให้มีค่าใกล้เคียงแรงดัน V_{DC}^* ตลอดทุกช่วงการทดสอบ ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าทั้งสามช่วงการทดสอบ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 8.4



รูปที่ 8.20 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m



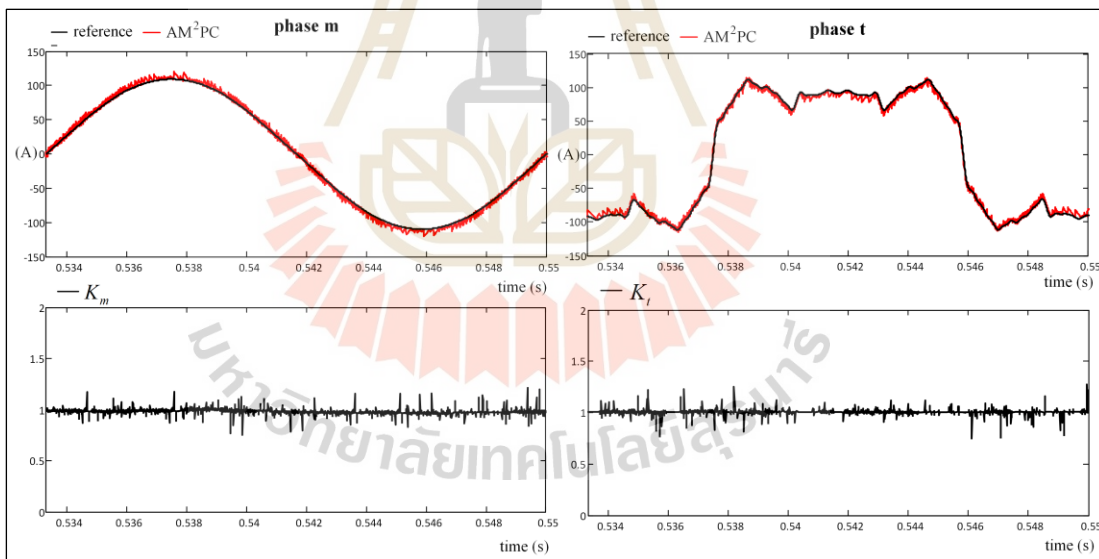
รูปที่ 8.21 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า
ด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t



รูปที่ 8.22 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างตัวควบคุม M^2PC และตัวควบคุม AM^2PC สำหรับระบบโหลดไม่สมดุล

สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตและตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว สำหรับระบบแรงไฟฟ้าที่มีการจ่ายโหลดไม่สมดุล แสดงได้ดังรูปที่ 8.22 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ในสถานะชั่วคราว ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วเช่นเดียวกับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต พิจารณาได้จากตัว

ควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ได้อย่างทันทีทันใดเมื่อกระแสไหลตเกิดเกิดการเปลี่ยนแปลง และเมื่อพิจารณาในสภาวะอยู่ตัว พบว่า กลไกการปรับค่า K_m และ K_t ที่เหมาะสมของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ดังแสดงในรูปที่ 8.23 ให้ผลการควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ให้มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปสัญญาณกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ได้ดีกว่าการใช้งานตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต อีกทั้งยังสังเกตได้ว่า ผลจากการฉีดกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวให้ค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยในแต่ละเฟสที่น้อยกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต แสดงได้ดังตารางที่ 8.4 ซึ่งค่าดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต จากผลทดสอบข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวมีประสิทธิภาพในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟในระบบแรงไฟฟ้าที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต



รูปที่ 8.23 ผลการปรับค่า K_m และ K_t ที่เหมาะสมด้วยตัวควบคุมฟuzzyลอจิก สำหรับระบบโหลดไม่สมดุล

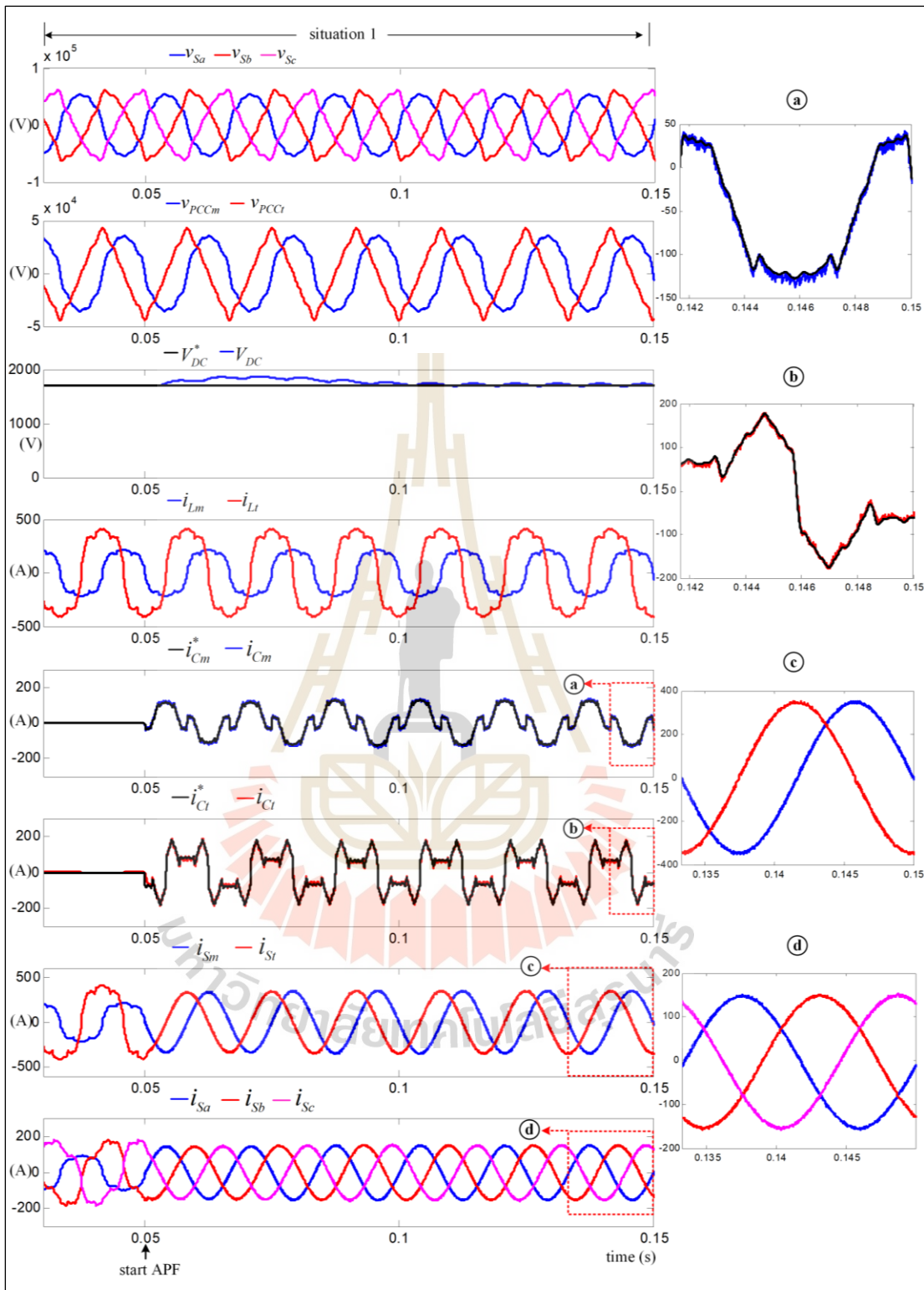
ตารางที่ 8.4 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุล ระหว่างตัวควบคุม M²PC และตัวควบคุม AM²PC

ประเภทของตัวควบคุม	สถานะของกระแสโหลด	%THD _i ด้านเฟสรวม		%THD _i ด้านสามเฟส			%CUF	PF
		เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c		
ก่อนการชดเชย								
ควบคุมกระแสชดเชย	สมดุล	22.23	21.21	22.19	21.51	21.33	0.00	0.976
	ไม่สมดุลเฟส m	22.22	0.00	22.17	20.52	24.14	95.45	0.694
	ไม่สมดุลเฟส t	0.00	21.19	8.04	21.85	20.46	95.45	0.703
ภายหลังการชดเชย								
M ² PC	สมดุล	2.03	1.99	2.03	2.01	1.98	0.00	0.998
	ไม่สมดุลเฟส m	4.08	3.85	4.05	3.83	3.94	0.23	0.990
	ไม่สมดุลเฟส t	3.93	4.06	3.91	3.95	4.05	0.25	0.990
AM ² PC	สมดุล	1.85	1.81	1.84	1.85	1.78	0.00	0.998
	ไม่สมดุลเฟส m	3.50	3.36	3.48	3.41	3.34	0.23	0.990
	ไม่สมดุลเฟส t	3.41	3.57	3.38	3.56	3.46	0.24	0.990

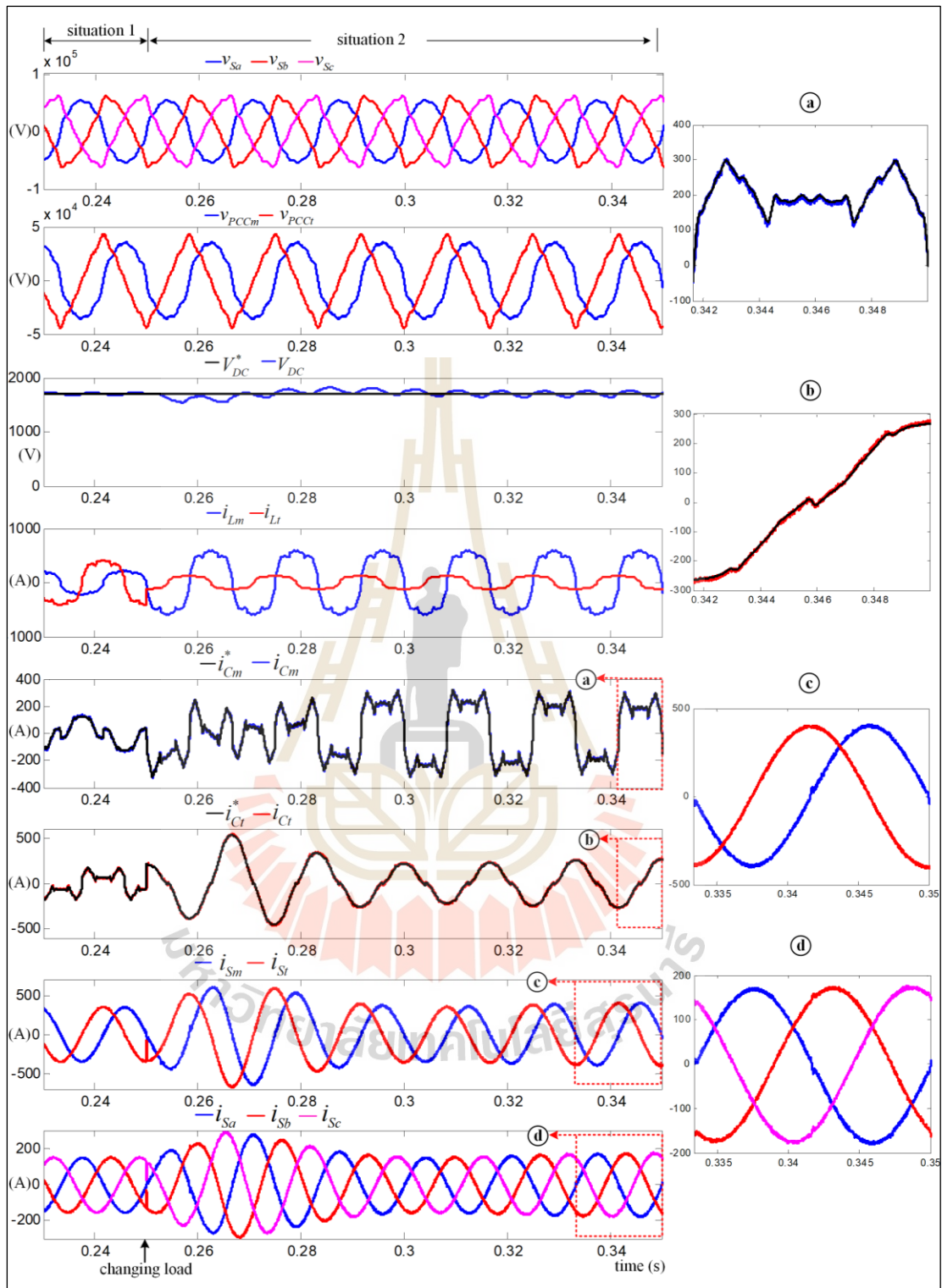
8.4.3 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสาน

ระบบรางไฟฟ้าที่มีการจ่ายโหลดรถไฟความเร็วสูงแบบผสมผสาน เป็นระบบที่พิจารณาเพื่อให้สอดคล้องลักษณะการใช้งานโหลดรถไฟความเร็วสูงแบบผสมผสานในระบบรางไฟฟ้าที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบผสมผสานอย่างทันทีทันใด โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะผิผิวไปจากรูปสัญญาณไซน์ ซึ่งมีค่า %THD_v เท่ากับ 10.3% ทั้งสามเฟส สำหรับลักษณะการจ่ายโหลดรถไฟความเร็วสูงแบบผสมผสาน ทำการพิจารณาออกเป็นสามช่วง (รายละเอียดการจ่ายโหลดรถไฟความเร็วสูงแบบผสมผสานสามารถศึกษาได้จากหัวข้อที่ 7.3.3) นอกจากนี้ โครงสร้างส่วนอื่น ๆ ของระบบรางไฟฟ้าและวงจรรองรับกำลังแอกทีฟมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบทดสอบกรณีโหลดสมดุล และโหลดไม่สมดุลตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบดังกล่าวทั้งสามช่วงการจ่ายโหลด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8.24 ถึง 8.26 ตามลำดับ

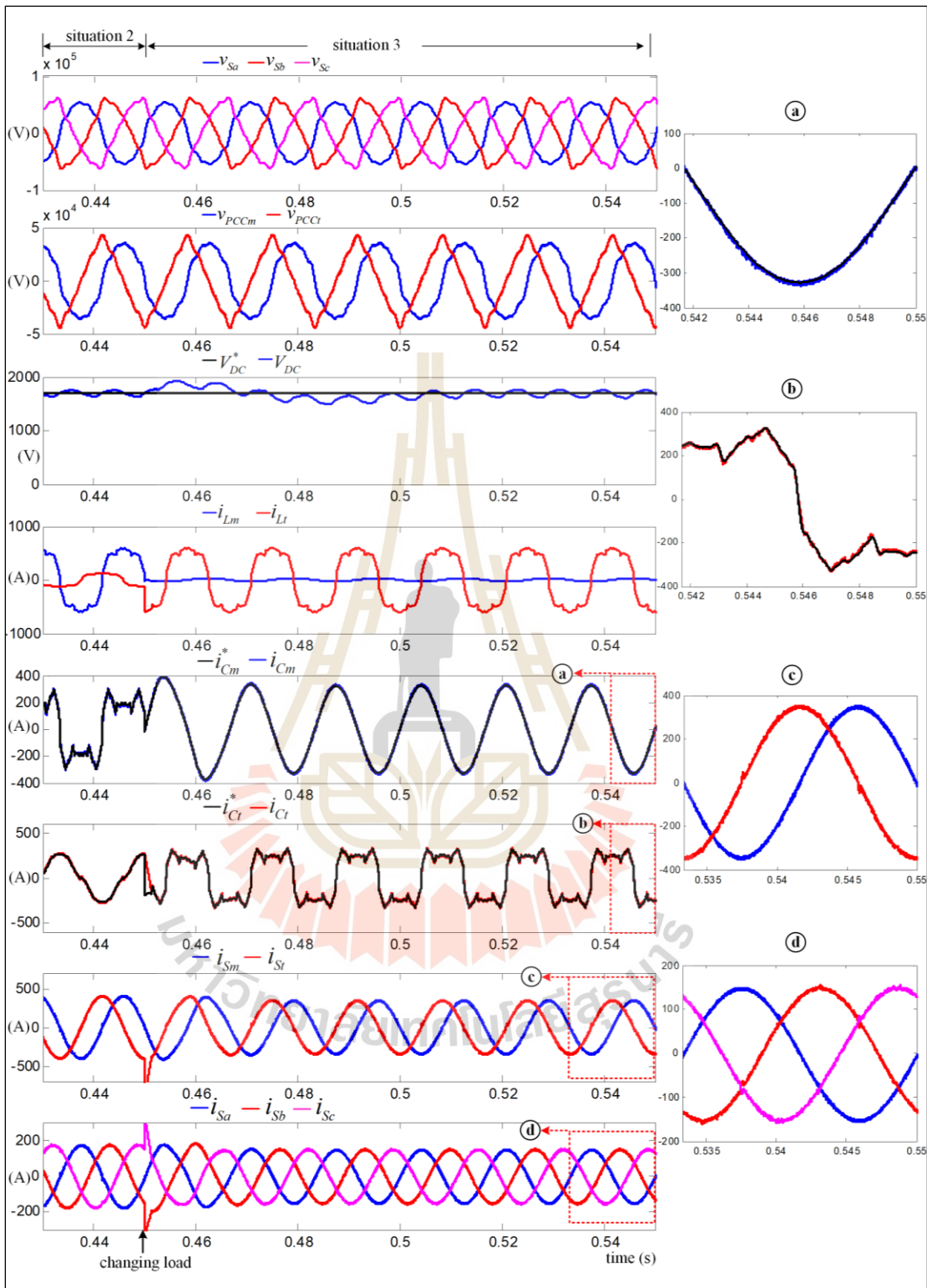
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 8.24 สังเกตได้ว่า ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบที่เวลา 0.05 วินาที เป็นต้นไป ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิง i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ได้แบบทันทีทันใดทั้งในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sm} และ i_{st} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์



รูปที่ 8.24 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานในช่วงที่ 1



รูปที่ 8.25 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานในช่วงที่ 2

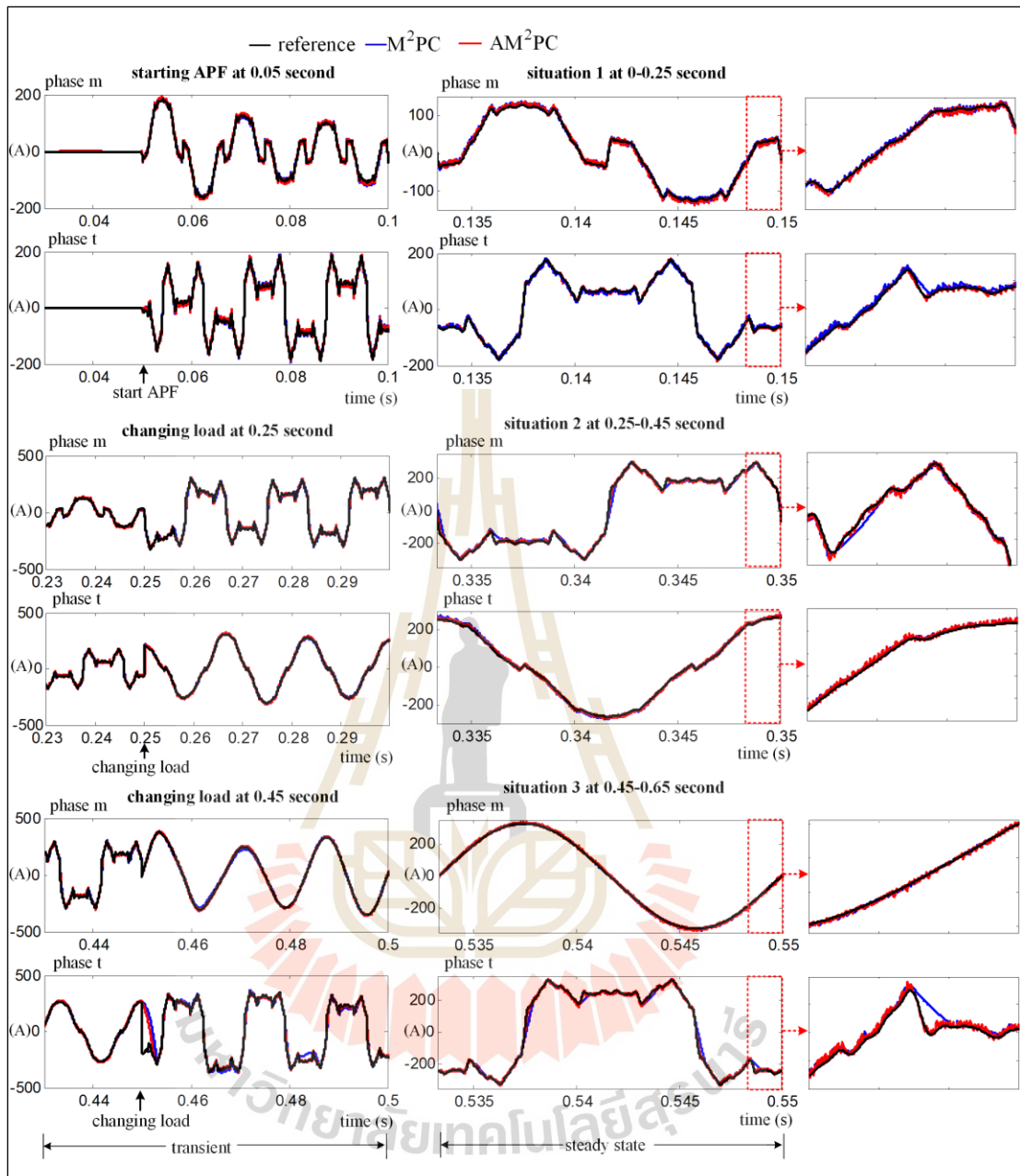


รูปที่ 8.26 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานในช่วงที่ 3

และมีขนาดสมดุล จึงทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์และมีลักษณะสมดุล โดยมีค่า %THD_i และ %CUF ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงจากก่อนการชดเชย และอยู่ภายใต้กรอบมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 นอกจากนี้ การฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบยังได้ช่วยปรับปรุงค่า PF ให้มีค่าเท่ากับ 0.999 อีกด้วย แสดงได้ดังตารางที่ 8.5

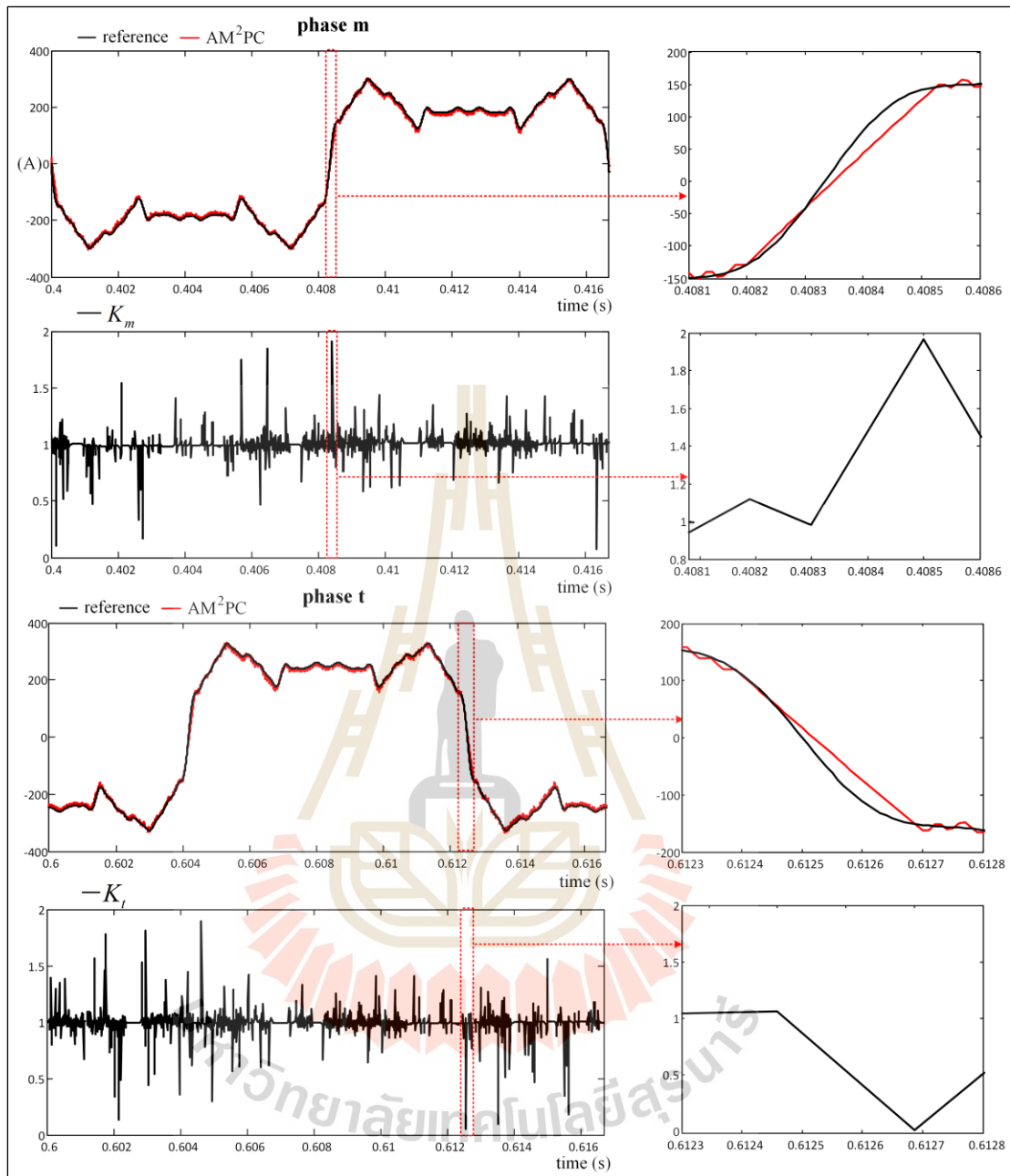
ผลการทดสอบในรูปที่ 8.25 เป็นการพิจารณาการจ่ายโหลดของระบบรางไฟฟ้า ในช่วงที่ 2 สังเกตได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบทันทีทันใดที่เวลา 0.25 วินาที ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองรวมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถควบคุมกระแส i_{cm} และ i_{ct} ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแส i_{cm}^* และ i_{ct}^* ได้แบบทันทีทันใดในสภาวะชั่วคราว และเมื่อพิจารณาสภาวะอยู่ตัว พบว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองรวมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถควบคุมกระแส i_{cm} และ i_{ct} ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแส i_{cm}^* และ i_{ct}^* ได้อย่างสมบูรณ์ โดยพิจารณาได้จาก ในช่วงที่กระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูง ตัวควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมให้กระแส i_{cm} และ i_{ct} ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแส i_{cm}^* และ i_{ct}^* ทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{sm} , i_{st} , i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ อีกทั้งผลการชดเชยดังกล่าวทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} กลับมาอยู่ในสภาวะสมดุล โดยสามารถแสดงค่า %THD_i และ %CUF ภายหลังการชดเชยได้ดังตารางที่ 8.5 ซึ่งค่าดังกล่าวยังอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 นอกจากนี้ การฉีดกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟยังช่วยปรับปรุงค่า PF ของระบบให้มีค่าใกล้เคียงหนึ่งอีกด้วย การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ 3 ได้ทำการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบทันทีทันใดที่เวลา 0.45 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 8.26 ซึ่งพบว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองรวมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถควบคุมกระแส i_{cm} และ i_{ct} ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแส i_{cm}^* และ i_{ct}^* ได้อย่างสมบูรณ์ทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sm} และ i_{st} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ เป็นผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ อีกทั้งรูปสัญญาณกระแสดังกล่าวยังมีลักษณะสมดุลอีกด้วย เมื่อทำการตรวจวัดค่า %THD_i และ %CUF ภายหลังการชดเชย พบว่า ค่าดังกล่าวมีค่าลดลงจากก่อนการชดเชย และเป็นค่าที่อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 แสดงได้ดังตารางที่ 8.5 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายยังได้ช่วยปรับปรุงค่า PF ของระบบให้ดีขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จาก PF ที่เพิ่มขึ้นภายหลังการชดเชย นอกจากนี้ ระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีโอสามารถควบคุมแรงดัน V_{DC} ให้มีค่าใกล้เคียงแรงดัน V_{DC}^* ตลอดทุกช่วงการทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 8.24 ถึง 8.26 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าทั้งสามช่วงการทดสอบ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 8.5

สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของเฟส m และเฟส t ระหว่างตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองรวมกับการมอดูเลตและตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองรวมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว แสดงได้ดังรูปที่ 8.27 จากรูปดังกล่าว ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยออกเป็นสองประเด็น คือ สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยในสภาวะ



รูปที่ 8.27 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างตัวควบคุม M^2PC และตัวควบคุม AM^2PC สำหรับระบบโหลดแบบผสมผสาน

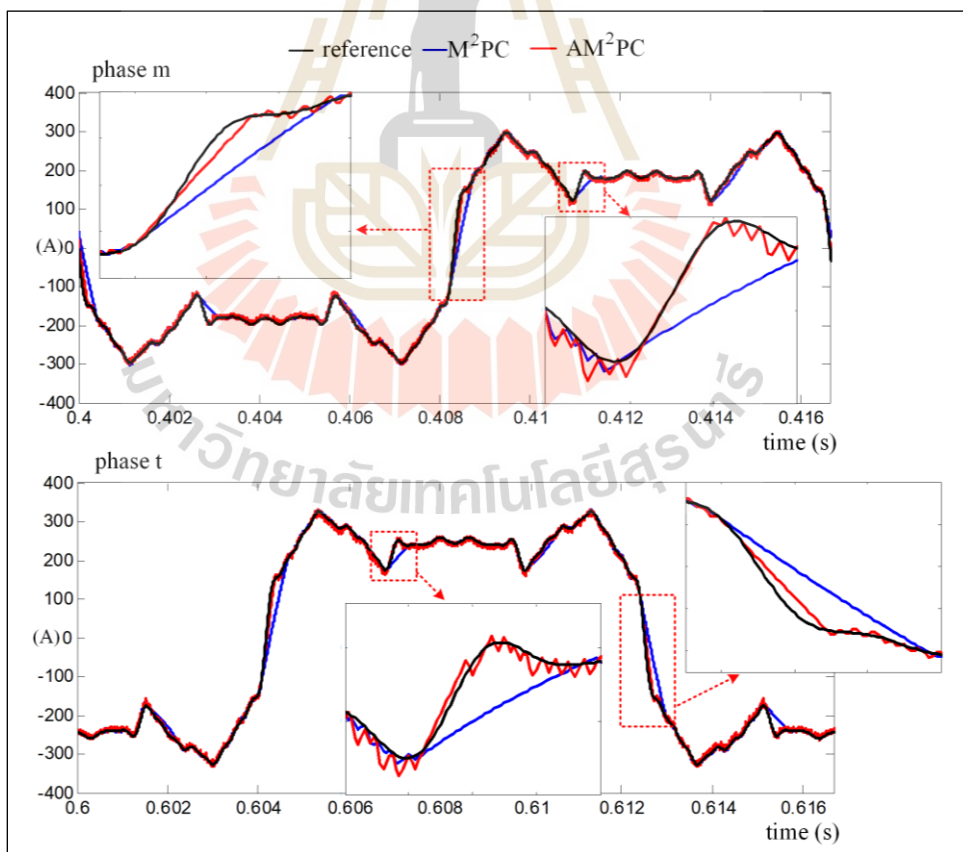
ชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัว จากผลการศึกษา พบว่า ในสภาวะชั่วคราว ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วเช่นเดียวกับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ให้มีลักษณะคล้อยตามกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ได้อย่างทันทีทันใดของตัวควบคุมทั้งสองประเภท



รูปที่ 8.28 ผลการปรับค่า K_m และ K_t ที่เหมาะสมด้วยตัวควบคุมพีซีซีลอจิก สำหรับระบบโหลดแบบผสมผสาน

เมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อพิจารณาในสถานะอยู่ตัว พบว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถควบคุมกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ให้มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ได้ดีกว่าการใช้งานตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวมีกลไกการปรับค่า K_m และ K_t ที่เหมาะสมตาม

กระบวนการของพีซีลอจิกที่ได้ออกแบบไว้ แสดงได้ดังรูปที่ 8.28 ซึ่งสังเกตได้ว่า ค่า K_m และ K_t มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา และในช่วงที่กระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณสูง ส่งผลให้ค่า K_m และ K_t มีการเปลี่ยนแปลงสูงตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่กระแสอ้างอิงมีค่ามากกว่ากระแสชดเชย จะทำให้ค่า K_m และ K_t มีค่าเพิ่มขึ้น และในกรณีที่กระแสอ้างอิงมีค่าน้อยกว่ากระแสชดเชย จะทำให้ค่า K_m และ K_t มีค่าลดลง เพื่อให้รูปสัญญาณกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณกระแส i_{Cm}^* และ i_{Ct}^* ตามลำดับ ผลจากกลไกการปรับค่า K_m และ K_t ที่เหมาะสม ทำให้ในช่วงที่กระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณสูง ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิงได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต แสดงได้ดังรูปที่ 8.29 ส่งผลให้รูปสัญญาณ i_{Sm} , i_{St} , i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} ที่ได้จากการฉีดกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวมีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มากกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่กระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณสูง ดังนั้น การควบคุมกระแส



รูปที่ 8.29 สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยในช่วงกระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงกรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสาน

ชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถแก้ไขปัญหาการควบคุมกระแสชดเชยในช่วงที่กระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณสูง ซึ่งส่งผลต่อค่า $\%THD_i$ ที่สูงเกินกรอบของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 และยังสามารถสังเกตได้ว่า ผลจากการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต โดยพิจารณาได้จาก $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยในแต่ละเฟสมีค่าน้อยกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต อีกทั้งค่า $\%THD_i$ ดังกล่าวยังอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519 - 2014 ในทุกสภาวะการเปลี่ยนของกระแสโหลด แสดงได้ดังตารางที่ 8.5 จากผลทดสอบสมรรถนะด้านการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าและสมรรถนะด้านการควบคุมกระแสชดเชยที่ได้นำเสนอข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวมีสมรรถนะในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟในระบบแรงไฟฟ้าที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต

ตารางที่ 8.5 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้ากรณีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดแบบผสมผสานระหว่างตัวควบคุม M^2PC และตัวควบคุม AM^2PC

ประเภทของตัวควบคุมกระแสชดเชย	สภาวะของกระแสโหลด	$\%THD_i$ ด้านเฟสรวม		$\%THD_i$ ด้านสามเฟส			$\%CUF$	PF
		เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c		
		ก่อนการชดเชย						
ควบคุมกระแสชดเชย	ช่วงที่ 1	21.57	22.41	21.53	22.47	22.17	30.54	0.936
	ช่วงที่ 2	22.72	20.30	22.71	21.92	22.92	63.64	0.814
	ช่วงที่ 3	22.41	22.71	18.04	22.95	22.47	94.80	0.720
ภายหลังการชดเชย								
M^2PC	ช่วงที่ 1	1.42	1.56	1.42	1.54	1.51	0.33	0.999
	ช่วงที่ 2	5.69	1.10	5.69	2.99	3.06	0.48	0.999
	ช่วงที่ 3	1.17	7.10	1.17	6.23	6.16	0.89	0.998
AM^2PC	ช่วงที่ 1	1.21	1.28	1.20	1.25	1.26	0.23	0.999
	ช่วงที่ 2	2.17	1.02	1.99	1.65	1.76	0.25	0.999
	ช่วงที่ 3	1.14	2.42	1.16	2.31	2.30	0.25	0.999

8.5 สรุป

การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบแรงไฟฟ้าจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องอาศัยระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่สามารถปรับตัวได้ตามลักษณะการใช้งานโหลด

ความเร็วสูงในระบบรางไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสไหลของระบบรางไฟฟ้าแบบผสมผสานอย่างทันทีทันใด ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟในระบบรางไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว ตัวควบคุมดังกล่าวได้รับการพัฒนามาจากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต โดยการนำตัวควบคุมฟuzzyลอจิกมาใช้เป็นกลไกในการปรับค่าอัตราขยายที่เหมาะสมให้กับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่สำคัญของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกประกอบด้วย รูปร่างฟังก์ชันสมาชิกภาพ ค่าเชิงภาษาและตัวแปรเชิงภาษา กฎของฟuzzy ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพ และการอนุมานฟuzzyได้รับการออกแบบให้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการปรับค่าอัตราขยายของระบบควบคุมกระแสชดเชย ด้วยเหตุนี้ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวจึงมีสมรรถนะในการควบคุมกระแสชดเชยให้มีค่าใกล้เคียงสัญญาณอ้างอิงที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต อีกทั้งยังคงรักษาจุดเด่นในเรื่องผลตอบสนองที่รวดเร็วและการลดการกระเพื่อมของรูปสัญญาณกระแสชดเชยของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต สามารถแก้ไขปัญหาความคลาดเคลื่อนของการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ในช่วงที่กระแสอ้างอิงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณสูง ซึ่งส่งผลต่อค่า $\%THD_i$ ที่สูงเกินกรอบของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 โดยทำการยืนยันผลการทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้เทคนิคฮาร์แวร์ในรูป นอกจากนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยการกำจัดกระแสฮาร์โมนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังและการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุลโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวกับระบบทดสอบที่มีการจ่ายโหลดของระบบรางไฟฟ้าในลักษณะสมดุล ไม่สมดุล และโหลดแบบผสมผสาน ซึ่งพบว่าตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวให้ค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่ดีกว่าจากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต และค่าดังกล่าวยังอยู่ภายใต้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEEE standard 519-2014

บทที่ 9

ชุดทดสอบและผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

9.1 บทนำ

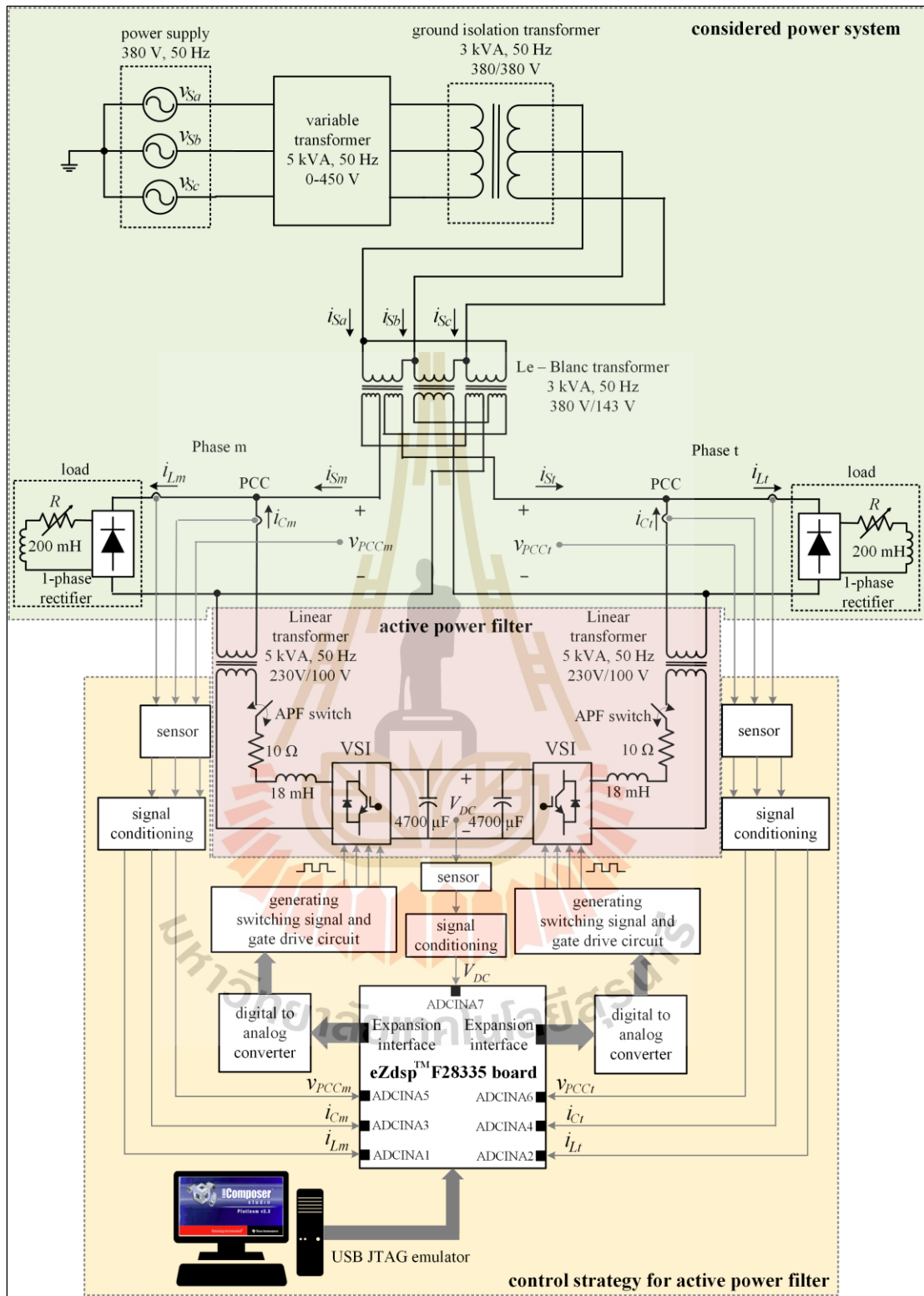
ในบทนี้ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลัง แอ็กทีฟในห้องปฏิบัติการ ซึ่งทำการปรับลดพิกัดจากระบบแรงไฟฟ้าจากการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป และโหลดรวมความเร็วสูงของระบบแรงไฟฟ้าจะแทนด้วยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน รายละเอียดการสร้างชุดทดสอบถูกนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 9.2 โดยชุดทดสอบดังกล่าวได้แบ่งการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีกระแสโหลดสมดุล และกรณีกระแสโหลดไม่สมดุล โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ (นำเสนอไว้ในบทที่ 5) ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง (นำเสนอไว้ในบทที่ 6) ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับมอดูเลต (นำเสนอไว้ในบทที่ 7) และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับมอดูเลตเชิงปรับตัว (นำเสนอไว้ในบทที่ 8) เพื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของตัวควบคุมดังกล่าว นอกจากนี้ ในส่วนของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟจะใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการกรณีโหลดสมดุลและโหลดไม่สมดุลได้ถูกนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 9.3 และ 9.4 ตามลำดับ

9.2 การสร้างชุดทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

โครงสร้างชุดทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ แสดงได้ดังรูปที่ 9.1 จากรูปดังกล่าว สามารถแบ่งชุดทดสอบออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟ และระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟ รายละเอียดขององค์ประกอบทั้ง 3 ส่วน สามารถอธิบายได้ดังนี้

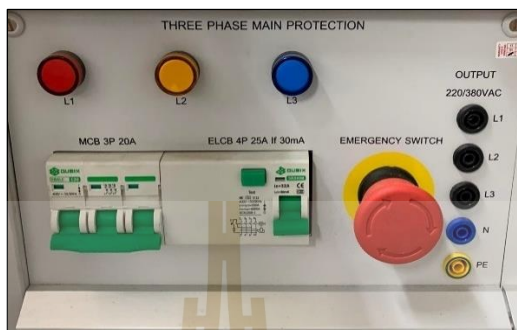
9.2.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา มีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบคงค่าแรงดันไฟฟ้าถูกต่อเข้ากับหม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้ (AC variable transformer) เอาต์พุตของหม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้ถูกต่อเข้ากับหม้อแปลงแยกกราวด์ (ground isolation transformer) เพื่อทำหน้าที่แยกกราวด์ระบบการทดสอบออกจากระบบไฟฟ้าหลักของห้องปฏิบัติการ จากนั้นทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่หม้อแปลงเลอบลองค์ (Le-Blanc transformer) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าและแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวมเพื่อป้อนให้กับชุดโหลดของระบบในแต่ละเฟส ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส (single-phase rectifier) ที่มีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน โดยขนาดของกระแสโหลดสามารถปรับได้จากค่าความต้านทาน อุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่ได้นำเสนอข้างต้นสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 9.1 โครงสร้างชุดทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์ที่ 1: แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบคงค่าแรงดันไฟฟ้า พิกัดแรงดันไฟฟ้า 380 V และมีความถี่ 50 Hz ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสให้กับระบบทดสอบที่พิจารณา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.2



รูปที่ 9.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบคงค่าแรงดันไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ 2: หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้ที่มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 5 kVA และมีความถี่ 50 Hz โดยทางด้านอินพุตสามารถรับแรงดันได้สูงสุด 415 V ในส่วนทางด้านเอาต์พุตสามารถปรับค่าได้ในช่วง 0-450 V ซึ่งหม้อแปลงดังกล่าวถูกใช้ในการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสรวมมีค่าเท่ากับ 100 V หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้ที่ใช้งานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้แสดงได้ดังรูปที่ 9.3



รูปที่ 9.3 หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้

อุปกรณ์ที่ 3: หม้อแปลงแยกกราวด์ ใช้สำหรับการแยกกราวด์ระบบไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการออกจากกราวด์ของระบบทดสอบ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ และลดปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อชุดทดสอบ ซึ่งได้เลือกใช้หม้อแปลงแยกกราวด์พิกัด 3 kVA ความถี่ 50 Hz ที่มีอัตราส่วนขดลวด 1 ต่อ 1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.4



รูปที่ 9.4 หม้อแปลงแยกกราวด์

อุปกรณ์ที่ 4: หม้อแปลงเลอบลองค์ มีพิกัดกำลังไฟฟ้า 3 kVA ความถี่ 50 Hz ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้าและแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวม (เฟส m และเฟส t) ที่มีแอมพลิจูดของแรงดันเฟส m และเฟส t เท่ากัน แต่มีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสรวมดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า หม้อแปลงเลอบลองค์มีคุณสมบัติในการรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเฟสรวม ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการออกแบบหม้อแปลงเลอบลองค์โดยอ้างอิงอัตราส่วนขดลวดจากระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาในการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบ ดังนั้น หม้อแปลงเลอบลองค์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจึงมีค่าแรงดันไฟฟ้า 380 V / 143 V รูปร่างของของหม้อแปลงดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 9.5



รูปที่ 9.5 หม้อแปลงเลอบลองค์

อุปกรณ์ที่ 5: ชุดโหลดของระบบทดสอบ ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส ทำหน้าที่เป็นโหลดของชุดทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 9.6 โดยวงจรดังกล่าวถูกใช้สำหรับการแปลง แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสทางด้านเฟสรวมเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นทำการจ่าย แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับตัวเหนี่ยวนำขนาด 200 mH พิกัด 5 A ดังรูปที่ 9.7 ที่ต่ออนุกรมกับชุด หลอดไฟ ดังแสดงในรูปที่ 9.8 ชุดหลอดไฟดังกล่าวจะทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวต้านทานที่สามารถ ปรับค่าได้ด้วยการเปิดปิดหลอดไฟ เมื่อทำการเปิดหลอดไฟจำนวนหนึ่งดวงจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ โหลดมีค่าเท่ากับ 0.25 A



รูปที่ 9.6 วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส



รูปที่ 9.7 ตัวเหนี่ยวนำขนาด 200 mH



รูปที่ 9.8 ชุดหลอดไฟ

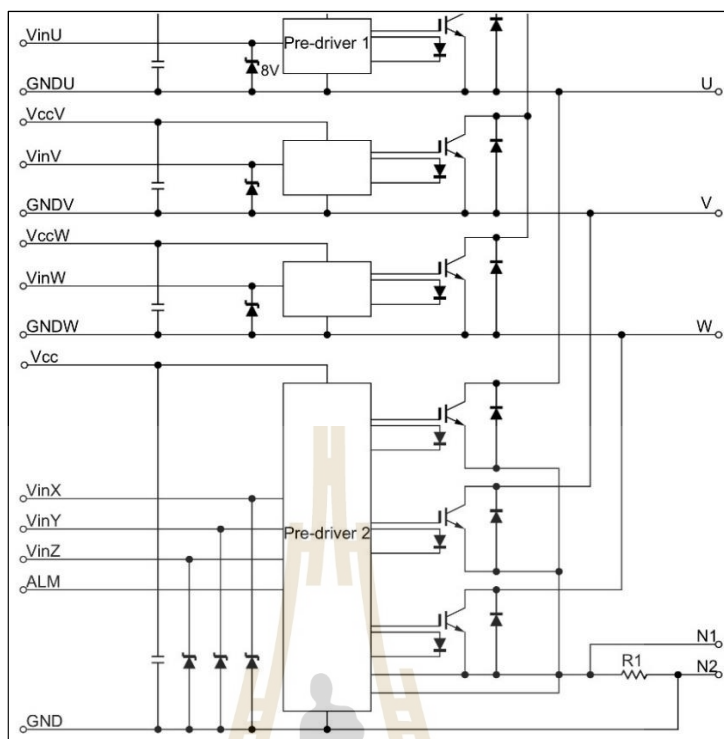
9.2.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของชุดทดสอบ มีลักษณะโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage Source Inverter: VSI) จำนวน 2 ชุด ที่มีการใช้ตัวเก็บประจุร่วมกัน ซึ่งวงจรอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดมีไอจีบีที (IGBT) จำนวน 4 ตัว ต่อเรียงกันแบบบริดจ์ ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรดังกล่าวเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านเฟสรวม และชุดโหลดของระบบทดสอบที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) ผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ตัวต้านทานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และหม้อแปลงเชิงเส้น (linear transformer) การฉีดกระแสชดเชยผ่านหม้อแปลงเชิงเส้นจะช่วยลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมทางด้านวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ส่งผลให้แรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีขนาดลดลง โดยกระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Cl}) จะไหลจากแรงดันเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานไปยังแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (v_{PCCm} , v_{PCCl}) โดยผ่านกระบวนการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงเชิงเส้นตามอัตราส่วนของขดลวด ค่ากระแส i_{Cm} และ i_{Cl} จะนำไปหักลบกับกระแสโหลด (i_{Lm} , i_{Ll}) เพื่อปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าทางด้านเฟสรวมหรือทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเลอบลองค์ (i_{Sm} , i_{Sl}) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายหรือทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเลอบลองค์ (i_{Sa} , i_{Sb} , i_{Sc}) โดยมีตัวเก็บประจุ (C_{DC}) ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ อุปกรณ์ไฟฟ้าในส่วนของวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถแสดงได้ดังนี้

อุปกรณ์ที่ 1: วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ได้เลือกใช้เป็นไอจีบีทีมอดูล รุ่น Fuji 6MBP50RA060-55 ดังแสดงในรูปที่ 9.9 ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 600 V และกระแสไฟฟ้า 50 A จุดเด่นของไอจีบีทีมอดูลดังกล่าว คือ มีระบบป้องกันการลัดวงจรอยู่ภายใน แสดงได้ดังรูปที่ 9.10 ซึ่งสามารถป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการทดสอบ



รูปที่ 9.9 ไอจีบีทีมอดูล รุ่น Fuji 6MBP50RA060-55



รูปที่ 9.10 ไดอะแกรมของไอจีบีทีโมดูล รุ่น Fuji 6MBP50RA060-55

อุปกรณ์ที่ 2: ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ทำหน้าที่ลดการกระเพื่อมของรูปสัญญาณกระแส i_{Cm} และ i_{Ci} โดยมีพิกัดกระแส 10 A และมีขนาด 18 mH แสดงได้ดังรูปที่ 9.11 การออกแบบขนาดของตัวเหนี่ยวนำสามารถศึกษาได้ตามที่นำเสนอไว้ในบทที่ 5

อุปกรณ์ที่ 3: ตัวต้านทานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ทำหน้าที่เพิ่มการหน่วงของกระแสชดเชย ส่งผลให้ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสามารถควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าใกล้แรงดันบัสไฟอ้างอิงได้เร็วขึ้น โดยตัวต้านทานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้มีขนาด 10 Ω พิกัด 200 W แสดงได้ดังรูปที่ 9.12



รูปที่ 9.11 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 9.12 ตัวต้านทานของวงจรรองกำลังแอกทีฟ

อุปกรณ์ที่ 4: หม้อแปลงเชิงเส้นมีพิกัดกำลังไฟฟ้า 5 kVA ความถี่ 50 Hz ที่มีอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้า 230 V / 100 V ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อรวมทางด้านวงจรรองกำลังแอกทีฟ ส่งผลให้แรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟมีขนาดลดลง โดยหม้อแปลงเชิงเส้นดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.13

อุปกรณ์ที่ 5: ตัวเก็บประจุของวงจรรองกำลังแอกทีฟ แสดงได้ดังรูปที่ 9.14 ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟ โดยจ่ายแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) ให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟสำหรับการฉีดกระแสชดเชย ตัวเก็บประจุดังกล่าวมีขนาด 4700 μF พิกัดแรงดันไฟฟ้า 400 V จำนวน 2 ตัว ต่อขนานกันเพื่อเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟ แสดงได้ดังรูปที่ 9.14



รูปที่ 9.13 หม้อแปลงเชิงเส้น



รูปที่ 9.14 ตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

9.2.3 ระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ประกอบด้วย ระบบควบคุมกระแสชดเชย และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของไอจีบีทีด้วยการควบคุมสัญญาณการสวิตช์ เพื่อวัตถุประสงค์ในการควบคุมกระแสชดเชยให้สามารถปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าได้ตามต้องการ และสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง การดำเนินการในส่วน of ระบบควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1: ตรวจวัดค่าทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่มีผลต่อการคำนวณกระแสอ้างอิง การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (V_{PCCm} , V_{PCCt}) กระแสโหลด (i_{Lm} , i_{Lt}) กระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Ct}) และแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC})

ขั้นที่ 2: ปรับลดขนาดค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจรู้ด้วยวงจรแปลงสัญญาณ (signal conditioning) เพื่อให้ค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงการรับค่าของบอร์ด eZdspTMF28335

ขั้นที่ 3: ดำเนินประมวลผลทางดิจิตอลบนบอร์ด eZdspTMF28335 ด้วยโปรแกรมภาษาซีที่เขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรม Code Composer Studio v3.3 (CCS3.3) การประมวลผลทางดิจิตอลประกอบด้วย การคำนวณกระแสอ้างอิง การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

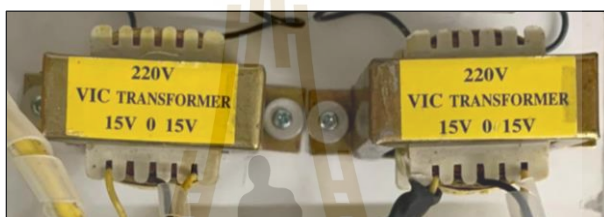
ขั้นที่ 4: ทำการส่งข้อมูลจากบอร์ด eZdspTMF28335 ให้กับตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก (digital to analog converter: DAC) สัญญาณแอนะล็อกที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการสร้างสัญญาณการสวิตช์

ขั้นที่ 5: สร้างสัญญาณการสวิตช์และทำการแยกโหนดสัญญาณด้วยวงจรขับเกต (gate drive circuit) เพื่อแยกกราวด์ของวงจรถูกนำออกจากวงจรควบคุม จากนั้นนำสัญญาณการสวิตช์ที่

ผ่านการแยกโหนดสัญญาณไปใช้ในการควบคุมไอจีบีที เพื่อควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลัง แยกทีฟ

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับระบบควบคุมของวงจรรองกำลังแยกทีฟทั้ง 5 ชั้นตอน สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

อุปกรณ์ที่ 1: ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าทำหน้าที่ตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (v_{PCCm} , v_{PCCl}) จากนั้นทำการส่งค่าแรงดันดังกล่าวไปยังวงจรแปลงสัญญาณ ในงานวิจัย วิทยานิพนธ์นี้จะใช้หม้อแปลงแท็บกลาง (center-tapped transformer) ชนิดลดแรงดันไฟฟ้า ที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ เท่ากับ 220 V และ 15 V ตามลำดับ ส่วนพิกัดกระแสทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 1 A แสดงได้ดังรูปที่ 9.15



รูปที่ 9.15 หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดแรงดัน v_{PCCm} และ v_{PCCl}

อุปกรณ์ที่ 2: ตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการตรวจวัดกระแสโหลด (i_{Lm} , i_{Lu}) และกระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Cl}) ใช้ตัวตรวจวัดกระแสรุ่น LEM HX15-P ซึ่งมีย่านการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 15 A และแปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นแรงดันไฟฟ้าเพื่อส่งต่อให้กับวงจรแปลงสัญญาณ รูปร่างของตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 9.16



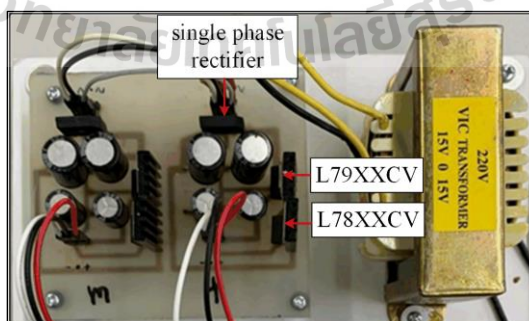
รูปที่ 9.16 ตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้าวรุ่น LEM HX15-P

อุปกรณ์ที่ 3: ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่ตรวจวัดค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟ ดังนั้น ตัวตรวจวัดแรงดันดังกล่าวจะต้องมีย่านการตรวจวัดที่ครอบคลุมค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอคทีฟ จึงเลือกใช้ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงรุ่น LEM LV-25P ซึ่งมีย่านการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 10 ถึง 500 V แสดงได้ดังรูปที่ 9.17



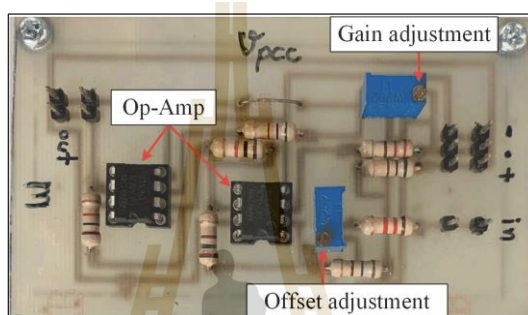
รูปที่ 9.17 ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงรุ่น LEM LV-25P

อุปกรณ์ที่ 4: แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่จ่ายไฟเลี้ยงให้กับตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้า ตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไอซีต่าง ๆ ประกอบด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 220 V เป็น 15 V จากนั้นส่งแรงดันไฟฟ้าขนาด 15 V เข้าสู่วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แล้วทำการส่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ตัวรักษาระดับแรงดันด้วยไอซี L78XXCV สำหรับแรงดันไฟบวก และไอซี L79XXCV สำหรับแรงดันไฟลบ โดยมีตัวเก็บประจุขนาด $220 \mu\text{F}$ พิกัด 50 V ทำหน้าที่ลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้างกล่าว วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแสดงได้ดังรูปที่ 9.18



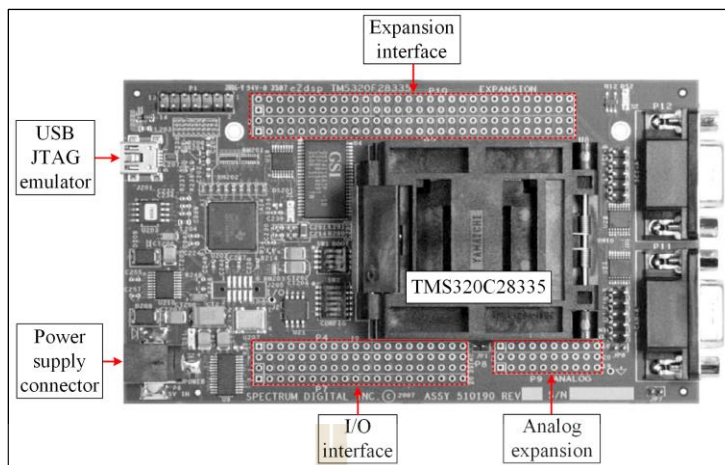
รูปที่ 9.18 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

อุปกรณ์ที่ 5: วงจรปรุ่่งแต่งสัญญาณทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าจากตัวตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและตัวตรวจวัดกระแสไฟฟ้าให้มีรูปสัญญาณอยู่ในช่วงการรับค่าทางไฟฟ้าของบอร์ด eZdsp™F28335 ที่สามารถรับข้อมูลได้เฉพาะซีกบวก และอยู่ในช่วงแรงดัน 0 ถึง 3.3 V ดังนั้น วงจรปรุ่่งแต่งสัญญาณจึงปรับลดขนาดและยกระดับรูปสัญญาณ v_{PCCm} , v_{PCCl} , V_{DC} , i_{Lm} , i_{Ll} , i_{Cm} และ i_{Cl} ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 3.3 V โดยโครงสร้างของวงจรปรุ่่งแต่งสัญญาณประกอบด้วย ออปแอมป์ รุ่น Texas instruments UA741CN และตัวต้านทาน แสดงได้ดังรูปที่ 9.19 โดยที่ การออกแบบค่าความต้านทานสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยของภักดี สวัสดิ์นะที่ (ภักดี สวัสดิ์นะที่, 2556)



รูปที่ 9.19 วงจรปรุ่่งแต่งสัญญาณ

อุปกรณ์ที่ 6: บอร์ด eZdsp™F28335 ที่ทำหน้าที่ในการคำนวณกระแสอ้างอิง การควบคุมกระแสชดเชย และการแรงดันบัสไฟตรง มีโครงสร้างสถาปัตยกรรมแสดงได้ดังรูปที่ 9.20 โดยบอร์ด eZdsp™F28335 มีส่วนประมวลผลกลางรุ่น TMS320C28335 ซึ่งเป็นรุ่นเดียวกับการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในชิปที่มีความเร็วในการประมวลผล 150 MHz และมีความละเอียดของข้อมูลที่ประมวลผล 32 บิต นอกจากนี้ มีส่วนเชื่อมต่อสัญญาณแอนะล็อก จากภายนอกโดยตรง (analog expansion) จำนวน 30 ช่องสัญญาณ ซึ่งมีขนาดความแยกชัดในแต่ละช่องการรับสัญญาณเท่ากับ 12 บิต โดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 4095 ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ช่องการเชื่อมต่อแอนะล็อกจำนวน 7 ช่องสัญญาณ ได้แก่ ADCINA1 ถึง ADCINA7 สำหรับรับสัญญาณ i_{Lm} , i_{Ll} , i_{Cm} , i_{Cl} , v_{PCCm} , v_{PCCl} และ V_{DC} จากวงจรปรุ่่งแต่งสัญญาณ ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 9.1 ค่าดังกล่าวจะถูกใช้ในการคำนวณกระแสอ้างอิง การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ตามการโปรแกรมสำหรับระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ซึ่งสามารถแสดงไดอะแกรมการโปรแกรมได้ดังรูปที่ 9.21 จากรูปดังกล่าวสามารถอธิบายขั้นตอนการดำเนินการของโปรแกรมสำหรับระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟได้ดังนี้



รูปที่ 9.20 โครงสร้างสถาปัตยกรรมบอร์ด eZdsp™F28335

ขั้นที่ 1: ประกาศฟังก์ชันสำหรับการใช้งานบอร์ด eZdsp™F28335 และฟังก์ชันมาตรฐานของการโปรแกรมด้วยภาษาซี

ขั้นที่ 2: กำหนดตัวแปรและค่าเริ่มต้นของตัวแปรสำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิง การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

ขั้นที่ 3: รับค่ากระแสไหล (i_{Lm} , i_{Lu}) กระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Cl}) แรงดันที่จุดต่อร่วม (v_{PCCm} , v_{PCCl}) และแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) ซึ่งเป็นสัญญาณแอนะล็อกผ่านทางช่องการเชื่อมต่อแอนะล็อกของบอร์ด eZdsp™F28335

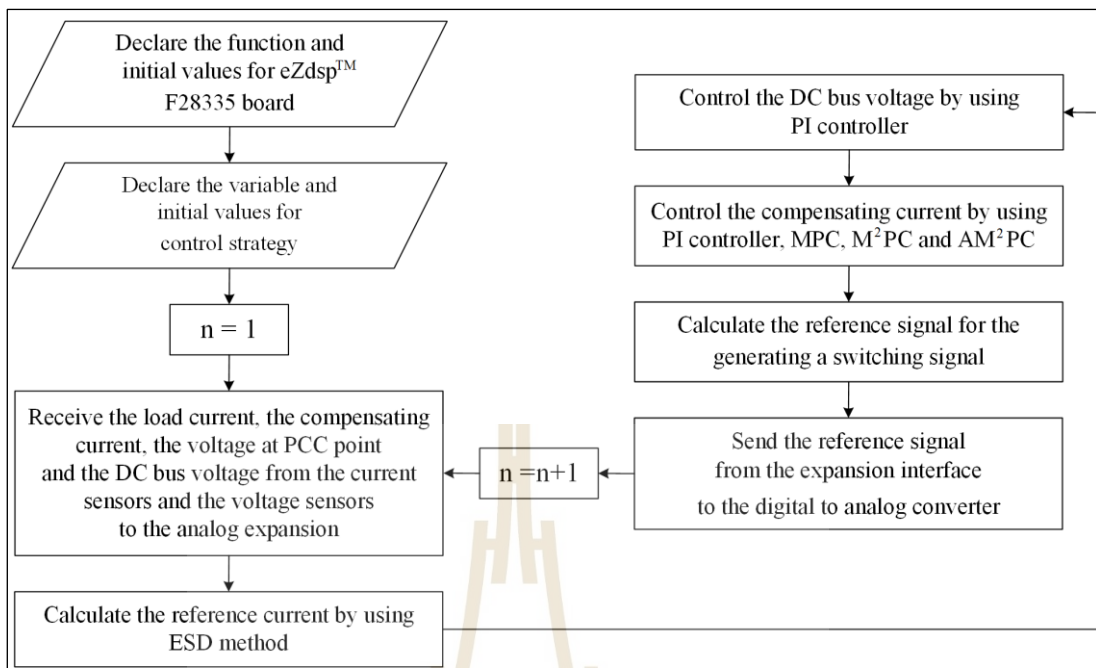
ขั้นที่ 4: คำนวณค่ากระแสอ้างอิง (i_{Cm}^* , i_{Cl}^*) ด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ (ESD method) โดยขั้นตอนการคำนวณได้นำเสนอไว้ละเอียดในบทที่ 4

ขั้นที่ 5: คำนวณค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีโอ (i_{DCm} , i_{DCl}) ในส่วนของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งรายละเอียดการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอและกระบวนการคำนวณค่า i_{DCm} และ i_{DCl} สามารถศึกษาในหัวข้อที่ 5.4.2 ของบทที่ 5

ขั้นที่ 6: ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (i_{Cm} , i_{Cl}) ให้มีลักษณะคล้ายตามกระแสอ้างอิงโดยใช้ตัวควบคุมพีโอ (นำเสนอไว้ในบทที่ 5) ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง (นำเสนอไว้ในบทที่ 6) ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต (นำเสนอไว้ในบทที่ 7) และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว (นำเสนอไว้ในบทที่ 8)

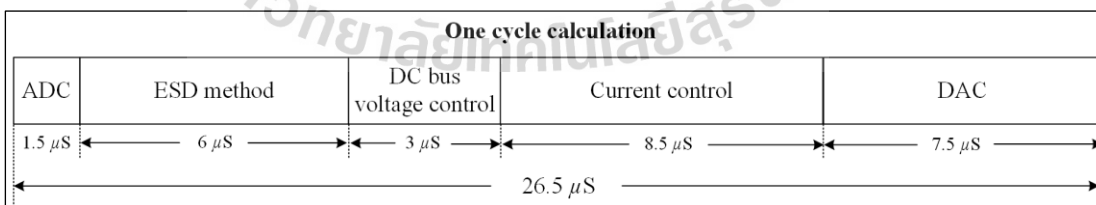
ขั้นที่ 7: คำนวณค่าสัญญาณอ้างอิงในการสร้างสัญญาณการสวิตช์ ซึ่งการสร้างสัญญาณการสวิตช์จะขึ้นอยู่กับประเภทของตัวควบคุมกระแสชดเชย

ขั้นที่ 8: ส่งค่าสัญญาณอ้างอิงในการสร้างสัญญาณการสวิตช์ออกจากบอร์ด eZdsp™F28335 ในรูปแบบสัญญาณดิจิทัลด้วยช่องการเชื่อมต่อ expansion interface ให้กับตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก

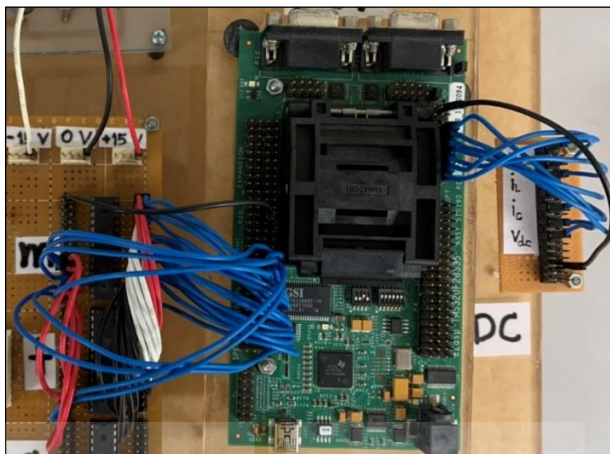


รูปที่ 9.21 ไตอะแกรมการโปรแกรมสำหรับระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

โปรแกรมสำหรับระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟทั้ง 8 ขั้นตอนที่น่าเสนอข้างต้น เป็นกระบวนการในหนึ่งรอบการทำงานของบอร์ด eZdsp™F28335 ซึ่งใช้เวลาในการประมวลผลต่อหนึ่งรอบการทำงานเท่ากับ 26.5 ไมโครวินาที โดยสามารถแสดงเวลาในแต่ละส่วนของการคำนวณได้ดังรูปที่ 9.22 นอกจากนี้ ยังสามารถแสดงลักษณะการเชื่อมต่อ analog expansion และ expansion interface ของบอร์ด eZdsp™F28335 ดังรูปที่ 9.23



รูปที่ 9.22 เวลาในหนึ่งรอบการคำนวณของโปรแกรมสำหรับระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 9.23 การเชื่อมต่อ analog expansion และ expansion interface ของบอร์ด eZdsp™F28335

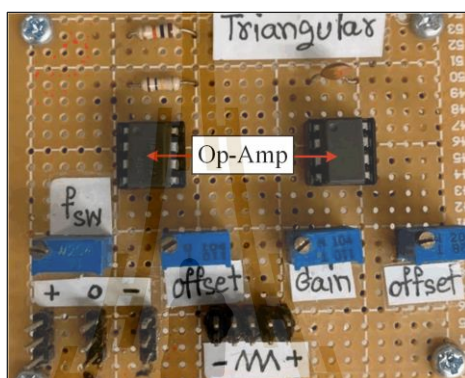
อุปกรณ์ที่ 7: ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่ใช้สำหรับการแปลงสัญญาณอ้างอิงในการสร้างสัญญาณการสวิตช์ในรูปแบบดิจิทัลจากบอร์ด eZdsp™F28335 จะเลือกใช้รุ่น Burr-Brown DAC712P แสดงได้ดังรูปที่ 9.24 ซึ่งตัวแปลงสัญญาณดังกล่าวมีความแยกชัดในการส่งข้อมูลดิจิทัล 14 บิต โดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 16383 ซึ่งหมายความว่า เมื่อบอร์ด eZdsp™F28335 ส่งค่า 0 จะได้ค่าสัญญาณอ้างอิงที่มีขนาด 0 V และถ้าบอร์ด eZdsp™F28335 ส่งค่า 16383 จะได้ค่าสัญญาณอ้างอิงที่มีขนาด 5 V เป็นต้น



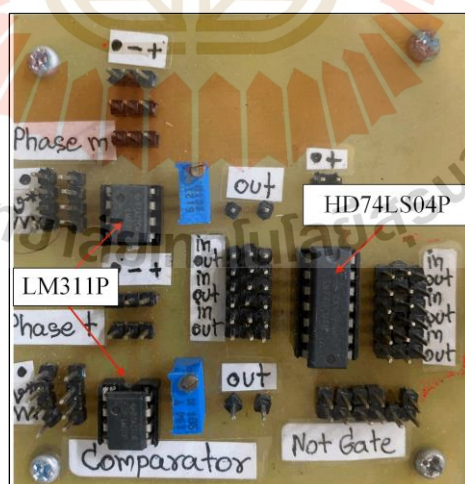
รูปที่ 9.24 ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกรุ่น Burr-Brown DAC712P

อุปกรณ์ที่ 8: วงจรสร้างสัญญาณการสวิตช์ สำหรับควบคุมการทำงานของ ไอจีบีที ประกอบด้วย วงจรสร้างสัญญาณพาร์รูปสามเหลี่ยม (triangular carrier circuit) วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (comparator circuit) วงจรนิเสธเกต (not gate circuit) และวงจรขับเกต (gate drive circuit) การสร้างวงจรสร้างสัญญาณพาร์รูปสามเหลี่ยมได้ใช้ออปแอมป์ รุ่น Hitachi HA17741 ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ แสดงได้ดังรูปที่ 9.25 โดยที่ การออกแบบค่าความต้านทาน และค่าตัวเก็บประจุสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยของทศพร ณรงค์ฤทธิ์ (ทศพร ณรงค์ฤทธิ์, 2557) สำหรับวงจรเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างสัญญาณพาร์รูปสามเหลี่ยมและสัญญาณอ้างอิงจาก

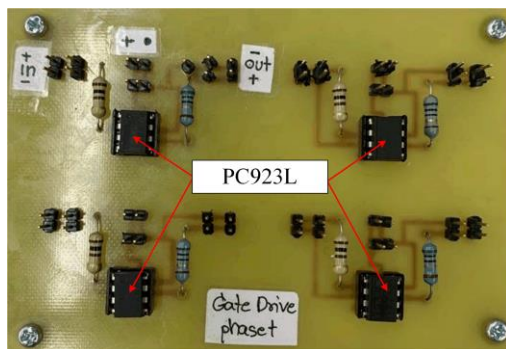
วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกใช้ไอซีรุ่น Texas Instruments LM311P แสดงได้ดังรูปที่ 9.26 จากนั้นสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรเปรียบเทียบกับสัญญาณจะเข้าสู่วงจรมินิเซเกต (not gate circuit) โดยใช้ไอซีรุ่น Texas Instruments HD74LS04P เพื่อเป็นสัญญาณการสวิตช์ไอจีบีทีตัวกลางในแต่ละกิ่ง แต่อย่างไรก็ตาม สัญญาณการสวิตช์ที่ได้ไม่ได้อยู่ในช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ในการควบคุมไอจีบีที อีกทั้งสัญญาณดังกล่าวจะต้องทำการแยกกราวด์ทางด้านวงจรรอกกำลังแอกทีฟออกจากกราวด์ทางด้านวงจรควบคุม จึงได้นำค่าสัญญาณการสวิตช์ที่ได้จากวงจรข้างต้นเข้าสู่วงจรมินิเซเกต โดยใช้ไอซีรุ่น Sharp PC923L แสดงได้ดังรูปที่ 9.27



รูปที่ 9.25 วงจรสร้างสัญญาณพาร์รูปสามเหลี่ยม

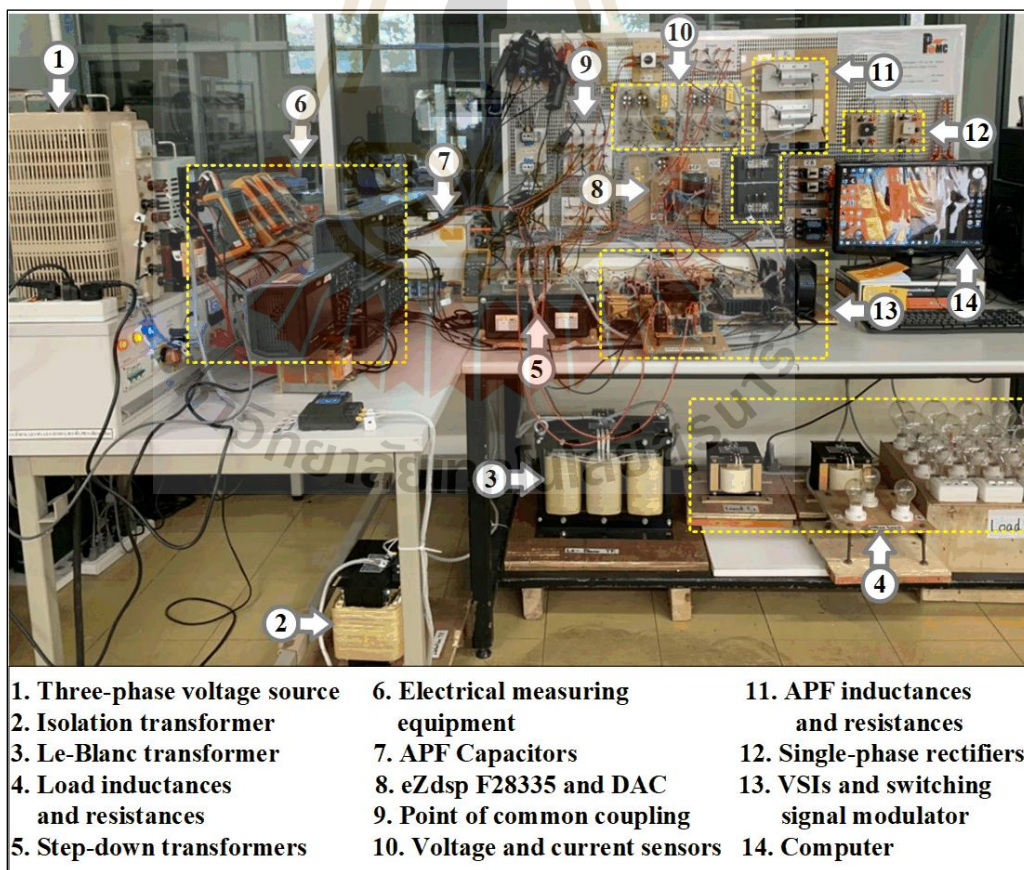


รูปที่ 9.26 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณและวงจรมินิเซเกต



รูปที่ 9.27 วงจรวงจรขับเคลื่อน

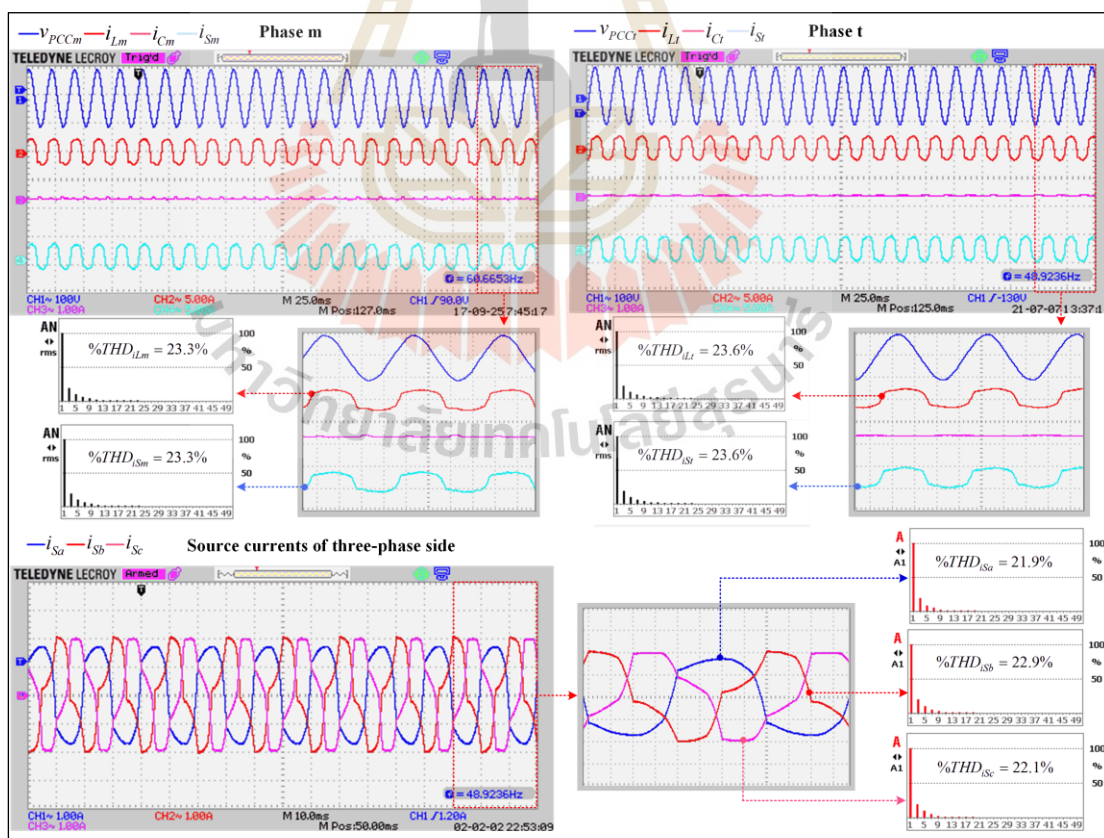
โครงสร้างชุดทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการทั้ง 3 ส่วน โดยมีอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ตามที่นำเสนอในหัวข้อที่ 9.2.1 ถึง 9.2.3 ได้ถูกนำมาประกอบรวมกันเป็นชุดต้นแบบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบแรงไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 9.28



รูปที่ 9.28 ชุดต้นแบบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบแรงไฟฟ้า

9.3 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า กรณีกระแสโหลดที่พิจารณา

การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าโดยใช้ชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ มีลักษณะของระบบทดสอบเป็นระบบที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (v_{Sa}, v_{Sb}, v_{Sc}) มีขนาด 270 V ความถี่ 50 Hz ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ ส่งผลให้รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ของเฟส m และเฟส t (v_{PCCm}, v_{PCCt}) มีขนาด 100 V ความถี่ 50 Hz และมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ ส่วนการใช้งานโหลดในหัวข้อนี้จะพิจารณาการจ่ายโหลดแบบสมดุลในกรณีกระแสโหลดที่พิจารณา ซึ่งเป็นการจ่ายกระแสโหลดของเฟส m และเฟส t (i_{Lm}, i_{Lt}) ที่มีขนาด 2 A เท่ากันทั้งสองเฟส (เปิดโหลดไฟจำนวน 4 ดวงต่อเฟส) โดยรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบที่มีการจ่ายโหลดแบบสมดุลในกรณีกระแสโหลดที่พิจารณาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.29 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า แรงดัน v_{PCCm} และ v_{PCCt} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ที่มีแอมพลิจูดเท่ากัน และมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา ทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังชุดโหลดของระบบทดสอบ ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{St} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์เช่นเดียวกับรูปสัญญาณกระแส i_{Lm} และ i_{Lt} ตามลำดับ โดยสามารถตรวจวัดค่า

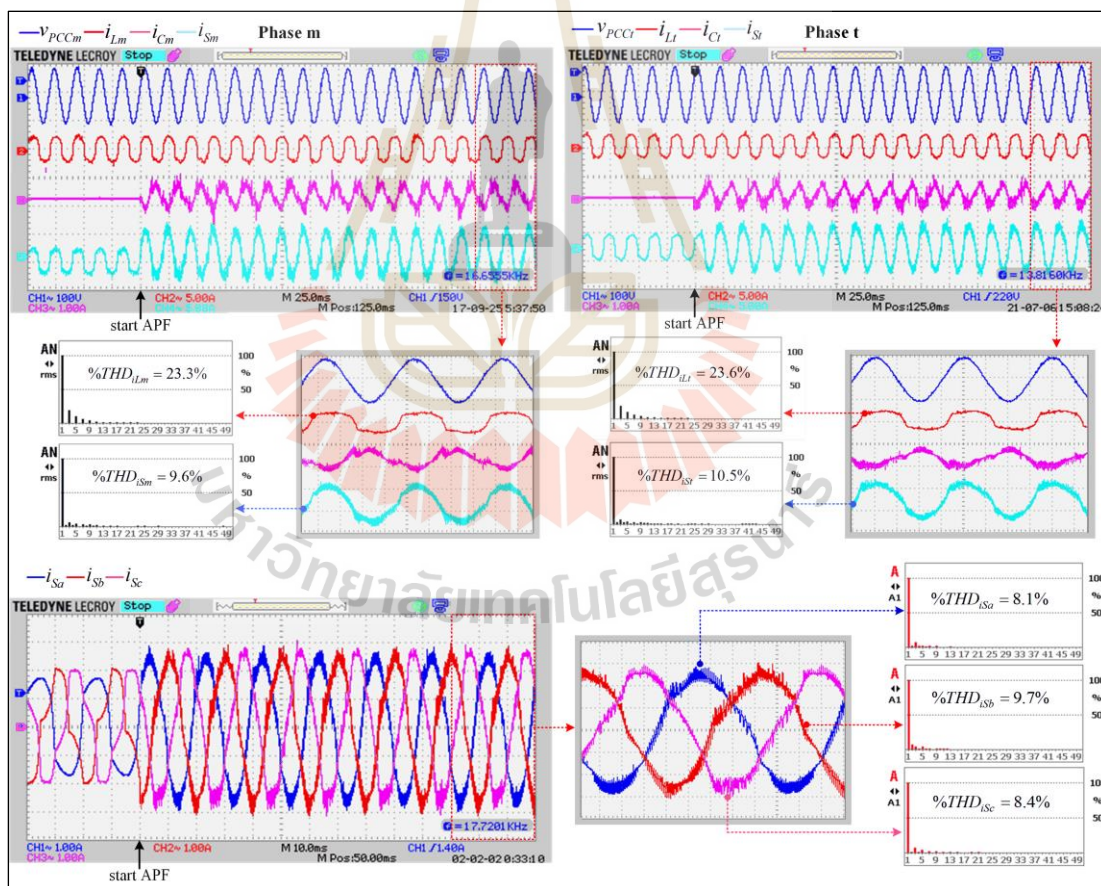


รูปที่ 9.29 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากรณีกระแสโหลดที่พิจารณา

$\%THD_i$ จาก power logger 1735 ของบริษัท fluke ได้เท่ากับ 23.3% และ 23.6% ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อรูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{St} มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์จะส่งผลให้รูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่าย (i_{Sa}, i_{Sb}, i_{Sc}) มีลักษณะผิดเพี้ยนตามไปด้วย โดยมีค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 21.9%, 22.9% และ 22.1% ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่สูงเกินข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014

9.3.1 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสโหลดที่พิจารณา

การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสโหลดที่พิจารณา มีวัตถุประสงค์ในการทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีไอที่ได้รับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ($K_{Pi(m,t)}, K_{Ii(m,t)}$) ที่ใช้สำหรับการ



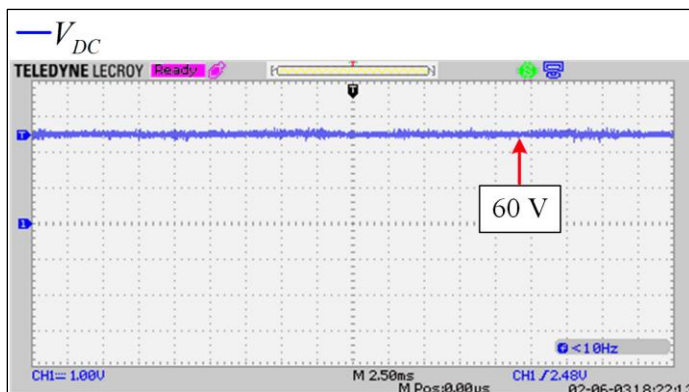
รูปที่ 9.30 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสโหลดที่พิจารณา

ควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟในห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ 896.68 และ 1.02×10^7 ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอในส่วนจากระบบควบคุมแรงดัน บัสไฟตรง (K_{P_v} , K_{I_v}) จะมีค่าเท่ากับ 1.04 และ 231.94 ตามลำดับ (รายละเอียดการออกแบบ สามารถศึกษาได้จากหัวข้อที่ 5.4.2) ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบโหลด สมดุลกรณีกระแสไหลที่พิจารณาโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ แสดงได้ดังรูปที่ 9.30

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ในรูปที่ 9.30 สังเกตได้ว่า ภายหลังจากการฉีดกระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Ct}) เข้าสู่ระบบที่จุดต่อร่วม รูป สัญญาณกระแส i_{sm} และ i_{sr} จากที่มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์และมีค่า %THD_i สูง ถึง 23.3% และ 23.6% ตามลำดับ กลับมามีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อน การชดเชย โดยมีค่า %THD_i ลดลงเป็น 9.6% และ 10.5% ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการฉีดกระแส ชดเชยยังส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{sa} , i_{sb} และ i_{sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นซึ่งมี ค่า %THD_i เท่ากับ 8.1%, 9.7% และ 8.4% ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม %THD_i ของกระแสที่ แหล่งจ่ายในแต่ละเฟสภายหลังจากการชดเชยยังคงสูงกว่าข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 จากผลการทดสอบ สามารถชี้ให้เห็นได้ว่าการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลัง แอกทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอมีสมรรถนะไม่ดีในการกำจัดฮาร์มอนิกสำหรับระบบโหลดสมดุลกรณี กระแสไหลที่พิจารณา

before compensation				after compensation			
▶ Power 2021-06-18, 10:56				▶ Power 2021-06-17, 12:46			
◁ A-C 0.937 _{tot}		1.056 _{tot}		◁ A-C 0.885 _{tot}		0.901 _{tot}	
kW		kVA		kW		kVA	
		PF				PF	
A	0.311	0.350	0.889	A	0.292	0.296	0.982
B	0.314	0.355	0.884	B	0.299	0.306	0.976
C	0.312	0.351	0.888	C	0.294	0.299	0.982

รูปที่ 9.31 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลที่พิจารณา

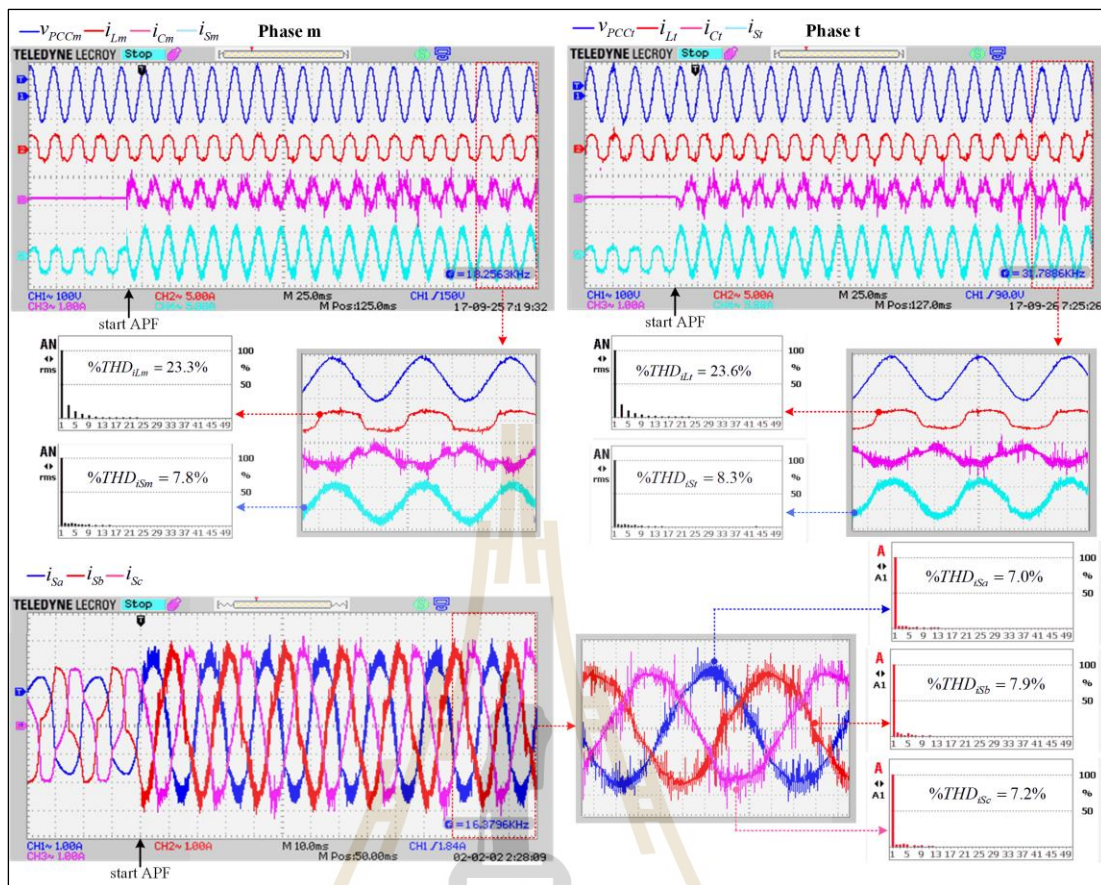


รูปที่ 9.32 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลดที่พิจารณา โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ

สมรรถนะการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (PF) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.31 ซึ่งพบว่า การฉีดกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมพีไอมีสมรรถนะที่ดีในการปรับปรุงค่า PF โดยพิจารณาได้จากค่า PF ภายหลังการชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.887 เป็น 0.989 (ค่าตัวประกอบกำลังสามารถวัดได้โดยใช้ power logger 1735 ของบริษัท fluke) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณากำลังงานอินพุตของหม้อแปลงเลอบลองค์ พบว่า การฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถลดกำลังงานอินพุตของหม้อแปลงเลอบลองค์จาก 937 วัตต์ เป็น 885 วัตต์ ซึ่งการลดลงของกำลังงานอินพุตของหม้อแปลงเลอบลองค์ เป็นผลมาจากปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่ลดลงภายหลังการฉีดกระแสชดเชย (W. Song et al., 2019) ในส่วนของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าใกล้เคียงแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงที่มีค่าเท่ากับ 60 โวลต์ โดยพิจารณาได้จากผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ ดังแสดงในรูปที่ 9.32

9.3.2 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการด้วยตัวควบคุม MPC กรณีกระแสไหลดที่พิจารณา

ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง (MPC) คือ ช่วงเวลาในการสุ่มตัวอย่าง (sampling time: T_s) ซึ่งการออกแบบค่าดังกล่าวจะต้องมีค่ามากกว่าเวลาที่ใช้ในหนึ่งรอบการคำนวณของโปรแกรม ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ใช้เวลา 26.5 ไมโครวินาที สำหรับการหนึ่งรอบการคำนวณของโปรแกรมระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแยกที่ฟ ดังนั้น จึงเลือกใช้ช่วงเวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 30 ไมโครวินาที ผลการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบไหลดสมดุลกรณีกระแสไหลดที่พิจารณาโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง แสดงได้ดังรูปที่ 9.33 จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง สามารถควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแยกที่ฟ เพื่อปรับปรุงกระแสที่แหล่งจ่ายในแต่ละเฟสให้มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น โดยพิจารณาได้จากรูปสัญญาณกระแส i_{Sm} , i_{St} , i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} นอกจากนี้ เมื่อตรวจวัดค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่าย ภายหลังการชดเชยด้วย power logger 1735 พบว่า มีค่าลดลงจากก่อนการชดเชย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.8%, 8.3%,

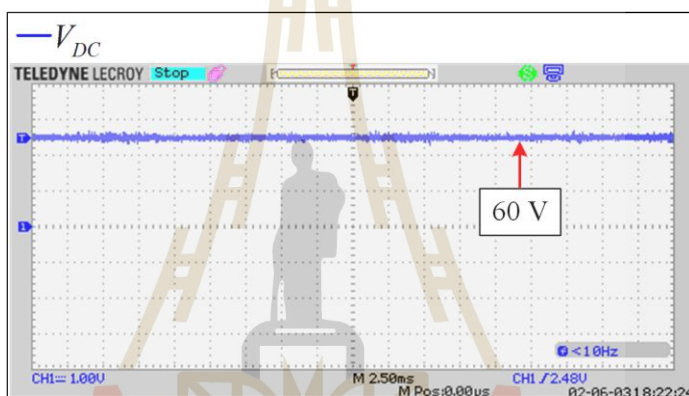


รูปที่ 9.33 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม MPC กรณีกระแสโหลดที่พิจารณา

7.0%, 7.9% และ 7.2% ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ค่า $\%THD_i$ ดังกล่าวยังสูงเกินกรอบของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 เนื่องจากวงจรรอกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองมีการฉีดกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ที่เกิดการกระเพื่อมของรูปสัญญาณสูง ส่งผลให้กระแส i_{Sm} , i_{St} , i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} ภายหลังการชดเชยมีการกระเพื่อมของรูปสัญญาณสูงตามไปด้วย จึงเป็นผลให้ $\%THD_i$ ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยในแต่เฟสมีค่าเกินมาตรฐาน IEEE standard 519 - 2014 นอกจากนี้ ผลการกำจัดฮาร์มอนิกยังได้ช่วยลดกำลังงานอินพุตของหม้อแปลงเลอบลองค์จาก 937 วัตต์ เป็น 823 วัตต์ อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงค่า PF ของระบบให้มีความเพิ่มขึ้นเป็น 0.981 แสดงได้ดังรูปที่ 9.34 ในส่วนของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง พบว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีความเท่ากับ 60 โวลต์ ตลอดช่วงการทดสอบ ซึ่งทำการพิจารณาได้ดังรูปที่ 9.35

before compensation				after compensation			
Power 2021-06-18, 10:56				Power 2021-06-17, 12:45			
A-C	0.937 _{tot}	1.056 _{tot}	0.887 _{tot}	A-C	0.823 _{tot}	0.837 _{tot}	0.981 _{tot}
	kW	kVA	PF		kW	kVA	PF
A	0.311	0.350	0.889	A	0.271	0.275	0.985
B	0.314	0.355	0.884	B	0.279	0.285	0.977
C	0.312	0.351	0.888	C	0.273	0.277	0.983

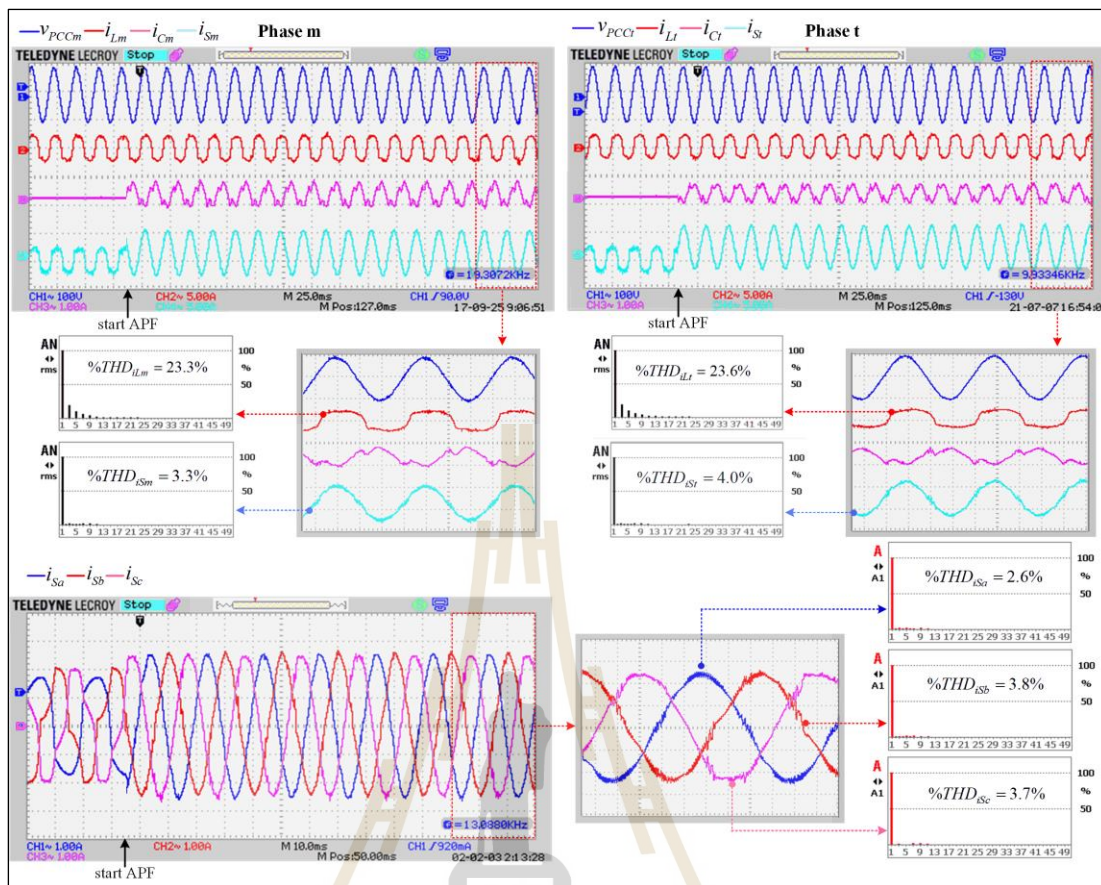
รูปที่ 9.34 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม MPC กรณีกระแสไหลดที่พิจารณา



รูปที่ 9.35 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลดที่พิจารณา โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม MPC

9.3.3 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ ด้วยตัวควบคุม M^2PC กรณีกระแสไหลดที่พิจารณา

ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต (M^2PC) มีจุดเด่นในด้านการลดการกระเพื่อมของรูปสัญญาณกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 7 ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวจะต้องมีการออกแบบ ช่วงเวลาในการสุ่มตัวอย่าง โดยพิจารณาได้จากเวลาที่ใช้ในหนึ่งรอบการคำนวณของโปรแกรมระบบควบคุมวงจรรอกำลังแอกทีฟ ตามที่ได้นำเสนอให้หัวข้อที่ผ่านมา ดังนั้น จึงได้เลือกใช้ช่วงเวลาในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 30 ไมโครวินาที ซึ่งเป็นค่าที่เท่ากับกรณีการใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ผลการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 9.36 พบว่า วงจรรอกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตสามารถลดการกระเพื่อมของรูปสัญญาณกระแสชดเชยได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป ผลจากการฉีดกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} เข้าสู่จุด PCC ของระบบ ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{Sf} มีลักษณะ

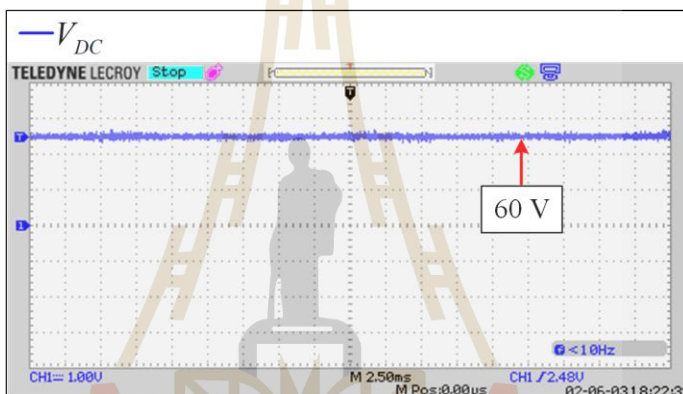


รูปที่ 9.36 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M²PC กรณีกระแสโหลดที่พิจารณา

ใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 3.3% และ 4.0% ตามลำดับ และทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 2.6%, 3.8% และ 3.7% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า $\%THD_i$ ภายหลังการชดเชย พบว่า ค่าดังกล่าวอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 อีกทั้งผลการกำจัดฮาร์มอนิกสามารถลดกำลังงานอินพุตของหม้อแปลงเลอบลองค์ได้อีกด้วย โดยมีค่าลดลงจาก 937 วัตต์ เป็น 802 วัตต์ นอกจากนี้ วงจรรองกำลังแยกที่ฟีดกลับยังสามารถปรับปรุง PF ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.887 เป็น 0.991 แสดงได้ดังรูปที่ 9.37 ในส่วนของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรองกำลังแยกที่ฟีดกลับ เมื่อพิจารณาผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงดังรูปที่ 9.38 พบว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงที่ 60 โวลต์ ตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นขีดความสามารถการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยวงจรรองกำลังแยกที่ฟีดกลับโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตสำหรับระบบโหลดสมดุลกรณีกระแสโหลดที่พิจารณา สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.1

before compensation				after compensation			
Power 2021-06-18, 10:56				Power 2021-06-17, 09:28			
A-C 0.937 _{tot} 1.056 _{tot} 0.887 _{tot}				A-C 0.802 _{tot} 0.807 _{tot} 0.991 _{tot}			
	kW	kVA	PF	kW	kVA	PF	
A	0.311	0.350	0.889	0.267	0.269	0.991	
B	0.314	0.355	0.884	0.267	0.269	0.989	
C	0.312	0.351	0.888	0.268	0.269	0.995	

รูปที่ 9.37 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม M²PC กรณีกระแสไหลดที่พิจารณา



รูปที่ 9.38 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลดที่พิจารณา โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม M²PC

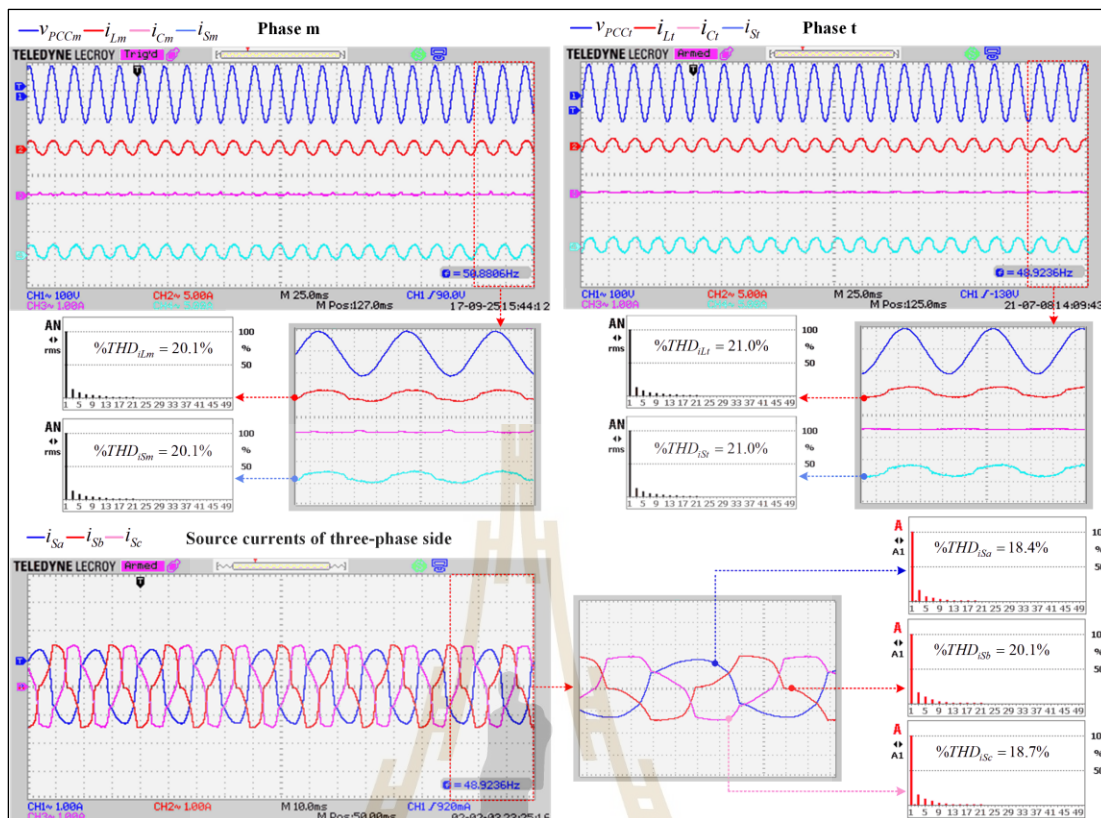
ตารางที่ 9.1 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบไหลดสมดุลในกรณีกระแสไหลดที่พิจารณา

ประเภทของ ตัวควบคุม กระแสชดเชย	%THD _i ด้านเฟสรวม		%THD _i ด้านสามเฟส			%CUF	PF	P _{in} (W)
	เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c			
	ก่อนการชดเชย							
	23.3	23.6	21.9	22.9	22.1	0.00	0.887	937
ภายหลังการชดเชย								
PI	9.6	10.5	8.1	9.7	8.4	0.00	0.980	885
MPC	7.8	8.3	7.0	7.9	7.2	0.00	0.981	823
M ² PC	3.3	4.0	2.6	3.8	3.7	0.00	0.991	802

สมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต สามารถพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 9.1 จากตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมทั้งสามประเภทสามารถปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาได้จาก $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย และค่าตัวประกอบกำลังที่เพิ่มขึ้นภายหลังการชดเชย แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า $\%THD_i$ พบว่า การใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตให้ค่า $\%THD_i$ ต่ำกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ดังนั้น การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตให้สมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกดีกว่าตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง นอกจากนี้ ผลจากการกำจัดฮาร์มอนิกสามารถลดกำลังงานอินพุตของหม้อแปลงเลอบลองค์ จึงทำให้กำลังงานอินพุตของหม้อแปลงเลอบลองค์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตในระบบควบคุมกระแสชดเชยมีค่าต่ำกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 9.1 และเมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบกำลัง พบว่า การใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตให้สมรรถนะการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง โดยพิจารณาจากค่า PF ภายหลังการชดเชยที่มีค่าสูงสุด จากผลการทดสอบดังกล่าว สามารถยืนยันได้ว่า ระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตมีสมรรถนะด้านการปรับปรุงคุณภาพกระแสสำหรับระบบโหลดสมดุลในกรณีกระแสไฟฟ้าที่พิจารณาที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง

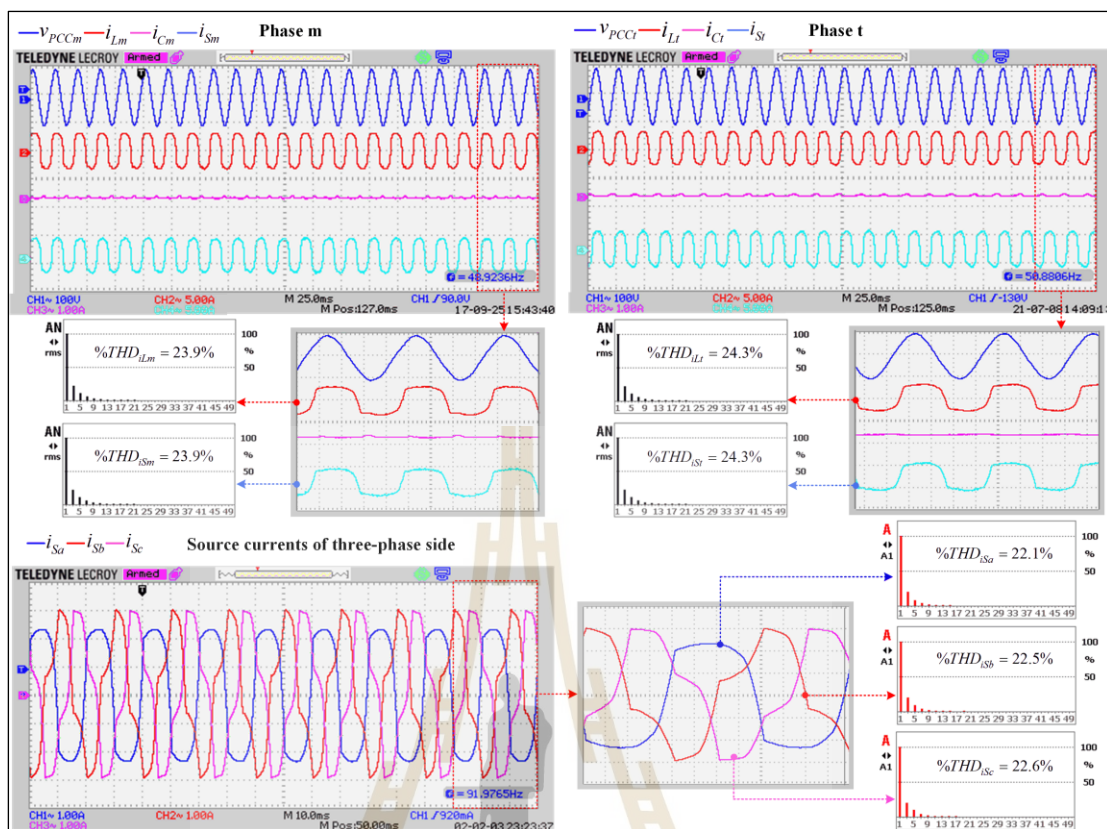
9.4 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากรณีกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา

ระบบทดสอบที่พิจารณาในหัวข้อนี้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดจากกระแสโหลดที่พิจารณาแบบสมดุล เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะการใช้งานโหลดรถไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดอย่างทันทีทันใด (L. Yu-quan, et al., 2011) โดยในระบบทดสอบดังกล่าว มีการจ่ายโหลดแบ่งออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงแรกมีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดลดลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา โดยทำการจ่ายกระแสโหลดของเฟส m และเฟส $t (i_{Lm}, i_{Lt})$ ที่มีขนาด 1.15 A เท่ากันทั้งสองเฟส (เปิดหลอดไฟจำนวน 2 ดวงต่อเฟส) แสดงได้ดังรูปที่ 9.39 และช่วงที่สอง เป็นการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดเพิ่มขึ้นจากกระแสโหลดที่พิจารณาด้วยการ จ่ายกระแส i_{Lm} และ i_{Lt} ที่มีขนาด 2.8 A เท่ากันทั้งสองเฟสโดยการเปิดหลอดไฟจำนวน 6 ดวงต่อเฟส รูปสัญลักษณ์แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากรณีกระแสโหลดเพิ่มขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.40 สำหรับโครงสร้างส่วนอื่น ๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบทดสอบกรณีโหลดที่พิจารณาตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา



รูปที่ 9.39 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากรณีกระแสไหลลดลง

รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากรณีกระแสไหลลดลงมีการเปลี่ยนแปลงแบบลดลงและเพิ่มขึ้นที่แสดงในรูปที่ 9.39 และ 9.40 สังเกตได้ว่า ระบบทดสอบยังคงมีแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ของเฟส m และเฟส t (v_{PCCm} , v_{PCCt}) ขนาด 100 V ความถี่ 50 Hz และมีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์เช่นเดียวกับกรณีกระแสไหลที่พิจารณา แต่รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลลงจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ จากการตรวจวัดค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายในแต่ละเฟสพบว่า กรณีกระแสไหลลดลงมีค่าเท่ากับ 18.4%, 20.1% และ 18.7% ตามลำดับ ส่วนกรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 22.1%, 24.3% และ 22.6% ตามลำดับ ซึ่งค่า $\%THD_i$ ทั้งสองช่วงของการเปลี่ยนแปลงกระแสไหลเป็นค่าที่สูงเกินข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014



รูปที่ 9.40 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากรณีกระแสไหลตเพิ่มขึ้น

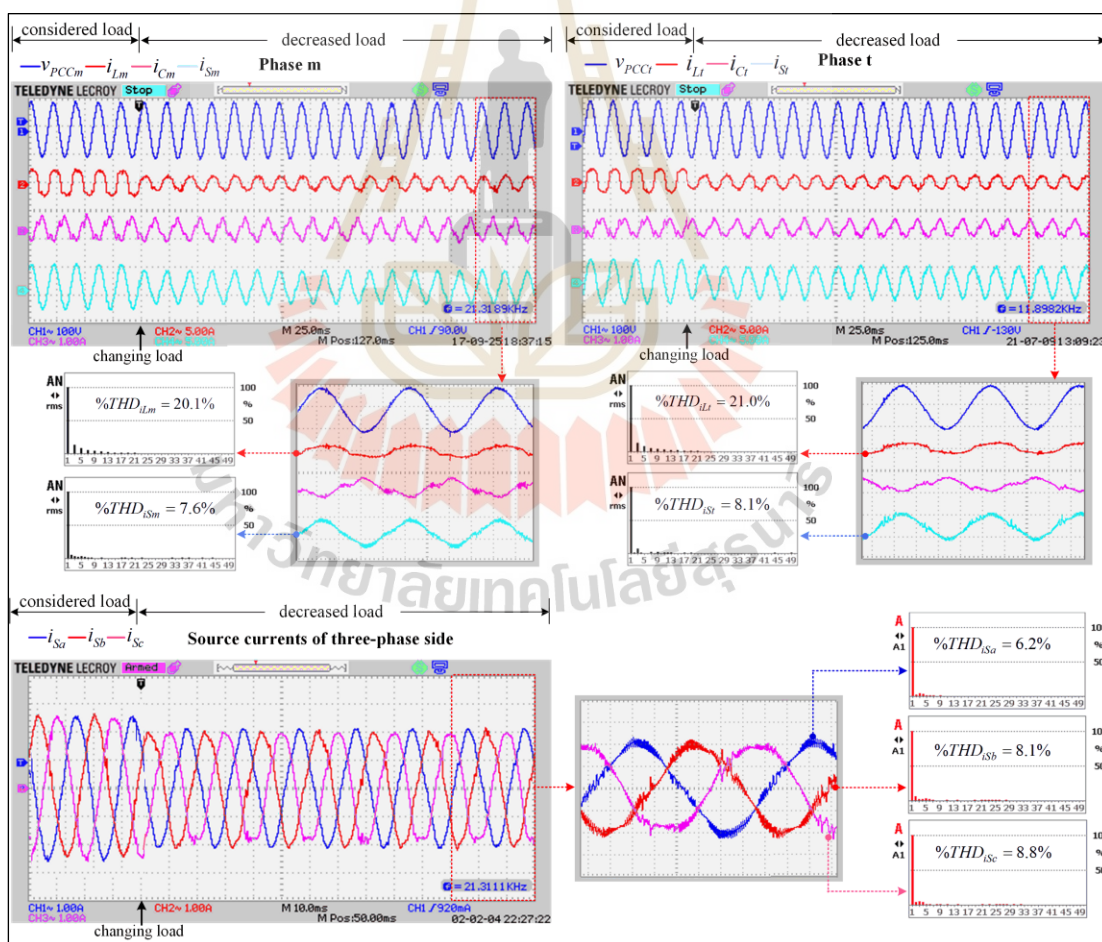
9.4.1 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการด้วย

ตัวควบคุม M²PC กรณีกระแสไหลเปลี่ยนแปลงจากกระแสไหลที่พิจารณา

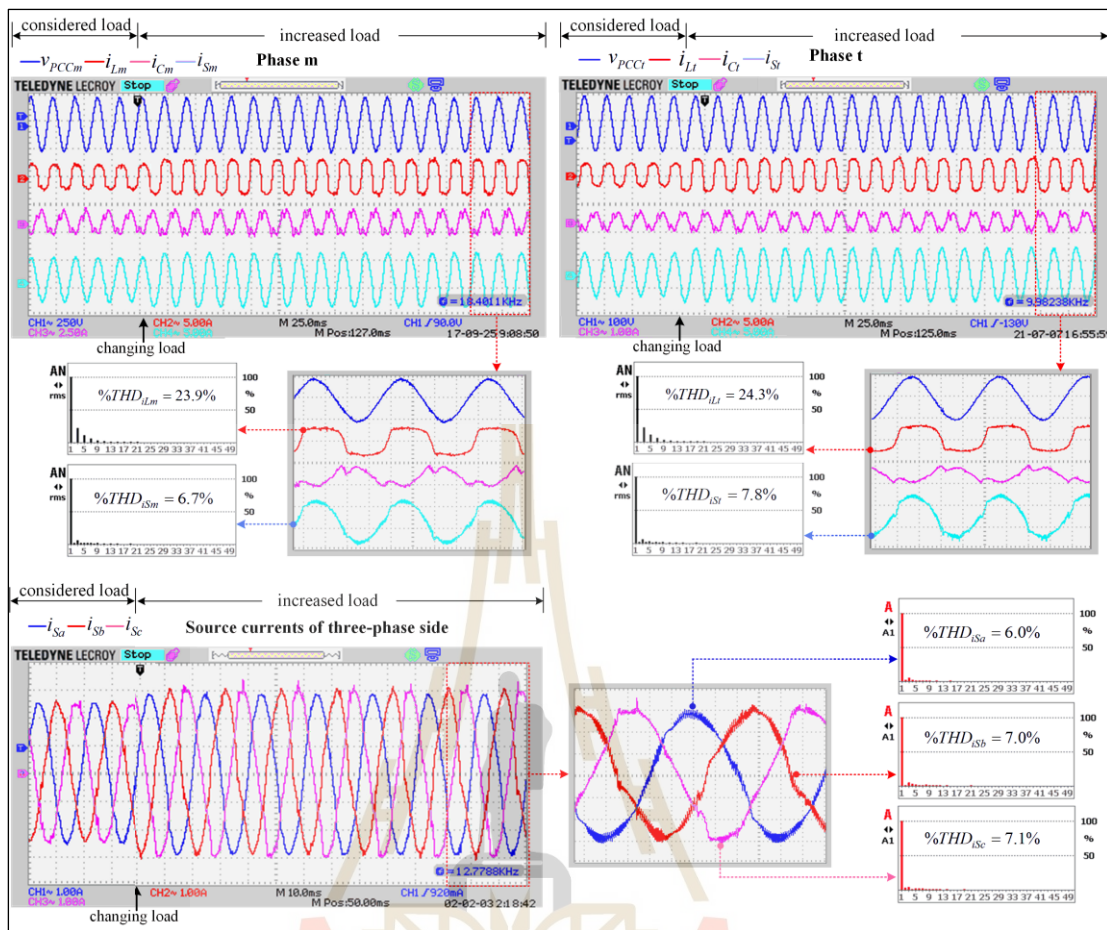
การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากรณีกระแสไหลเปลี่ยนแปลงจากกระแสไหลที่พิจารณา ซึ่งประกอบด้วย การกำจัดกระแสฮาร์มอนิก และการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง โดยผลการทดสอบสมรรถนะดังกล่าวอาศัยชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสขดเซยของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเมื่อกระแสไหลมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ในหัวข้อนี้ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตแทนการใช้งานตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองในส่วนของระบบควบคุมกระแสขดเซย อย่างไรก็ตาม ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสำหรับวงจรรองกำลังแอกทีฟในหัวข้อนี้ยังคงใช้ตัวควบคุมพีไอ โดยค่าพารามิเตอร์ของวงจรรองกำลังแอกทีฟจะมีค่าเช่นเดียวกันกับระบบทดสอบกรณีไหลที่พิจารณาตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในกรณีกระแสไหลลดลง ดังแสดงในรูปที่ 9.41 สังเกตได้ว่า เมื่อกระแส i_{Lm} และ i_{Lt} มีค่าลดลง ส่งผลให้วงจรรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตสามารถควบคุมการฉีดกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ได้อย่างทันทีทันใด โดยมีขนาดลดลงจากเดิม ผลจากการฉีดกระแส i_{Cm} และ

i_{Ct} ทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} , i_{St} , i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการชดเชยโดยมีค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 7.6%, 8.1%, 6.2%, 8.1% และ 8.4% ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าค่า $\%THD_i$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายในแต่ละเฟสภายหลังการชดเชยมีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดเพิ่มขึ้นจากกระแสโหลดที่พิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 9.42 พบว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตยังคงสามารถควบคุมการผิดกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ได้แบบทันทีทันใดเมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้รูปสัญญาณ i_{Sm} และ i_{St} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์เมื่อเทียบกับก่อนการชดเชย อีกทั้งกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} ก็มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์มากขึ้นด้วย โดยมีค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 6.7% และ 7.8% สำหรับกระแส i_{Sm} และ i_{St} ตามลำดับ ส่วนรูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีค่าเท่ากับ 6.0%, 7.0% และ 7.1% ตามลำดับ ซึ่งยังคงเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐาน IEEE standard



รูปที่ 9.41 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M²PC กรณีกระแสโหลดลดลง



รูปที่ 9.42 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม M²PC กรณีกระแสโหลดเพิ่มขึ้น

519-2014 ในส่วนของการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง พบว่า การควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองมีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังที่ดีขึ้นถึงแม้กระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา โดยพิจารณาได้จากค่าตัวประกอบกำลังภายหลังการชดเชยมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีกระแสโหลดลดลงและกระแสโหลดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9.43 และ 9.44 ตามลำดับ ผลจากการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังยังทำให้กำลังงานอินพุตของหม้อแปลงเลอบลองค์มีค่าลดลงก่อนการชดเชย โดยในกรณีกระแสโหลดลดลงพลังงานอินพุตของหม้อแปลงลดลง 103 วัตต์ และในกรณีกระแสโหลดเพิ่มขึ้นมีค่าลดลง 69 วัตต์ แสดงได้ดังรูปที่ 9.43 และ 9.44 ตามลำดับ

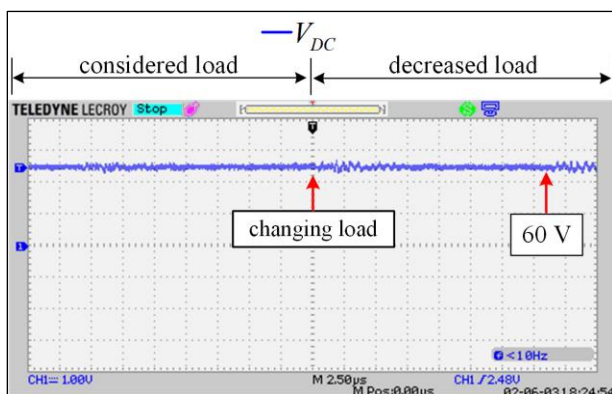
before compensation				after compensation			
Power 2021-06-26, 12:32				Power 2021-06-20, 10:46			
A-C	0.777 _{tot}	0.920 _{tot}	0.844 _{tot}	A-C	0.674 _{tot}	0.676 _{tot}	0.989 _{tot}
	kW	kVA	PF		kW	kVA	PF
A	0.259	0.306	0.846	A	0.224	0.225	0.993
B	0.259	0.309	0.838	B	0.222	0.223	0.987
C	0.259	0.305	0.848	C	0.228	0.228	0.989

รูปที่ 9.43 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม M^2PC กรณีกระแสไหลลดลง

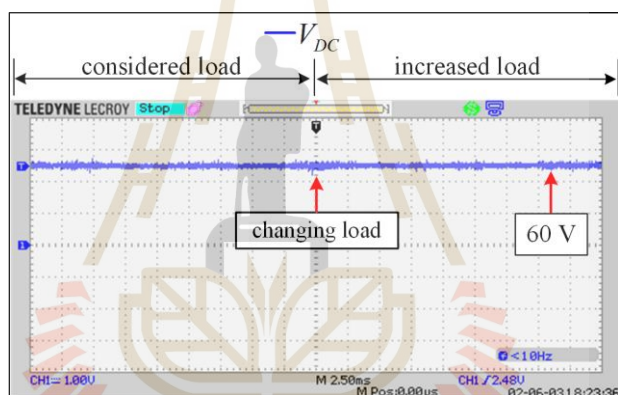
before compensation				after compensation			
Power 2021-06-26, 12:32				Power 2021-06-26, 12:30			
A-C	1.066 _{tot}	1.143 _{tot}	0.887 _{tot}	A-C	0.997 _{tot}	1.017 _{tot}	0.981 _{tot}
	kW	kVA	PF		kW	kVA	PF
A	0.354	0.379	0.889	A	0.330	0.336	0.984
B	0.358	0.385	0.884	B	0.338	0.346	0.977
C	0.354	0.379	0.890	C	0.329	0.335	0.982

รูปที่ 9.44 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม M^2PC กรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้น

สมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลลดมีการเปลี่ยนแปลงลดลงและเพิ่มขึ้นจากกระแสไหลที่พิจารณา โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.45 และ 9.46 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงที่ 60 โวลต์ ตามที่ได้ออกแบบไว้ ถึงแม้ว่ากระแสไหลที่พิจารณาจะมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตกรณีกระแสไหลลดมีการเปลี่ยนแปลงจากกระแสไหลที่พิจารณาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.2



รูปที่ 9.45 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลลดลง โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม M^2PC

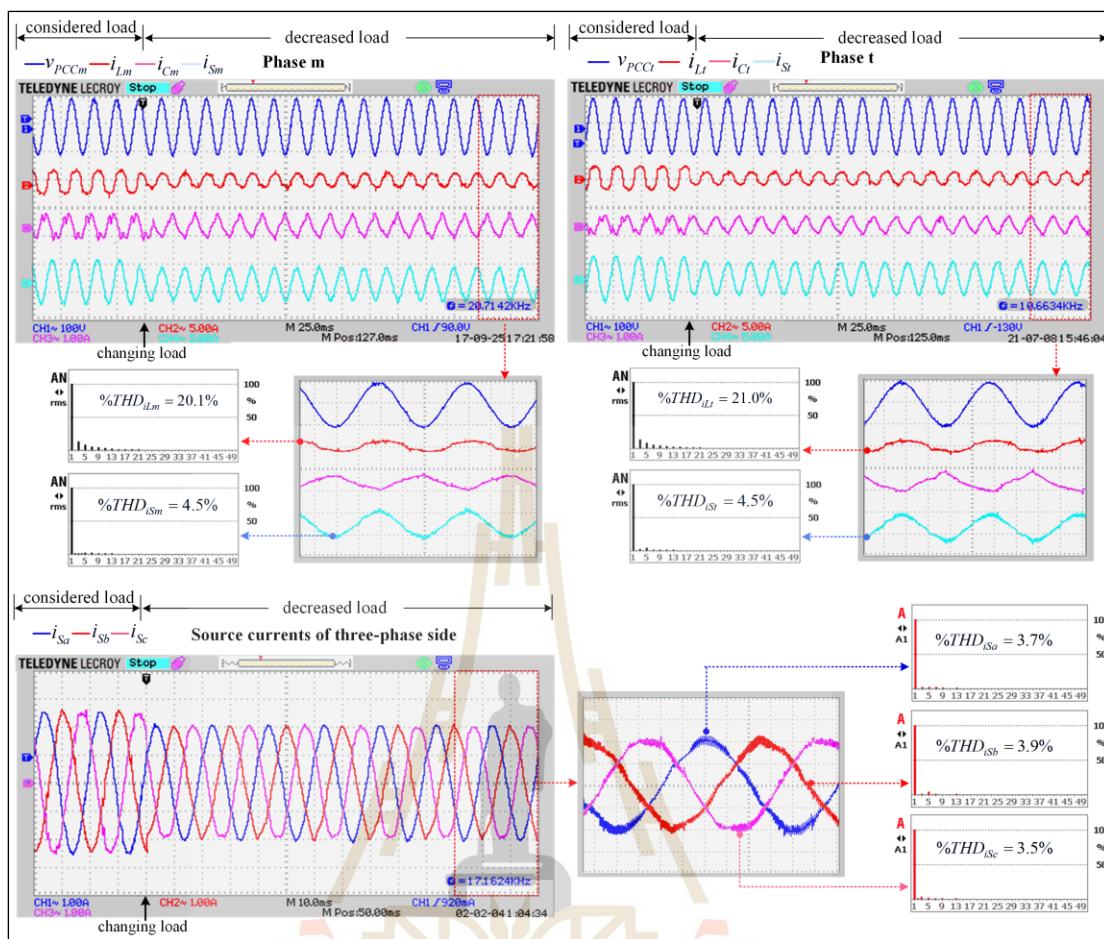


รูปที่ 9.46 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้น โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม M^2PC

9.4.2 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการด้วย

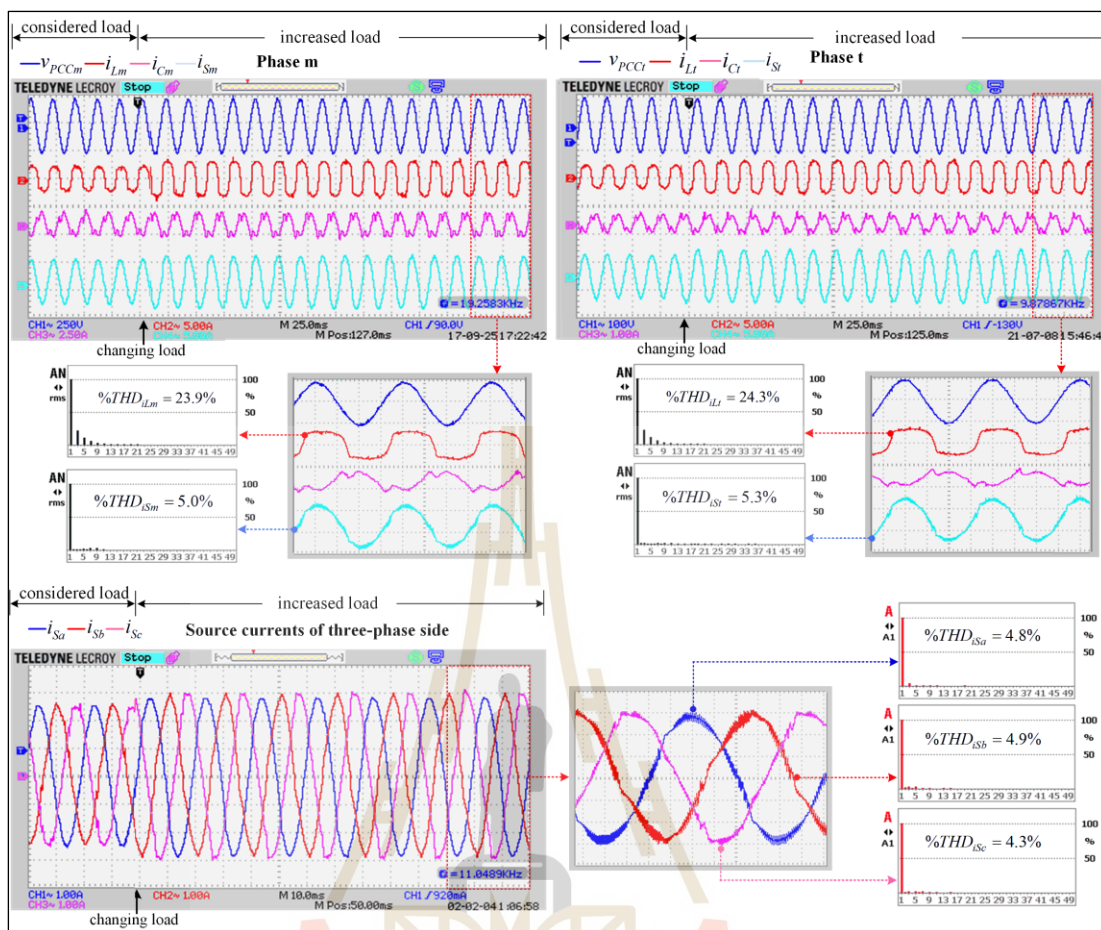
ตัวควบคุม AM^2PC กรณีกระแสไหลเปลี่ยนแปลงจากกระแสไหลที่พิจารณา

ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว (AM^2PC) ได้รับการพัฒนาเพื่อสมรรถนะที่ดีขึ้นในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟ เมื่อกระแสไหลมีการเปลี่ยนแปลงจากกระแสไหลที่พิจารณา โดยมีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าให้มีค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ดังนั้น ในหัวข้อนี้ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวแทนการใช้งานตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตในส่วนของระบบควบคุมกระแสชดเชย สำหรับระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงยังคงใช้ตัวควบคุมพีไอ การออกแบบตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้



รูปที่ 9.47 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีกระแสโหลดลดลง

แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว สามารถศึกษารายละเอียดได้ในบทที่ 8 นอกจากนี้ ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟยังคงใช้เหมือนกับกรณีการใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.47 ซึ่งสังเกตได้ว่า เมื่อกระแส i_{Lm} และ i_{Lt} มีขนาดลดลงแบบทันทีทันใด ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวให้ความหมายว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวมีผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวที่รวดเร็วเมื่อกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ จากรูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{St} พบว่า รูปสัญญาณดังกล่าวมีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ตามไปด้วย โดยที่ $\%THD_i$ ภายหลังการชดเชยในแต่ละเฟสมีค่าเท่ากับ 3.7%, 3.9% และ 3.5% อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014



รูปที่ 9.48 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีกระแสโหลดเพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในกรณีกระแสโหลดเพิ่มขึ้นจากกระแสโหลดที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 9.48 สังเกตได้ว่า มีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดเพิ่มขึ้นแบบทันทีทันใดแบบทันทีทันใด ปรากฏว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถควบคุมชนิดกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ได้แบบทันทีทันใด พิจารณาได้จากรูปสัญญาณกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงเมื่อกระแสโหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลตอบสนองที่รวดเร็วในสถานะชั่วคราว และเมื่อพิจารณาที่สถานะอยู่ตัว พบว่า ภายหลังจากชดเชยรูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 4.8%, 4.9% และ 4.3% ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ภายใต้กรอบของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 จากผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดทั้งสองลักษณะ แสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวให้สมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีถึงแม้ว่ากระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา

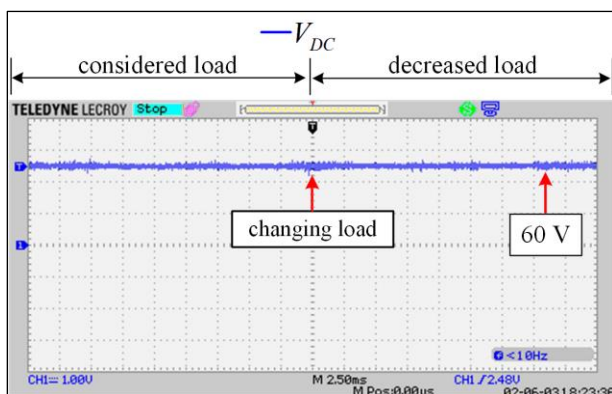
สมรรถนะการปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับ การมอดูเลตเชิงปรับตัวในกรณีกระแสไหลลดลงและเพิ่มขึ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9.49 และ 9.50 ซึ่งสังเกตได้ว่า การควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนาย ที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวให้ผลการปรับปรุงค่า PF ที่ดีขึ้น โดยพิจารณาจากค่า PF ที่เพิ่มขึ้นภายหลังการชดเชย อีกทั้งผลการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ยังส่งผลให้กำลังไฟฟ้าอินพุตของหม้อแปลงเลอบลองค์ลดลงอีกด้วย นอกจากนี้ ในส่วนของระบบ ควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ พบว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง ให้ใกล้เคียงกับแรงดันอ้างอิงที่ประมาณ 60 โวลต์ ถึงแม้ว่ากระแสไหลของระบบที่พิจารณามีการ เปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ดังแสดงในรูปที่ 9.51 และ 9.52 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุง คุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับ การมอดูเลตเชิงปรับตัวกรณีไหลสมดุล สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.2

before compensation				after compensation			
▶ Power 2021-06-26, 12:32				▶ Power 2021-06-19, 13:17			
↔ A-C 0.777 _{tot} 0.920 _{tot} 0.844 _{tot}				↔ A-C 0.643 _{tot} 0.650 _{tot} 0.995 _{tot}			
kW kVA PF ↔				kW kVA PF ↔			
A	0.259	0.306	0.846	A	0.213	0.214	0.994
B	0.259	0.309	0.838	B	0.217	0.220	0.995
C	0.259	0.305	0.848	C	0.213	0.216	0.998

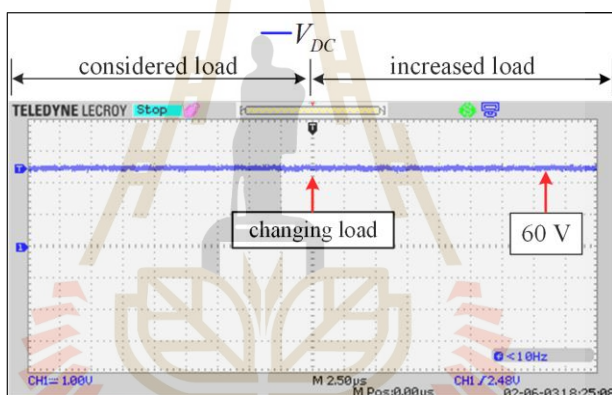
รูปที่ 9.49 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม AM^2PC กรณีกระแสไหลลดลง

before compensation				after compensation			
▶ Power 2021-06-26, 12:32				▶ Power 2021-06-26, 12:28			
↔ A-C 1.066 _{tot} 1.143 _{tot} 0.887 _{tot}				↔ A-C 0.931 _{tot} 1.048 _{tot} 0.988 _{tot}			
kW kVA PF ↔				kW kVA PF ↔			
A	0.354	0.379	0.889	A	0.309	0.347	0.991
B	0.358	0.385	0.884	B	0.312	0.353	0.985
C	0.354	0.379	0.890	C	0.310	0.348	0.988

รูปที่ 9.50 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม AM^2PC กรณีกระแสไหลเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9.51 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสโหลดลดลง โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม AM^2PC



รูปที่ 9.52 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีกระแสโหลดเพิ่มขึ้น โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม AM^2PC

ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยวงจรรอกำลังแอกที่พ สำหรับระบบโหลดสมดุลในกรณีกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา ดังตารางที่ 9.2 สังเกตได้ว่า การควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสามารถกำจัดฮาร์โมนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในกรณีกระแสโหลดมีเปลี่ยนแปลง ซึ่งพิจารณาได้จาก $\%THD_r$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงจากก่อนการชดเชย ส่วนค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังการชดเชย อีกทั้งผลจากการกำจัดฮาร์โมนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ทำให้กำลังอินพุตของหม้อแปลงเลอบลองค์ลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ค่า $\%THD_r$ ของกระแสที่แหล่งจ่ายที่ได้จากการใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตยังมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน

IEEE standard 519 -2014 ส่วนการใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวให้ค่า $\%THD_i$ ที่อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ดังนั้น การใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวให้สมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวให้สมรรถนะในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีทำให้กำลังงานอินพุตของหม้อแปลงเลอบลองค์ที่ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวในระบบควบคุมกระแสชดเชยมีค่าต่ำกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับมอดูเลต และเมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบกำลัง พบว่า การใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวให้สมรรถนะการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังที่ดีกว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ผลการทดสอบที่ได้นำเสนอข้างต้น สามารถยืนยันได้ว่า ระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแยกที่พีที่ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวมีสมรรถนะด้านการปรับปรุงคุณภาพกระแสสำหรับระบบโหลดสมดุลในกรณีกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต

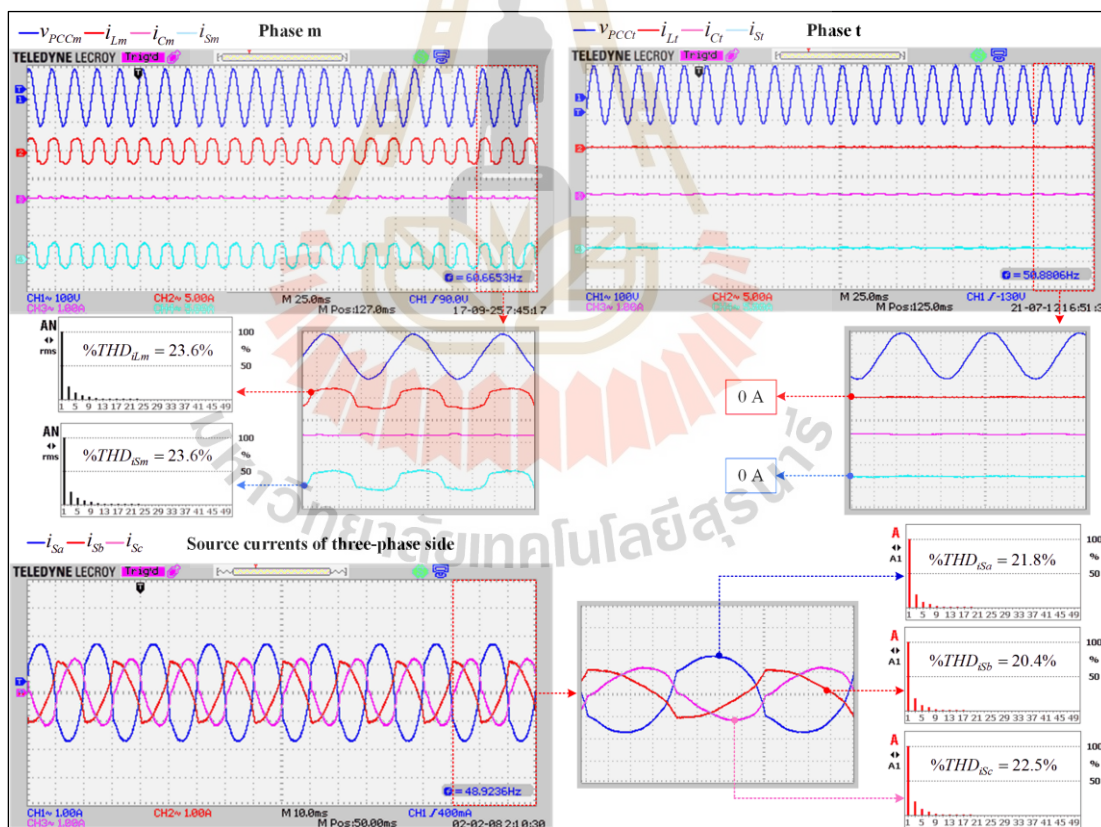
ตารางที่ 9.2 การเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบโหลดสมดุลในกรณีกระแสโหลดเปลี่ยนแปลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา

ตัวควบคุมกระแสชดเชย	สถานะของกระแสโหลด	$\%THD_i$ ด้านเฟสร่วม		$\%THD_i$ ด้านสามเฟส			$\%CUF$	PF	P_{in} (W)
		เฟส m	เฟส t	เฟส a	เฟส b	เฟส c			
		ก่อนการชดเชย							
ลดลง	ลดลง	20.1	21.0	18.4	20.1	18.7	0.00	0.844	777
	เพิ่มขึ้น	23.9	24.3	22.1	22.5	22.6	0.00	0.887	1066
M ² PC	ลดลง	7.6	8.1	6.2	8.1	8.8	0.00	0.989	674
	เพิ่มขึ้น	6.7	7.8	6.0	7.0	7.1	0.00	0.981	997
AM ² PC	ลดลง	4.0	4.5	3.7	3.9	3.5	0.00	0.995	643
	เพิ่มขึ้น	5.0	5.3	4.8	4.9	4.3	0.00	0.988	931

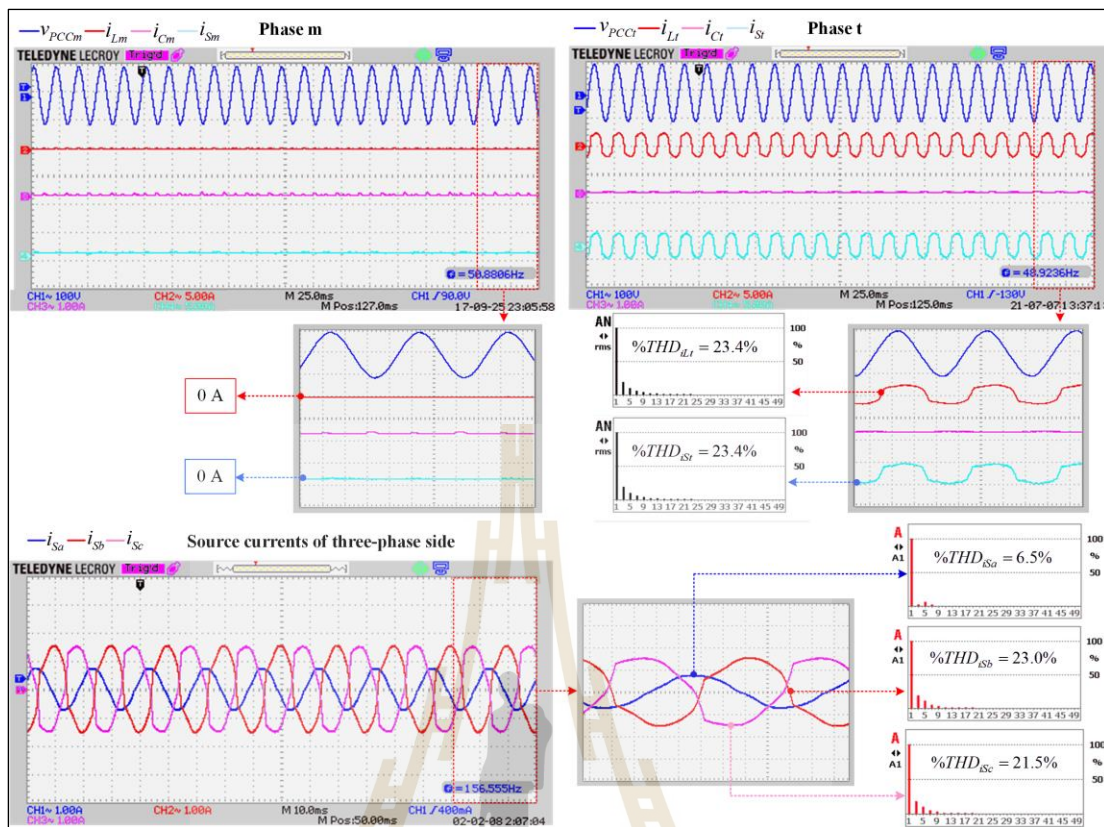
9.5 ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุล

การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในหัวข้อนี้มีลักษณะการจ่ายโหลดแบบไม่สมดุล กล่าวคือ บางช่วงของการทดสอบมีการจ่ายกระแสโหลดที่มีขนาด 2 A (เปิดหลอดไฟจำนวน 4 ดวง) เฉพาะเฟส m หรือ เฟส t เพียงหนึ่งเฟสเท่านั้น โดยในช่วงที่มีการจ่ายโหลด เฉพาะเฟส m เท่านั้น ไม่มีการจ่ายโหลดเฟส t จะเรียกว่า “โหลดไม่สมดุลเฟส m ” และเมื่อทำการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส t เท่านั้น ไม่มีการจ่ายโหลดเฟส m จะเรียกช่วงนี้ว่า “โหลดไม่สมดุลเฟส t ” การจ่าย

โพลต์ในลักษณะนี้ส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย สามารถแสดงรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบทดสอบที่มีการจ่ายโพลต์แบบไม่สมดุลเฟส m และโพลต์ไม่สมดุลเฟส t ดังรูปที่ 9.53 และ 9.54 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า แรงดัน v_{PCCm} และ v_{PCCt} มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ที่มีแอมพลิจูดเท่ากัน และมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา ทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังชุดโพลต์ของระบบทดสอบทั้งในช่วงโพลต์ไม่สมดุลเฟส m และช่วงโพลต์ไม่สมดุลเฟส t ส่งผลให้รูปสัญญาณไซน์กระแสที่แหล่งจ่าย (i_{Sa}, i_{Sb}, i_{Sc}) มีลักษณะผิดเพี้ยนตามไปด้วย โดยมีค่า $\%THD_i$ เท่ากับ 21.8%, 20.4% และ 22.5% ตามลำดับ สำหรับการจ่ายโพลต์ไม่สมดุลเฟส m ส่วนการจ่ายโพลต์ไม่สมดุลเฟส t มีค่าเท่ากับ 6.5%, 23.0% และ 22.5% ตามลำดับ ซึ่งจ่ายกระแสโพลต์ไม่สมดุลทั้งสองลักษณะมีค่า $\%THD_i$ ที่สูงเกินข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 นอกจากนี้ ยังสังเกตอีกได้ว่า รูปสัญญาณกระแส i_{Sa}, i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะไม่สมดุล โดยสามารถตรวจวัดค่า $\%CUF$ ด้วย Power Quality Analyzer รุ่น KEW 6315 ของบริษัท KYORITSU กรณีโพลต์ไม่สมดุลเฟส m และโพลต์ไม่สมดุลเฟส t ได้เท่ากับ 80.7% และ 73.3% ตามลำดับ



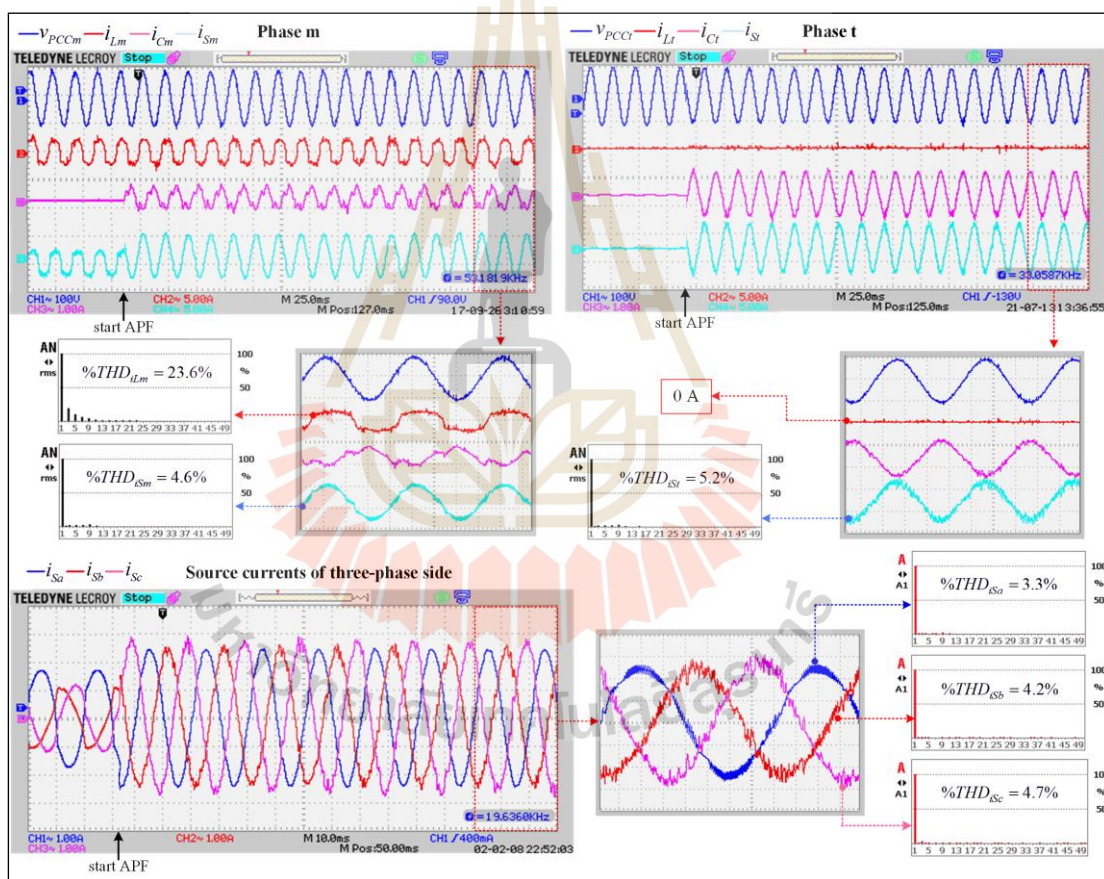
รูปที่ 9.53 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากรณีโพลต์ไม่สมดุลเฟส m



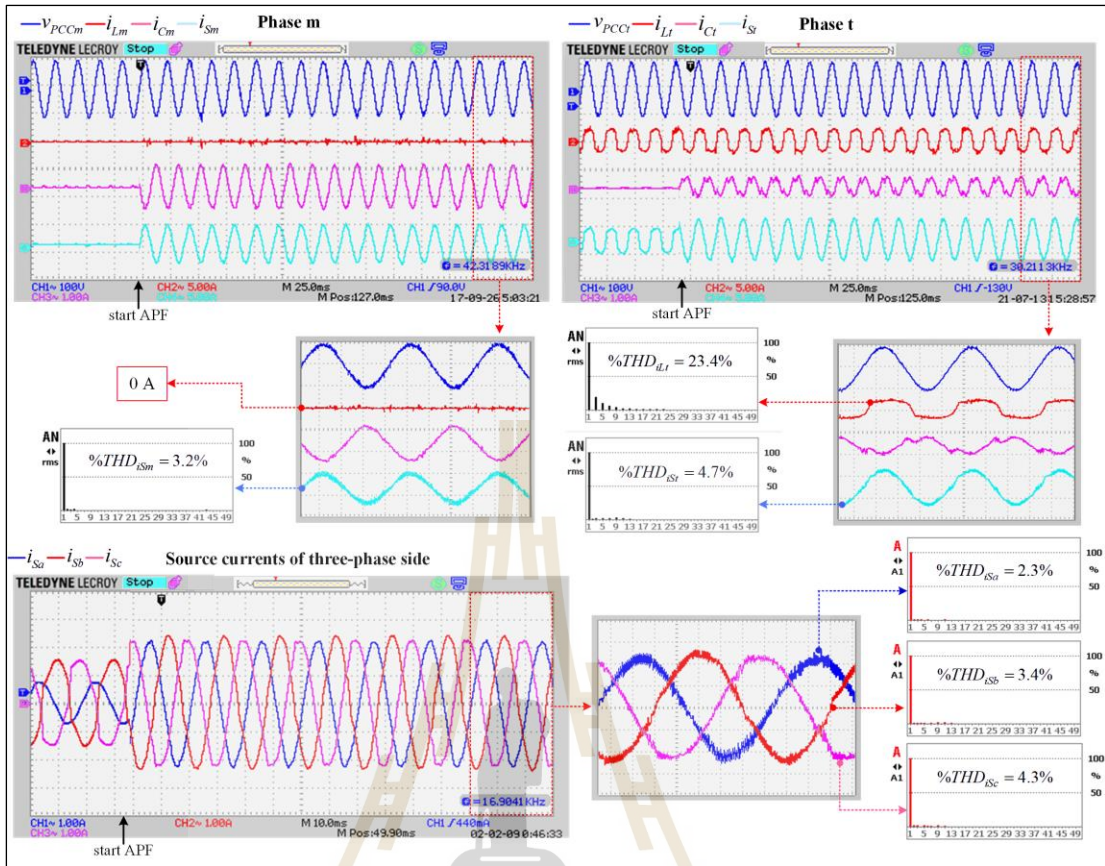
รูปที่ 9.54 รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t

การทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในกรณีโหลดไม่สมดุล ได้นำตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวมาใช้ในส่วนของระบบควบคุมกระแสชดเชย โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว สามารถออกแบบได้ตามที่นำเสนอในบทที่ 8 ในส่วนของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงยังคงใช้ตัวควบคุมพีไอ ผลการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสำหรับระบบโหลดไม่สมดุล แสดงได้ดังรูปที่ 9.55 และ 9.56 โดยเป็นการพิจารณากรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m และกรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t ตามลำดับ เมื่อทำการพิจารณาภายหลังการฉีดกระแสชดเชย (i_{Cm} , i_{Ct}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเข้าสู่ระบบที่จุด PCC พบว่า ผลการฉีดกระแส i_{Cm} และ i_{Ct} ทำให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sm} และ i_{St} กลับมามีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} มีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์ โดยมีค่า $\%THD_i$ ภายหลังการฉีดกระแสชดเชยในแต่ละเฟส ลดลงจากก่อนการชดเชย และค่าดังกล่าวยังอยู่ภายใต้กรอบข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ในทุกสภาวะการเปลี่ยนของกระแสโหลด ดังแสดงในตารางที่ 9.3 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} ภายหลังการชดเชย พบว่า มีลักษณะสมดุล ส่งผลให้ค่า

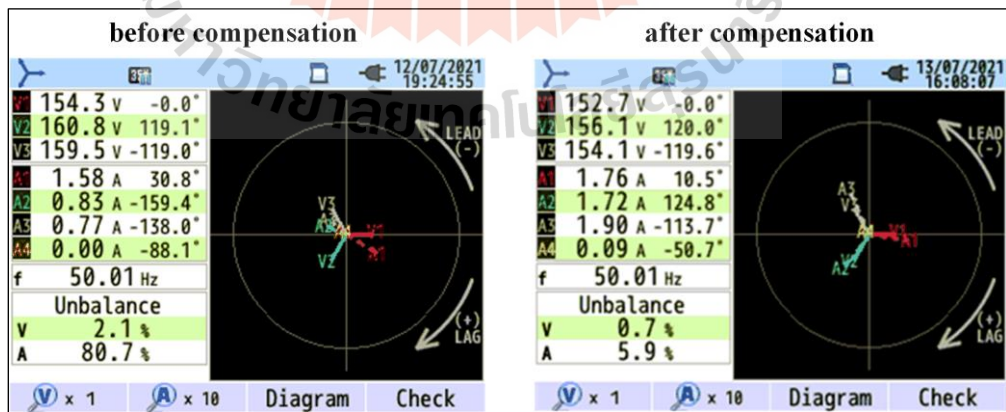
%*CUF* ภายหลังจากการชดเชยมีค่าลดลงจากก่อนการชดเชยเป็นอย่างมากแสดงได้ดังรูปที่ 9.57 และ 9.58 จากดัชนีชี้วัดสมรรถนะดังกล่าว ให้ความหมายว่า รูปสัญญาณกระแส i_{Sa} , i_{Sb} และ i_{Sc} สามารถกลับมามีลักษณะใกล้เคียงรูปสัญญาณไซน์และอยู่ในสภาวะสมดุล ผลจากการกำจัดฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบความไม่สมดุลยังได้ช่วยปรับปรุงค่า *PF* ของระบบให้ดีขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จาก *PF* ที่เพิ่มขึ้นภายหลังจากการชดเชย แสดงได้ดังรูปที่ 9.59 และ 9.60 ในส่วนของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงที่ประมาณ 60 โวลต์ ตามที่ได้ออกแบบไว้ตลอดทุกช่วงการทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 9.61 และ 9.62 ตามลำดับ ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากรณีโหลดไม่สมดุล สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.3



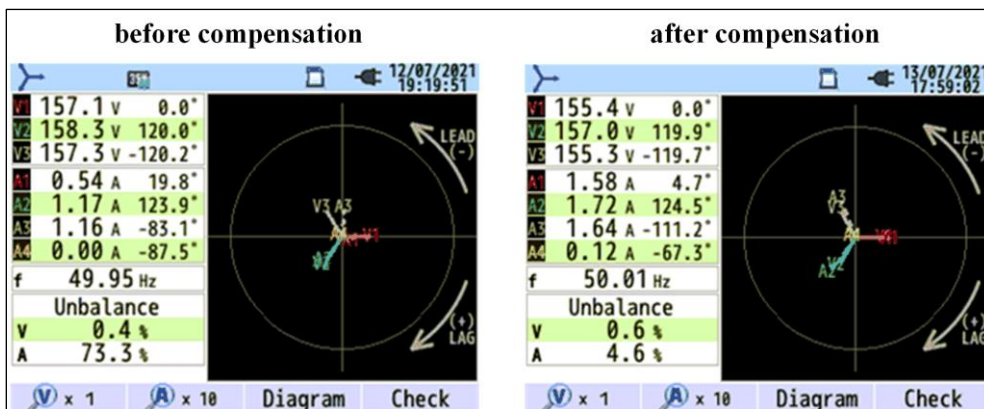
รูปที่ 9.55 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส *m*



รูปที่ 9.56 ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม AM²PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t



รูปที่ 9.57 ผลการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลเฟส m ให้กลับสู่สภาวะสมดุล



รูปที่ 9.58 ผลการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลเฟส t ให้กลับสู่สภาวะสมดุล

before compensation				after compensation				
2021-06-23, 14:28				2021-06-24, 11:10				
	Power	Power	Power		Power	Power	Power	
	A-C	0.651 _{tot}	0.711 _{tot}	0.652 _{tot}	A-C	0.816 _{tot}	0.824 _{tot}	0.989 _{tot}
		kW	kVA	PF		kW	kVA	PF
A		0.304	0.318	0.863	A	0.262	0.265	0.989
B		0.165	0.223	0.184	B	0.268	0.271	0.987
C		0.134	0.168	0.909	C	0.286	0.288	0.991

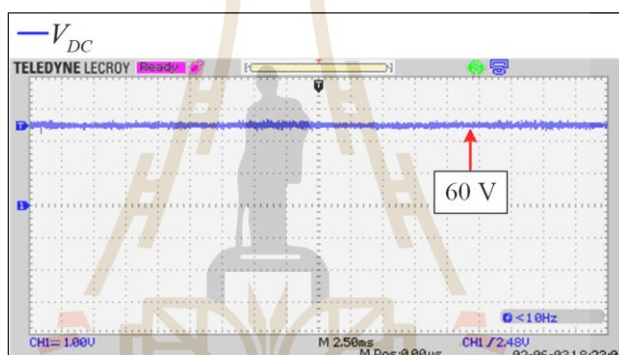
รูปที่ 9.59 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม AM²PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส m

before compensation				after compensation				
2021-06-23, 14:24				2021-06-24, 13:01				
	Power	Power	Power		Power	Power	Power	
	A-C	0.652 _{tot}	0.698 _{tot}	0.769 _{tot}	A-C	0.767 _{tot}	0.774 _{tot}	0.991 _{tot}
		kW	kVA	PF		kW	kVA	PF
A		0.145	0.164	0.679	A	0.240	0.242	0.992
B		0.268	0.271	0.980	B	0.275	0.277	0.992
C		0.249	0.251	0.648	C	0.252	0.255	0.989

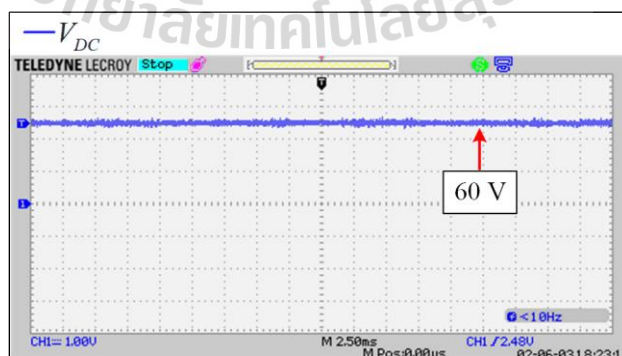
รูปที่ 9.60 การปรับปรุงค่า PF โดยใช้ตัวควบคุม AM²PC กรณีโหลดไม่สมดุลเฟส t

ตารางที่ 9.3 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุม AM²PC
กรณีโหลดไม่สมดุล

สถานะของ กระแสโหลด	%THD _i ด้านเฟสรวม		%THD _i ด้านสามเฟส			%CUF	PF
	เฟส <i>m</i>	เฟส <i>t</i>	เฟส <i>a</i>	เฟส <i>b</i>	เฟส <i>c</i>		
ก่อนการชดเชย							
ไม่สมดุลเฟส <i>m</i>	23.6	-	21.8	20.4	22.5	80.7	0.652
ไม่สมดุลเฟส <i>t</i>	-	23.4	6.5	23.0	21.5	73.3	0.769
ภายหลังการชดเชย							
ไม่สมดุลเฟส <i>m</i>	4.6	5.2	3.3	4.2	4.7	5.9	0.989
ไม่สมดุลเฟส <i>t</i>	3.2	4.7	2.3	3.4	4.3	4.6	0.991



รูปที่ 9.61 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีโหลดไม่สมดุลเฟส *m*
โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม AM²PC



รูปที่ 9.62 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอกรณีโหลดไม่สมดุลเฟส *t*
โดยใช้ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุม AM²PC

9.6 สรุป

การสร้างชุดทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟในห้องปฏิบัติการ ได้ดำเนินการสร้างชุดทดสอบโดยทำการปรับลดพิกัดจากระบบรางไฟฟ้าจากการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์แวร์ในรูป และใช้วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทานแทนโหลดตรงความเร็วสูงของระบบรางไฟฟ้า ระบบควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งประกอบด้วย การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ถูกประมวลผลทางดิจิทัลบนบอร์ด eZdspTMF28335 โดยชุดทดสอบดังกล่าวได้รับการทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากับระบบโหลดสมดุล และโหลดไม่สมดุล เพื่อวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว ผลการทดสอบ ปรากฏว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวมีสมรรถนะในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ดีเมื่อเทียบกับตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต โดยสามารถพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้านอกจากนี้ ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ สามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ตามค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงตามที่ได้ออกแบบไว้ในทฤษฎีของการทดสอบ



บทที่ 10

สรุปและข้อเสนอแนะ

10.1 สรุป

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว โดยมุ่งเน้นการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุล โดยเริ่มต้นการดำเนินงานวิทยานิพนธ์นี้ จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสำหรับระบบรางไฟฟ้า ซึ่งแบ่งการสำรวจงานวิจัยออกเป็น 4 ประเด็น คือ โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้า การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า การคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และระบบควบคุมกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จากผลการสำรวจงานวิจัยดังกล่าว ทำให้ผู้วิจัยได้ทราบองค์ความรู้พื้นฐาน แนวทางดำเนินงานวิจัย รวมทั้งสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปพัฒนาต่อยอดสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รายละเอียดการค้นคว้างานวิจัยต่าง ๆ ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 2

ผู้วิจัยได้ศึกษาและนำเสนอโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟความเร็วสูง ซึ่งเป็นโครงสร้างระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม โดยโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าดังกล่าว มีสถานีไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟทำหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้าสามเฟสจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงกำลังเพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้า และแปลงแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบเฟสรวม จากนั้นส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเหนื่อศีรษะไปยังรถไฟความเร็วสูง โดยรถไฟความเร็วสูงจะใช้หม้อรับไฟหรือสาลีสัมผัสกับสายส่งเพื่อรับไฟฟ้าเข้าสู่ตัวรถ ภายในรถไฟความเร็วสูงจะมีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสม และส่งจ่ายไฟฟ้าไปยังส่วนต่าง ๆ ของโหลดรถไฟความเร็วสูง จากการศึกษา พบว่า การใช้หม้อแปลงเลอบลองค์เป็นหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟจะทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านเฟสรวมมีลักษณะสมดุล ถือเป็น การปรับปรุงคุณภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า สำหรับกระแสไฟฟ้าด้านสามเฟส จะขึ้นอยู่กับกระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้าทางด้านเฟสรวม ดังนั้น การกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่สมดุลให้กลับสู่สถานะสมดุลของระบบรางไฟฟ้า ทำได้โดยการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าทางด้านเฟสรวมให้มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์ และมีลักษณะสมดุล โดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยเข้าสู่ระบบรางไฟฟ้าทางด้านเฟสรวม รายละเอียดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถไฟความเร็วสูงถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 3

การคำนวณกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมรรถนะการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และการชดเชยกระแสที่แหล่งจ่ายไม่

สมดุลให้กลับสู่สภาวะสมดุล เนื่องจากเป็นส่วนที่ส่งผลโดยตรงต่อระบบควบคุมกระแสชดเชย หากการคำนวณกระแสอ้างอิงเกิดข้อผิดพลาด ส่วนต่าง ๆ ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟจะทำงานผิดพลาดด้วยเช่นกัน การคำนวณกระแสอ้างอิงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสและวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะได้ถูกนำเสนอขึ้นในบทที่ 4 ซึ่งวิธีตรวจจับซิงโครนัสมีข้อดีอยู่ในเรื่องการแยกปริมาณทางไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานออกจากปริมาณทางไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิกใด ๆ และการคำนวณค่ากระแสอ้างอิงมีความคลาดเคลื่อนจากกระแสอ้างอิงที่ควรจะเป็น เมื่อพิจารณาการคำนวณกระแสอ้างอิงภายใต้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากรูปสัญญาณไซน์ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของการคำนวณกระแสอ้างอิงให้ดียิ่งขึ้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำการตรวจจับซิงโครนัสมาพัฒนาใหม่ โดยเพิ่มอัลกอริทึมการตรวจจับแรงดันมูลฐานลำดับเฟสบวกและหลักการวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อนในส่วนของวงจรรอกกำลัง ซึ่งเรียกว่า การตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ การคำนวณกระแสอ้างอิงทั้งสองวิธีได้รับการทดสอบและเปรียบเทียบสมรรถนะกับระบบทดสอบทั้งสี่ระบบที่มีลักษณะแตกต่างกัน โดยใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป ผลการทดสอบ ปรากฏว่า วิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะที่ได้พัฒนาขึ้นให้สมรรถนะการคำนวณกระแสอ้างอิงที่ดีกว่าวิธีการตรวจจับซิงโครนัสกับทุกระบบทดสอบ โดยพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิก ค่าเปอร์เซ็นต์ตัวประกอบความไม่สมดุลของกระแส และค่าตัวประกอบกำลัง ด้วยเหตุนี้ การคำนวณกระแสอ้างอิงด้วยวิธีการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะจึงถูกนำมาใช้ทำหน้าที่คำนวณค่ากระแสอ้างอิงให้กับระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบแรงไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

การออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณาจะนำไปสู่สมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่ดี ดังนั้น การออกแบบค่าพารามิเตอร์ และพิกัดของวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับระบบแรงไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง และค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวยังนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่ประกอบไปด้วย ระบบควบคุมกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง โดยวัตถุประสงค์ของระบบควบคุมกระแสชดเชย คือ การควบคุมกระแสชดเชยให้มีค่าใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิงที่คำนวณได้จากการตรวจจับซิงโครนัสแบบเพิ่มสมรรถนะ ในส่วนวัตถุประสงค์ของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง คือ การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงที่ได้จากการออกแบบ โดยตัวควบคุมพีไอถูกนำมาใช้ในระบบควบคุมกระแสชดเชย และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอใช้วิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมกับพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐาน การทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีไออาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป ผลการทดสอบสมรรถนะดังกล่าว พบว่า ระบบควบคุมให้สมรรถนะที่ดีในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าการกระแสไหลที่พิจารณา โดยอ้างอิงจากดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของกระแสที่แหล่งจ่ายทางด้านเฟสรวมและทางด้านสามเฟส นอกจากนี้ ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัว

ควบคุมพีไอที่ได้รับออกแบบ สามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิงทุกย่านการทดสอบ แม้โหลดมีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม ในกรณีการกระแสโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจากกระแสโหลดที่พิจารณา พบว่า ตัวควบคุมพีไอมีสมรรถนะที่ไม่ดีในควบคุมกระแสชดเชย เนื่องจากตัวควบคุมพีไอไม่สามารถควบคุมกระแสชดเชยให้ใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิงในช่วงสภาวะชั่วคราว และกระแสชดเชยมีการกระเพื่อมของรูปสัญญาณสูงในช่วงสภาวะอยู่ตัว ซึ่งอาจเกิดผลเสียต่อระบบรางไฟฟ้า อีกทั้งค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกมีค่าสูงเกินข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ประเด็นดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาตัวควบคุมในส่วนขอระบบควบคุมกระแสชดเชยให้มีสมรรถนะที่ดีขึ้น รายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับการออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ และผลทดสอบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 5

บทที่ 6 ได้นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง เพื่อแก้ไขปัญหาการฉีกกระแสชดเชยที่ผิดพลาดไปจากกระแสอ้างอิงของตัวควบคุมพีไอในสภาวะชั่วคราว เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวมีจุดเด่นทางด้านลดผลกระทบจากการประวิงเวลาทางดิจิทัล ส่งผลให้มีผลตอบสนองที่รวดเร็ว จึงให้สมรรถนะการติดตามกระแสอ้างอิงสำหรับกระแสชดเชยในสภาวะชั่วคราวที่ดี โดยมีการยืนยันผลการทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป ผลการทดสอบ พบว่าตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองมีสมรรถนะในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟที่ดีเมื่อเทียบกับตัวควบคุมพีไอ แต่อย่างไรก็ตาม รูปสัญญาณกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองมีการกระเพื่อมสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกเกินกรอบข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 ประเด็นดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง รายละเอียดของกระบวนการควบคุม การออกแบบ และการทดสอบสมรรถนะระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองได้นำเสนอไว้อย่างละเอียดในบทที่ 6

ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต ได้รับการพัฒนามาจากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง โดยการนำเทคนิคสเปซเวกเตอร์มอดูเลเตอร์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ทำให้สัญญาณการสวิตซ์ในหนึ่งช่วงเวลาการสุ่มตัวอย่างมีค่าไม่คงตัว เนื่องด้วยมีการพิจารณาค่าวัฏจักรหน้าที่ของสัญญาณการสวิตซ์ ด้วยเหตุนี้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตจึงมีสมรรถนะในการควบคุมกระแสชดเชยให้มีค่าใกล้เคียงสัญญาณอ้างอิงที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง อีกทั้งยังคงรักษาจุดเด่นในเรื่องผลตอบสนองที่รวดเร็วของตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง สามารถแก้ไขปัญหาการเพิ่มขึ้นของกระแสที่แหล่งจ่ายในสภาวะชั่วคราวจากการฉีกกระแสชดเชยที่ผิดพลาดไปจากกระแสอ้างอิงของตัวควบคุมพีไอ และลดการกระเพื่อมของรูปสัญญาณกระแสชดเชยที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง โดยทำการยืนยันผลการทดสอบสมรรถนะการควบคุมกระแสชดเชยโดยใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป และได้ทำการเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าจากการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดู

เลตกับระบบทดสอบที่มีการจ่ายโหลดของระบบแรงไฟฟ้าในลักษณะสมดุลและไม่สมดุล ปรากฏว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตให้ค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่ดีกว่าจากตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง อีกทั้งตัวควบคุมดังกล่าวให้ผลการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE standard 519-2014 รายละเอียดของกระบวนการควบคุม การออกแบบ และการทดสอบสมรรถนะระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตสำหรับระบบแรงไฟฟ้าถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 7

การใช้งานโหลดรถความเร็วสูงในระบบแรงไฟฟ้ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดของระบบแรงไฟฟ้าแบบผสมผสานอย่างทันทีทันใด ส่งผลให้ปริมาณฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น การปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบแรงไฟฟ้าจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องอาศัยระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่สามารถปรับตัวได้ตามลักษณะการใช้งาน โหลดรถความเร็วสูงในระบบแรงไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสโหลดของระบบแรงไฟฟ้าแบบผสมผสานอย่างทันทีทันใด ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว ซึ่งได้รับการพัฒนามาจากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต โดยการนำตัวควบคุมพีซีลอจิกมาใช้เป็นกลไกในการปรับค่าอัตราขยายที่เหมาะสมให้กับตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต โดยตัวควบคุมพีซีลอจิกได้รับการออกแบบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกภาพ ค่าเชิงภาษาและตัวแปรเชิงภาษา กฎของพีซี ต่อตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกภาพ และการอนุมานพีซีให้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับมอดูเลตเชิงปรับตัวได้รับการยืนยันสมรรถนะด้านการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้ากับระบบทดสอบที่มีการจ่ายโหลดของระบบแรงไฟฟ้าในลักษณะสมดุล ไม่สมดุล และโหลดแบบผสมผสาน ซึ่งพบว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวที่พัฒนาขึ้นให้ค่าดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าที่ดีกว่าจากตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตในทุกกรณีการจ่ายโหลดของระบบแรงไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ โดยรายละเอียดต่าง ๆ ของระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวสำหรับระบบแรงไฟฟ้านำเสนอไว้ในบทที่ 8

ในบทที่ 9 ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟในห้องปฏิบัติการ ซึ่งทำการปรับลดพิกัดจากระบบแรงไฟฟ้าจากการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป และโหลดรถความเร็วสูงของระบบแรงไฟฟ้าจะแทนด้วยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสที่มีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน โดยได้มีการอธิบายการสร้างชุดทดสอบทั้ง 3 ส่วนอย่างละเอียด ซึ่งประกอบด้วย ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา วงจรกรองกำลังแอกทีฟ และระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ชุดทดสอบดังกล่าวได้รับการทดสอบกับระบบโหลดสมดุล และโหลดไม่สมดุล เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัว ผลการทดสอบ ปรากฏว่า ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวมีสมรรถนะในการควบคุม

กระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลอง และตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลต โดยสามารถพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ ระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรรองกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ สามารถควบคุมแรงดันบัลไฟตรงได้ตามค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงตามที่ได้ออกแบบไว้ในทุกกรณีของการทดสอบ รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการสร้างชุดสอบและผลการทดสอบได้ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 9

10.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการเปรียบเทียบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้วงจรรองกำลังแอกทีฟ และวงจรรองกำลังไฮบริดจ์ เนื่องจากวงจรรองกำลังไฮบริดจ์มีต้นทุนที่ถูกกว่าวงจรรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งอาจส่งผลให้ในอนาคตมีการใช้งานวงจรรองกำลังไฮบริดจ์อย่างแพร่หลายจากจุดเด่นทางด้านต้นทุนการผลิตในเชิงพาณิชย์

2. ควรมีการศึกษาค้นคว้า และดำเนินการเกี่ยวกับการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม เพื่อพิจารณาการปรับปรุงคุณภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าไปพร้อมกับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า เนื่องจากการใช้งานรถไฟความเร็วสูงก่อให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นในระบบรางไฟฟ้า ซึ่งอาจส่งผลให้รถไฟความเร็วสูงทำงานได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ

3. ควรมีการศึกษาค้นคว้า และทำการเปรียบเทียบสมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าต้นทุนที่เหมาะสมในการสร้างวงจรรองกำลังแอกทีฟ และผลกระทบบอื่น ๆ ต่อระบบไฟฟ้าหลัก เพื่อหาข้อสรุปเกี่ยวกับตำแหน่งการติดตั้งวงจรรองกำลังแอกทีฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า กล่าวคือ ใช้ต้นทุนน้อยที่สุดแต่ให้สมรรถนะการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าสูงสุด

4. การใช้งานหม้อแปลงเลอบลองค์ที่พิกัดก่อให้เกิดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า ดังนั้น ควรพิจารณาการใช้งานหม้อแปลงชนิดอื่น ๆ เช่น หม้อแปลงวี-วี หม้อแปลงสก็อต และหม้อแปลงดูบริดจ์ เป็นต้น เพื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น ต้นทุนการผลิตและความสามารถในการรักษาความสมดุลของแรงดันไฟฟ้า สำหรับหาข้อสรุปในการเลือกใช้หม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟ

5. ควรมีการวิเคราะห์การลดลงของกำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถไฟที่มีผลมาจากการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้า เพื่อหาจุดคุ้มทุนในการติดตั้งวงจรรองกำลังแอกทีฟสำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า

6. ควรพิจารณาการติดตั้งวงจรรองกำลังแอกทีฟไว้คู่กับโหลดภายในรถไฟทุกชนิด เช่น ชุดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ชุดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า และอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่าง ๆ ภายในตู้โดยสาร เป็นต้น เพื่อลดปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากโหลดภายในรถไฟ

7. ควรมีการศึกษาค้นคว้า และดำเนินการเกี่ยวกับแหล่งพลังงานของวงจรรองกำลังแอกทีฟ เพื่อให้มีความเพียงพอและเหมาะสมกับระบบที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า อาจมีการนำ

แหล่งพลังงานภายนอก ซึ่งเป็นพลังงานงานทางเลือก เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม มาประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า

8. ควรมีการนำองค์ความรู้เกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟโดยใช้ตัวควบคุมแบบทำนายที่ใช้แบบจำลองร่วมกับการมอดูเลตเชิงปรับตัวไปประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น ระบบรางไฟฟ้ากระแสตรง ระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม สถานีชาร์จไฟของรถยนต์ไฟฟ้า และระบบไฟฟ้าในเครื่องบิน เป็นต้น





รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิง

- กองพล อารีรักษ์. (2549). การระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ฐานันดร ตรงใจ, ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และกองพล อารีรักษ์. (2018). การเปรียบเทียบโครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 13(2): 38-51
- ทศพร ณรงค์ฤทธิ์. (2553). การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ทศพร ณรงค์ฤทธิ์. (2557). การออกแบบตัวควบคุมพีซีแบบปรับตัวสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบสามเฟสสมดุล. วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นคร จันทศร (2554). ข้างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- ปราจรี ประสมศักดิ์. (2553). การประยุกต์พีซีลอจิกสำหรับการควบคุมวงจรรอกกำลังควบคุมแอกทีฟแบบขนาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์. (2559). การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์เชิงปรับตัวสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟในระบบสามเฟสสี่สาย. วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต สาขา วิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ภัคดี สวัสดิ์นะที. (2556). การสร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ทางอ้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุขสันต์ ดิยารัชกุล. (2555). การออกแบบตัวควบคุมกระแสแบบทำนายสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). ปัญญาเชิงคำนวณ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

A. Bueno, M. Gimenez, and, and J. Aller. (2009). Active Harmonic Filters and Balance Compensation on Electric Railway Systems Using the Open Delta Transformer Connection. **13th European Conference on Power Electronics and Applications.**

A. Bueno, J. Aller, J. Restrepo, and J. Restrepo, and T. Habetler. (2010). Harmonic and Balance Compensation Using Instantaneous Active and Reactive Power Control on Electric Railway Systems. **Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC).**

A. Luo, C. Wu, J. Shen, Z. Shuai, and F. Ma. (2011). Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers. **IEEE Transactions on Power Electronics.** 26(10): 2844 - 2856.

A. Steimel. (2012). Power-Electronic Grid Supply of AC Railway Systems. **13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM).**

A. Verdicchio, P. Ladoux, H. Caron, and S. Sanchez. (2018). Future DC Railway Electrification System - Go for 9 kV. **IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC).**

A. Gregene, and H. Camenzind. (1969). Frequency-Selective Integrated Circuits Using Phase-Lock Techniques. **IEEE Transactions on Power Electronics.** 4(4): 216 - 225.

B. Chen, and B. Guo. (1996). Three Phase Models of Specially Connected Transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery.** 11(1): 323 - 330.

B. Mellitt, J. Allan, Z. Shao, W. Johnston, and C. Goodman. (1996). Computer-Based Methods for Induced-Voltage Calculations in AC Railways. **IEE Proceedings B (Electric Power Applications).** 137(1): 59 - 72.

- C. Charalambous, A. Demetriou, A. Lazari, and A. Nikolaidis. (2018). Effects of Electromagnetic Interference on Underground Pipelines Caused by the Operation of High Voltage AC Traction Systems: The Impact of Harmonics. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 33(6): 2664 - 2672.
- C. Chen, C. Lin, and C. Huang. (1993). Reactive and Harmonic Current Compensation for Unbalanced Three-Phase Systems Using the Synchronous Detection Method. **Electric Power Systems Research**. 26(3): 163 - 170.
- C. Dugan, F. McGranaghan, and W. Beaty. (1996). Electrical Power Systems Quality. **McGraw-Hill**.
- C. Shi-Lin, R. Li, and H. Pao-Hsiang. (2004). Traction System Unbalance Problem-Analysis Methodologies. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 19(4): 1877 - 1883.
- C. Tsai-Hsiang. (1994). Comparison of Scott and Leblanc Transformers for Supplying Unbalanced Electric Railway Demands. **Electric Power Systems Research**. 28(3): 235 - 240.
- C. Wu, A. Luo, J. Shen, F. Ma, and S. Peng. (2012). A Negative Sequence Compensation Method Based on a Two-Phase Three-Wire Converter for a High-Speed Railway Traction Power Supply System. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 27(2): 706 - 717.
- D. Ingram, and S. Round. (1997). A Novel Digital Hysteresis Current Controller for An Active Power Filter. **Proceedings International Conference on Power Electronics and Drive Systems**. 2: 744-749.
- E. Kreyszig. (1999). Advanced Engineering Mathematics. **John Wiley & Sons**.
- eZdsp™ F28335 Technical Reference. **Spectrum Digital**.
- F. Foley. (2011). The Impact of Electrification on Railway Signalling Systems. **5th IET Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure and Systems (REIS)**.

- G. Chang, and T.-C. Shee. (2002). A Comparative Study of Active Power Filter Reference Compensation Approaches. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting.**
- G. Firat, G. Yang, and H. Hussain Al-Ali. (2015). A Comparative Study of Different Transformer Connections for Railway Power Supply-Mitigation of Voltage Unbalance. **10th International Conference on Advances in Power System Control, Operation & Management (APSCOM).**
- H. Akagi, E. Watanabe, and M. Aredes. (2007). Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. **John Wiley & Sons.**
- H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae. (1983). Generalized Theory of The Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits. **International Conference on Power Electronics Conference.** 1: 1375 - 1386.
- H. Haitao, Y. Shao, L. Tang, J. Ma, Z. He, and S. Gao. (2018). Overview of Harmonic and Resonance in Railway Electrification Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications.** 54(5): 5227 - 5245.
- H. Kaleybar, and S. Farshad. (2016). A Comprehensive Control Strategy of Railway Power Quality Compensator for AC Traction Power Supply Systems. **Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences.** 24: 4582 - 4603.
- H. Sy-Ruen, and C. Bing-Nan. (2002). Harmonic Study of The Le Blanc Transformer for Taiwan Railway's Electrification System. **IEEE Transactions on Power Delivery.** 17(2): 495 - 499.
- H. Zhengyou, Z. Zheng, and H. Haitao. (2016). Power Quality in High-Speed Railway Systems. **International Journal of Rail Transportation.** 4(2): 71-97.
- H-L. Jou. (1995). Performance Comparison of The Three-Phase Active-Power-Filter Algorithms. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution.** 142(6): 646 - 652.

- I. Colak, O. Kaplan, F. Tas, and R. Bayindir. (2010). DC Bus Voltage Regulation of an Active Power Filter Using a Fuzzy Logic Controller. **Ninth International Conference on Machine Learning and Applications.**
- IEEE Std.141-1993.** IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
- IEEE Std.1459-2010.** IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.
- IEEE Std.519-1993.** IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- IEEE Std.519-2014.** IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- I. Krastev, P. Tricoli, S. Hillmansen, and M. Chen. (2016). Future of Electric Railways: Advanced Electrification Systems with Static Converters for ac Railways. **IEEE Electrification Magazine.** 4(3): 6 - 14.
- J. Dixon, and L. Moran. (2005). A Clean Four-Quadrant Sinusoidal Power Rectifier Using Multistage Converters for Subway Applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics.** 52(3): 653 - 661.
- J. Lee. (2011). Model Predictive Control: Review of The Three Decades of Development. **International Journal of Control, Automation and Systems.** 9(3): 415 - 424.
- J. Mossoba, and P. Lehn. (2003). A Controller Architecture for High Bandwidth Active Power Filters. **IEEE Transactions on Power Electronics.** 18(1): 317 - 325.
- J. Richalet, A. Rault, L. Testud, and J. Papon. (1978). Model Predictive Heuristic Control: Applications to Industrial Processes. **Automatica.** 14: 413 - 428.

- J. Zhou, Y. Yuan, and H. Dong. (2020). Adaptive DC-Link Voltage Control for Shunt Active Power Filters Based on Model Predictive Control. **IEEE Access**. 8: 208348 - 208357.
- J.-C. Wu, and H.-L. Jou. (1996). Simplified Control Method for The Single-Phase Active Power Filter. **IEE Proceedings - Electric Power Applications**. 143(3): 219 – 224.
- K. Antar¹, and S. Abdulaziz. (2018). Single-phase Induction motor Drive Circuit Based on SPWM and SVPWM Techniques. **International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)**. 7(10): 1 – 5.
- K. Antoniewicz, M. Jasinski, M. Kazmierkowski, and M. Malinowski. (2016). Model Predictive Control for Three-Level Four-Leg Flying Capacitor Converter Operating as Shunt Active Power Filter. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 63(8): 5255 – 5262.
- K. Hung-Yuan, C. Tsai-Hsiang. (1998). Rigorous Evaluation of The Voltage Unbalance Due to High-Speed Railway Demands. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**. 47(4): 1385 - 1389.
- K-W Lao, M-C Wong, N. Dai, C-K. Wong, and C-S Lam. (2015). A Systematic Approach to Hybrid Railway Power Conditioner Design with Harmonic Compensation for High-Speed Railway. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 62(2): 930 - 942.
- K-W Lao, N. Dai, W-G Liu, and M.-C. Wong. (2013). Hybrid Power Quality Compensator with Minimum DC Operation Voltage Design for High-Speed Traction Power Systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 28(4): 2024 - 2036.
- K. Mishra, A. Ghosh, A. Joshi, and H. Suryawanshi. (2013). A Novel Method of Load Compensation Under Unbalanced and Distorted Voltages. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 22(1): 288 - 295.

- K. Rameshkumara, V. Indragandhib, K. Palanisamyb, and T.Arunkumaria. (2017). Model Predictive Current Control of Single Phase Shunt Active Power Filter. **Energy Procedia**. 117: 658-665.
- L. Battistelli, D. Lauria, and P. Vernillo. (2001). Control Strategy of Advanced 25 kV-50 Hz Electrified Railway Systems. **IEE Proceedings - Electric Power Applications**. 148(1): 97 – 104.
- L. Guo, X. Gao, Q. Li, W. Huang, and Z. Shu. (2015). Online Antiicing Technique for the Catenary of the High-Speed Electric Railway. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 30(3): 1569 – 1576.
- L. Limongi, R. Bojoi, G. Griva, and A. Tenconi. (2009). Digital Current-Control Schemes. **IEEE Industrial Electronics Magazine**. 3(1): 20 - 31.
- L. Phillips, and D. Harbor. (2000). Feedback Control Systems. **Prentice-Hall**.
- L. Tarisciotti, P. Zanchetta, A. Watson, S. Bifaretti, and J. Clare. (2014). Modulated Model Predictive Control for a Seven-Level Cascaded H-Bridge Back-to-Back Converter. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 61(10): 5375 - 5383.
- L. Tarisciotti, A. Formentini, A. Gaeta, M. Degano, P. Zanchetta, R. Rabbeni, and M. Pucci. (2017). Model Predictive Control for Shunt Active Filters with Fixed Switching Frequency. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 53(1): 296 - 304.
- L. Wu, and W. Mingli. (2017). Single-Phase Cascaded H-Bridge Multi-Level Active Power Filter Based on Direct Current Control in AC Electric Railway Application. **IET Power Electronics**. 10(6): 637-645.
- L. Yu-quan, W. Guo-pei, H. Huang-sheng, W. Li. (2011). Research for the effects of high-speed electrified railway traction load on power quality. **4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)**. 1: 569–573.
- L. Zadeh. (1965). Fuzzy sets. **Information and Control**. 8: 338-353.

- L. Zhao, M. Wu, Q. Liu, P. Peng, and J. Li. (2020). Hybrid Power Quality Compensation System for Electric Railway Supplied by The Hypotenuse of A Scott Transformer. **IEEE Access**. 8: 227024 – 227035.
- L. Denning. (1987). Influence of Commutating Reactance on The Design of DC Power Supply Converters. **Power Engineering Journal**. 1(4): 181 – 188.
- L. Weijun, W. Qinghao, L. Jingzhong, L. Chenyang, L. Zhitong, W. Yi, and Z. Xiangqun. (2016). Research on Transmission Line Power Losses Effected by Harmonics. **China International Conference on Electricity Distribution (CICED)**.
- M. Aredes, J. Hafner, and K. Heumann. (1997). Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 12(2): 311 – 318.
- M. Botte, L. D'Acierno, and M. Pagano. (2020). Impact of Railway Energy Efficiency on the Primary Distribution Power Grid. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**. 69(12): 14131 - 14140.
- M. Brenna, F. Foiadelli, and D. Zaninelli. (2010). Electromagnetic Model of High Speed Railway Lines for Power Quality Studies. **IEEE Transactions on Power Systems**. 25(3): 1301 – 1308.
- M. El-Habrouk, and M. 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.
- M. El-Habrouk, and M. Darwish. (2001). Design and Implementation of A Modified Fourier Analysis Harmonic Current Computation Technique for Power Active Filters using DSPs. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 148(1): 21-28.
- M. Morari, and J. Lee. (1999). Model predictive control: Past, present and future. **Comp. Chem. Eng.** 23(4-5): 667–682.

- M. Rukonuzzaman, and M. Nakaoka. (2001). Single-Phase Shunt Active Power Filter with Adaptive Neural Network Method for Determining Compensating Current. **IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.37243).**
- M. Saitou, N. Matsui, and T. Shimizu. (2003). A Control Strategy of Single-Phase Active Filter Using A Novel d-q Transformation. **38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference.**
- M. Takeda, K. Ikeda, A. Teramoto, and T. Aritsuka. (1988). Harmonic Current and Reactive Power Compensation with An Active Filter. **19th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference.**
- M. Tanta, V. Monteiro, T. Sousa, A. Martins, A. Carvalho, and J. Afonso. (2018). Power Quality Phenomena in Electrified Railways: Conventional and New Trends in Power Quality Improvement Toward Public Power Systems. **International Young Engineers Forum (YEF-ECE).**
- N. Dai, K. Lao, M. Wong, and C. Wong. (2011). Hybrid Power Quality Conditioner for Co-Phase Power Supply System in Electrified Railway. **IET Power Electronics. 5(7): 1084 – 1094.**
- N. Mendalek, and K. Al-Haddad. (2000). Modeling and Nonlinear Control of Shunt Active Power Filter in The Synchronous Reference Frame. **International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings.**
- N. Mendalek, K. Al-Haddad, F. Fnaiech, and L.A. Dessaint. (2002). Sliding Mode Control of 3-Phase Shunt Active Filter in The d-q Frame. **IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings.**
- N. Zargari, and G. Joos. (1995). Performance Investigation of A Current-Controlled Voltage-Regulated PWM Rectifier in Rotating and Stationary Frames. **IEEE Transactions on Industrial Electronics. 42(4): 396 – 401.**

- O. Kukrer. (1996). Discrete-Time Current Control of Voltage-Fed Three-phase PWM Inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**.11: 260–269.
- P. Cortes, J. Rodriguez, C. Silva, and A. Flores. (2012). Delay Compensation in Model Predictive Current Control of a Three-Phase Inverter. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 59: 1323–1325.
- P. Santiprapan, K-L. Areerak, and K-N. Areerak. (2015). The Enhanced - DQF Algorithm and Optimal Controller Design for Shunt Active Power Filter. **International Review of Electrical Engineering**. 10(5): 578-590.
- P. Santiprapan, K-L. Areerak, and K-N. Areerak. (2017). Active Power of Filter using Proportional Plus Resonant Controller. **Engineering Journal**. 21(6): 69-80.
- P. Santiprapan, A. Booranawong, K-L. Areerak, and H. Saito. (2020). Adaptive Repetitive Controller for An Active Power Filter in Three-Phase Four-Wire Systems. **IET Power Electronics**. 13(13): 2756 – 2766.
- R. Ribeiro, T. Rocha, R. Sousa, E. Santos, and A. Lima. (2015). A Robust DC-Link Voltage Control Strategy to Enhance the Performance of Shunt Active Power Filters Without Harmonic Detection Schemes. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 62(2): 803 – 813.
- S. Fukuda, and T. Yoda. (2001). A Novel Current-Tracking Method for Active Filters Based on A Sinusoidal Internal Model [for PWM Invertors]. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 37(3): 888-895.
- S. Gazafardi, A. Langerudy, E. Fuchs, and K. Al-Haddad, (2015). Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 62(5): 3081-3090.
- S. Janpong, T. Narongrit, M. Puangpool, and N. Suthikarnnarunai. (2019). DC-Bus Voltage Control for Single-Phase Active Power Filter using Neural Network. **International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)**.

- S. Kouro, M. Perez, J. Rodriguez, A. Llor, and H. Young. (2015). Model Predictive Control: MPC's Role in the Evolution of Power Electronics. **IEEE Industrial Electronics Magazine**. 9(4): 8-21.
- S. Rahmani, and K. Al-Haddad. (2006). A Single Phase Multilevel Hybrid Power Filter for Electrified Railway Applications. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**.
- S. Sujitjorn; K.-L. Areerak, and T. Kulworawanichpong. (2007). The DQ Axis With Fourier (DQF) Method for Harmonic Identification. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 22(1): 737 – 739.
- S. Tiyyarachakun, K-L. Areerak, and K-N. Areerak. (2014). Instantaneous Power Theory with Fourier and Optimal Predictive Controller Design for Shunt Active Power Filter. **Modelling and Simulation in Engineering**. 2014(1): 1-20.
- S. Zeliang, X. Shaofeng, and L. Qunzhan. (2011). Single-Phase Back-To-Back Converter for Active Power Balancing, Reactive Power Compensation, and Harmonic Filtering in Traction Power System. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 26(2): 334-343.
- S. Zhuo, X. Jiang, D. Zhu, and G. Zhang. (2004). A Novel Active Power Quality Compensator Topology for Electrified Railway. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 19(4): 1036 – 1042.
- Singh, B. Chandra, A. and Al-Haddad, K. (2015). Power Quality: Problems and Mitigation Techniques. **Wiley**.
- T. Furuhashi, S. Okuma, and Y. Uchikawa. (1990). A Study on The Theory of Instantaneous Reactive Power. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 37(1): 86-90.
- T. Mannen, and H. Fujita. (2016). A DC Capacitor Voltage Control Method for Active Power Filters Using Modified Reference Including the Theoretically Derived Voltage Ripple. **IEEE Transactions on Industry Applications**. 52(5): 4179 – 4187.

- T. Narongrit, K-L. Areerak, and K-N. Areerak. (2015). A New Design Approach of Fuzzy Controller for Shunt Active Power Filter. **Electric Power Components and Systems**. 43(6): 685-694.
- T. Narongrit, K-L. Areerak, and K-N. Areerak. (2016): Adaptive Fuzzy Control for Shunt Active Power Filters. **Electric Power Components and Systems**.
- T. Narongrit, P. Santiprapan, and S. Janpong. (2018). A Synchronous Detection with Single-Phase Shunt Active Power Filters. **International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS'18)**. 1-4.
- T. Trongjai, T. Narongrit, K-L. Areerak, and S. Janpong. (2021). The Comparison of Three-Phase and Co-Phase Shunt Active Power Filters for Harmonic Elimination in AC Electric Railway Systems. **International Electrical Engineering Congress (iEECON)**.
- V. Khadkikar, A. Chandra, and B. Singh. (2009). Generalised Single-Phase p-q Theory for Active Power Filtering: Simulation and DSP-Based Experimental Investigation. **IET Power Electronics**. 2(1): 67-78.
- V. Khadkikar, M. Singh, A. Chandra, and B. Singh. (2010). Implementation of Single-Phase Synchronous d-q Reference Frame Controller for Shunt Active Filter under Distorted Voltage Condition. **Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India**.
- W. Brumsickle, D. Divan, G. Luckjiff, J. Freeborg, and R. Hayes. (2005). Power Quality and Reliability. **IEEE Industry Applications Magazine**. 11(1): 48-53.
- W. Jiang, X. Ding, Y. Ni, J. Wang, L. Wang and W. Ma. (2018). An Improved Deadbeat Control for a Three-Phase Three-Line Active Power Filter With Current-Tracking Error Compensation. **IEEE Transaction on Industrial Electronics**. 33(3): 2061-2072.

- W. Xiao-gang, X. Yun-xiang, and S. Ding-xin. (2008). Simplified Model Predictive Control for A Shunt Active Power Filter. **IEEE Power Electronics Specialists Conference.**
- W. Song, J. Fang, Z. Jiang, M. Staines, and R. Badcock. (2019). AC Loss Effect of High-Order Harmonic Currents in A Single-Phase 6.5 MVA HTS Traction Transformer. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity.** 29(5): 5501405.
- Y. Dongmei, G. Qingding, H. Qing, and L. chunfang. (2005). A Novel DSP Based Current Controller with Fuzzy Variable-Band Hysteresis for Active Power Filters. **IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific.**
- Y. Seang Shen. (2007). Control strategies for the More Electric Aircraft starter-generator electrical power system. **Submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy.**
- Y. Song, Z. Liu, A. Rønquist, Petter Nåvik, and Z. Liu. (2020). Contact Wire Irregularity Stochastics and Effect on High-Speed Railway Pantograph–Catenary Interactions. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.** 69(10): 8196 – 8206.
- Z. He, Z. Zheng, and H. Hu. (2016). Power Quality in High-Speed Railway Systems. **International Journal of Rail Transportation.** 4(2): 71-97.
- Z. Shu, Sh. Xie, and Q. Li. (2011). Single-Phase Back-To-Back Converter for Active Power Balancing, Reactive Power Compensation, and Harmonic Filtering in Traction Power System. **IEEE Transactions on industrial electronics.** 52(3): 653-661.
- Z. Sun, X. Jiang, D. Zhu, and G. Zhang. (2004). A Novel Active Power Quality Compensator Topology for Electrified Railway. **IEEE Transactions on Power Electronics.** 19(4): 1036 – 1042.



ภาคผนวก

การตีพิมพ์เผยแพร่บทความที่ได้จากการศึกษา

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

- C. Panpean, K-L Areerak, P. Santiprapan, K-N Areerak, and S. S. Yeoh, (2021). Harmonic Mitigation in Electric Railway Systems Using Improved Model Predictive Control. **Energies**. Volume 14, 2021.
- C. Panpean, K-N Areerak, P. Santiprapan, S. S. Yeoh, and K-L Areerak, Harmonic Elimination in Electric Railway Systems via Improved Predictive Control. **The 2021 National RGJ and RRI Conferences**. Bangkok, Thailand, 14 June 2021
- ชาคริต ปานแป้น, กองพล อารีรักษ์, และกองพัน อารีรักษ์. การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีเชิงโครนัส สำหรับการปรับปรุงคุณภาพกระแสไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า. **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 43**. พิษณุโลก, 28 - 30 ตุลาคม 2563, หน้า 49 – 52.
- ชาคริต ปานแป้น, กองพล อารีรักษ์ และกองพัน อารีรักษ์. การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลัง แยกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันบิดเบี้ยว. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**. ปีที่ 14, ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม-สิงหาคม 2562, หน้า 74-90.
- C. Panpean, K-L Areerak, K-N Areerak, P. Santiprapan, and S. Udomsuk, The Harmonic Detection for Co-Phase Railway System in Distorted Voltage Source Condition. **The 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2019)**. Chonburi, Thailand, 10-13 July 2019, pp. 544-547.

แผนการตีพิมพ์เผยแพร่บทความหลังสำหรับการศึกษา

- C. Panpean, K-L Areerak, P. Santiprapan, and K-N Areerak, Modulated Model Predictive Control for Harmonic Elimination in Electric Railway System. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**. (อยู่ในระหว่างการเขียนบทความ)
- C. Panpean, K-L Areerak, P. Santiprapan, and K-N Areerak, Adaptive Modulated Model Predictive Control for Power Quality Improvement in Electric Railway System. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**. (อยู่ในระหว่างการเขียนบทความ)

ประวัติผู้เขียน

นายชาคริต ปานแป้น เกิดเมื่อวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2535 ที่อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสุราษฎร์ธานี 2 จังหวัดสุราษฎร์ธานี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง (วิศวกรรมไฟฟ้า) โดยมีผลคะแนนเป็นอันดับที่สองของรุ่น จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2557 และในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากนั้นในปีพ.ศ. 2559 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

ปี พ.ศ. 2560 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนการศึกษาภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) จากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ขณะศึกษา ผู้วิจัยได้เดินทางไปทำวิจัยที่มหาวิทยาลัยนอตทิงแฮม ประเทศอังกฤษ เป็นเวลา 6 เดือน นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ Fundamental of Electrical Engineering Laboratory, Electrical Machines, Power Electronic and Embedded Systems Laboratory และ Physics Electrical Laboratory นอกจากนี้

ผู้วิจัยมีความสนใจในงานทางด้านระบบรางไฟฟ้า การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบควบคุมอัตโนมัติ และการประยุกต์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์ นอกจากนี้ ผู้วิจัยมีผลงานทางด้านวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ซึ่งประกอบด้วย วารสารวิชาการจำนวน 4 บทความ การประชุมวิชาการจำนวน 4 บทความ และผลงานจดสิทธิบัตรจำนวน 2 รายการ