

การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2564

HARMONIC ELIMINATION IN AC ELECTRIC RAILWAY SYSTEMS

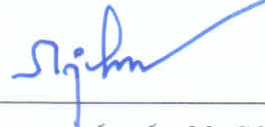


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2021

การกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.กมล อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.ทศพร ณรงค์ฤทธิ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ



(ผศ. ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ฐานันดร ตรึงใจ : การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ (HARMONIC
ELIMINATION IN AC ELECTRIC RAILWAY SYSTEMS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กองพล อารีรักษ์, 241 หน้า

คำสำคัญ : การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน ระบบรางไฟฟ้า
ตัวควบคุมพีไอ หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าได้เลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ (Le Blanc transformer) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าและแปลงจากระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสเป็นระบบไฟฟ้ากำลังสองเฟส (เฟสรวม) และได้กำหนดให้โหลดของระบบรางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทยได้หวั่นเป็นโหลดที่ใช้พิจารณาการกำจัดฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โครงสร้างของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเบ็คทูเบ็คที่มีตัวเก็บประจุร่วม 1 ตัว เป็นแหล่งสะสมพลังงานหรือเรียกว่า วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟดังกล่าวได้ใช้วิธีการดั้งเดิมที่อาศัยค่าพิกัดแรงดันที่จุดต่อร่วม (จุด PCC) และองค์ประกอบของโหลดระบบรางไฟฟ้า การตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้คำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมได้เลือกใช้วิธีการอ้างอิงซิงโครนัส การควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวควบคุมพีไอ สำหรับการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมจะทำการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experiment Kit ผลการจำลองสถานการณ์พบว่า วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมและตัวควบคุมพีไอ ที่ได้จากการออกแบบสามารถกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (%THD) ของกระแสที่จุด PCC หลังการชดเชยมีค่าลดลง และเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE std.519-2014 นอกเหนือจากการใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่าวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม สามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีกว่า และส่งผลให้ค่ากำลังงานสูญเสียที่หม้อแปลงเลอว์บลองค์น้อยกว่ากรณีวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส นอกจากนี้ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้มีการนำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยจำนวน 3 สถานีของระบบรางไฟฟ้าประเทศไทย ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า วงจรรอกกำลัง

แอกทีฟแบบขนานเฟสรวมสามารถกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยได้อย่างมีประสิทธิภาพจากผลดังกล่าวจึงทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของทั้งสามสถานีมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา จำนงค์ ตรีไธ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ๒๒

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม พม.๑๖

THANAN TRONGJAI : HARMONIC ELIMINATION IN AC ELECTRIC RAILWAY SYSTEMS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPOL AREERAK, Ph.D., 241 PP.

Keyword : Harmonic elimination in electric railway systems, Shunt active power filter, Railway systems, PI controller, Railway transformer

This thesis presents the harmonic elimination using Shunt Active Power Filter (SAPF) for AC electric railway systems. The Le Blanc transformer is used to step down voltages and transform the three-phase power system to two-phase (co-phase) power system in power distribution of the railway system. The actual currents of the traction load in Taiwan's railways are considered for harmonic elimination in this thesis. The SAPF structure is the back-to-back single-phase inverter with a capacitor for energy storage. It is called the Co-Phase SAPF. The parameters of Co-Phase SAPF are designed by the conventional approach which depends on the PCC voltage rating and harmonic load components of the electric railway system. The Synchronous Reference Frame (SRF) harmonic detection method is used to calculate the reference currents for the Co-Phase SAPF. The PI controllers are applied to control the compensating current and DC bus voltage of the Co-Phase SAPF. For the performance testing of harmonic elimination in electric railway system by Co-Phase SAPF, the hardware in the loop (HIL) simulation technique using MATLAB/Simulink program and DSP board TMS320C2000TM Experiment Kit is applied to simulate the harmonic elimination in the system. The simulation results show that the Co-Phase SAPF and PI controllers designed by the proposed method can provide the good performance for harmonic elimination in the electric railway system. The percentage of the total harmonic distortion (%THD) value at PCC after compensation are reduced and satisfied the IEEE std.519-2014. In addition, the Three-Phase SAPF is presented to compare the performance of harmonic elimination in the electric railway system with Co-Phase SAPF. The comparison result confirms that the Co-Phase SAPF provides better performance of harmonic elimination and generates low power loss in Le Blanc transformer compared with Three-Phase SAPF. Moreover, this thesis also presents the harmonic elimination of three substations in Taiwan's railway. The simulation result shows that the Co-Phase SAPF provides good

efficiency for eliminating harmonic in each substation. As the result, the harmonic quantity in the power distribution system of three substations is decrease.



School of Electrical Engineering
Academic Year 2021

Student' s Signature ภาณุพงศ์ ตริยกุล
Advisor's Signature 122
Co-advisor's Signature รศ.ดร. อ.ดร.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการ ด้านการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และการเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ดังต่อไปนี้

รศ. ดร. กองพล อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ. ดร. ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์และเรื่องการค้าเดินชีวิต รวมถึงให้กำลังใจแก่ผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่มอบคำแนะนำ และความรู้ทางวิชาการตั้งแต่เข้ามาหาวิทยาลัยจนถึงปัจจุบันมาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณการสนับสนุนจาก ดร. ศศิยา อุดมสุข ดร. จักรกริช ภัคดีโต ดร. ชาศิต ปานแป้น ดร. พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์ นางสาวปทุมพร วงศ์ใหญ่ นายเกื้อกูล กองกาญจนะ นายภูษิต โภคาเพชร นางสาวมณีนรัตน์ ผดุงศิลป์ และนายอดิศักดิ์ รัตนน้ำล้อม ที่ให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมต่างๆ ในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์มาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณอนุสรุ ประกอบแก้ว และคุณอัญชลี รักด่านกลาง เลขานุการประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านเอกสารต่างๆ ที่ต้องใช้ในระหว่างการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ครู อาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน และที่สำคัญอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่อบรมเลี้ยงดู ให้ความรัก ให้กำลังใจ ตลอดจนให้การส่งเสริมทางการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ฐานันดร ตรงใจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ต
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.6 การจัดรูปแบบรายงานวิทยานิพนธ์.....	6
2 ปรัชญาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 บทนำ.....	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า	9
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงส่งจ่ายที่ใช้ในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ	15
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ	19
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงสำหรับใช้งานร่วมกับ วงจรกรองกำลังแอกทีฟ.....	28
2.8	สรุป.....	29
3	การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ	31
3.1	บทนำ.....	31
3.2	การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ	31
3.3	หม้อแปลงส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม	33
3.3.1	การวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส	33
3.3.2	การวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า	40
3.3.3	การวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแปลงสก็อต	43
3.3.4	การวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์	49
3.4	การจำลองสถานการณ์จ่ายโหลดในระบบรางไฟฟ้า.....	58
3.5	สรุป.....	73
4	การตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบรางไฟฟ้า	75
4.1	บทนำ.....	75
4.2	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง	75
4.3	การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส.....	79
4.4	การเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SRF	82
4.5	สรุป.....	92
5	การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า.....	93
5.1	บทนำ.....	93
5.2	ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า.....	93
5.3	โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า	94
5.3.1	วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก	95
5.3.2	วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุรวม	96

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4	การออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า	96
5.4.1	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำวงจรรอก.....	96
5.4.2	การออกแบบตัวเก็บประจุดีซี.....	99
5.5	การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน ..	101
5.6	การออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน	104
5.7	การจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้า	106
5.7.1	ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกกรณีที่ใช้วงจรรอกกำลัง แอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก	106
5.7.2	ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกกรณีที่ใช้วงจรรอกกำลัง แอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจรรวม.....	110
5.8	การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากรณีโหลด มีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป.....	114
5.9	สรุป.....	122
6	การกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟ แบบขนานสามเฟส.....	123
6.1	บทนำ.....	123
6.2	ระบบกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสำหรับ ระบบรางไฟฟ้า	123
6.3	การตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี SRF สำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ	124
6.4	การออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสำหรับระบบรางไฟฟ้า ...	127
6.4.1	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำวงจรรอก.....	127
6.4.2	การออกแบบตัวเก็บประจุดีซี.....	129
6.5	การออกแบบระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส	131
6.5.1	การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว.....	131
6.5.2	การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัสไฟตรง	133

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.6	การจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส	135
6.7	การเปรียบเทียบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าระหว่างการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสและการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม	138
6.7.1	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า	138
6.7.2	การเปรียบเทียบค่ากำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลอนด์	143
6.7.3	การเปรียบเทียบข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ในการประมาณราคาสำหรับการสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	156
6.8	สรุป	160
7	การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	162
7.1	บทนำ	162
7.2	ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้าในประเทศไทยได้หวั่น	162
7.3	การกำจัดฮาร์มอนิกในสถานีไฟฟ้าย่อยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	167
7.4	ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้า	170
7.5	สรุป	176
8	สรุปและข้อเสนอแนะ	177
8.1	สรุป	177
8.2	ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต	179
	เอกสารอ้างอิง	180
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. โค้ดโปรแกรมภาษาซีการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าแบบฮาร์ดแวร์ในรูป	188
	ภาคผนวก ข. การประมาณราคาสำหรับการสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	196

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	205
ประวัติผู้เขียน	241



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า	10
2.2 รายละเอียดของระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า	14
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงส่งจ่ายที่ใช้ในระบบรางไฟฟ้า	16
2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบราง	18
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและการออกแบบวงจรรองกำลังแอกทีฟ	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรองกำลังแอกทีฟ.....	21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอง กำลังแอกทีฟ	25
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอง กำลังแอกทีฟ	28
3.1 การเปรียบเทียบค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิกรณีการจ่ายโหลด ทั้งสองเฟส	63
3.2 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิกรณีการจ่ายโหลดทั้งสองเฟส.....	63
3.3 การเปรียบเทียบค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิกรณีการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M....	67
3.4 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิกรณีการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M.....	67
3.5 การเปรียบเทียบค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิกรณีการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส T	71
3.6 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิกรณีการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส T	71
3.7 การเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวม	73
4.1 การระบุค่า p_L^* และ q_L^* ตามเงื่อนไขที่ต้องการชดเชย	78
4.2 การเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และ วิธี SRF ในกรณี 1	92
4.3 การเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และ วิธี SRF ในกรณี 2	92
5.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกระหว่างการไขว้วงจรรองกำลัง แอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกและโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุรวม..	113
5.2 ข้อมูลกระแสโหลดของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา	116
5.3 ค่า %THD _i ของกระแสที่แหล่งจ่ายและค่าตัวประกอบกำลังก่อนและหลังการชดเชย	121

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.1	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบสำหรับทดสอบการจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า.....139
6.2	สัดส่วนการกระจายตัวของค่า P_{TSL-R} สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแห้ง.....145
6.3	สัดส่วนการกระจายตัวของค่า P_{TSL-R} สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดของเหลว.....145
6.4	ผลการตรวจวัดกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์กรณีใช้วงจรรอกกำลัง แอกทีฟแบบขนานสามเฟส 149
6.5	การทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจรของหม้อแปลงเลอว์บลองค์ 150
6.6	ผลการตรวจวัดกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์กรณีใช้ วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม.....152
6.7	กำลังงานสูญเสียประเภทต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์.....155
6.8	พิกัดอุปกรณ์ที่พิจารณาสำหรับสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน 158
6.9	การเปรียบเทียบการจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าระหว่างกรณีที่ใช้ วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส และกรณีที่ใช้วงจรรอกกำลัง แอกทีฟแบบขนานเฟสรวม 159
7.1	ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกเฉลี่ยในระบบรางไฟฟ้าประเทศไต้หวัน.....164
7.2	การเลือกใช้ค่า L_f สำหรับแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อย.....168
7.3	การเลือกใช้ค่า C_{dc} สำหรับแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อย.....168
7.4	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อย.....170
7.5	ผลการจัดฮาร์มอนิกที่สถานีไฟฟ้าย่อยในแต่ละช่วงเวลา.....175
ข.1	พิกัดอุปกรณ์ที่พิจารณาสำหรับสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน.....198
ข.2	การประมาณราคาสำหรับการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส 200
ข.3	การประมาณราคาสำหรับการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม 201

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม..... 4
2.1	แผนภาพผลการปรัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฮาร์มอนิก ในระบบรางไฟฟ้า 30
3.1	ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบหนึ่งเฟส 32
3.2	ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม 33
3.3	ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส 34
3.4	โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส 35
3.5	การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส 37
3.6	ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของระบบรางที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า..... 40
3.7	โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า 41
3.8	ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของระบบรางที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต..... 43
3.9	โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต 44
3.10	การจ่ายโหลดอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต 46
3.11	ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของระบบรางที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์..... 49
3.12	โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์ 50
3.13	การจ่ายโหลดอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์ 53
3.14	ระบบจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส..... 58
3.15	ระบบจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า..... 59
3.16	ระบบจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต..... 59
3.17	ระบบจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์..... 60
3.18	ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดทั้งสองเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้า แบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส 61
3.19	ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดทั้งสองเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้า แบบโอเพนเดลต้า 62
3.20	ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดทั้งสองเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต 62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดทั้งสองเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์	63
3.22 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M ของหม้อแปลงไฟฟ้า แบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส	65
3.23 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดทั้งสองเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้า แบบโอเพนเดลต้า	66
3.24 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต	66
3.25 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M ของหม้อแปลงไฟฟ้า แบบเลอรืบลองค์แบบโอเพนเดลต้า	67
3.26 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M ของหม้อแปลงไฟฟ้า แบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส	69
3.27 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดทั้งสองเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้า แบบโอเพนเดลต้า	70
3.28 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต	70
3.29 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M ของหม้อแปลงไฟฟ้า แบบเลอรืบลองค์แบบโอเพนเดลต้า	71
4.1 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$	76
4.2 การแยกปริมาณ $\tilde{p}_L$ ด้วย HPF	77
4.3 การแยกปริมาณ $\tilde{p}_L$ ด้วย LPF	77
4.4 สเปกตรัมของค่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง	77
4.5 แผนภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ	79
4.6 การแยกปริมาณ $\tilde{i}_{Ld}$ ด้วย HPF	80
4.7 การแยกปริมาณ $\tilde{i}_{Ld}$ ด้วย LPF	80
4.8 สเปกตรัมของค่ากระแสบนแกนดี	81
4.9 แผนภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF	82
4.10 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการตรวจสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก	83
4.11 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ เฟส M สำหรับกรณีที่ 1	85
4.12 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ เฟส T สำหรับกรณีที่ 1	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 มุมเฟสระหว่าง v_s และ i_s ของวิธี PQ สำหรับกรณีที่ 1	86
4.14 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF เฟส M สำหรับกรณีที่ 1	86
4.15 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF เฟส T สำหรับกรณีที่ 1	87
4.16 มุมเฟสระหว่าง v_s และ i_s ของวิธี SRF สำหรับกรณีที่ 1	87
4.17 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ เฟส M สำหรับกรณีที่ 2.....	88
4.18 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ เฟส T สำหรับกรณีที่ 2.....	89
4.19 มุมเฟสระหว่าง v_s และ i_s ของวิธี PQ กรณีที่ 2.....	89
4.20 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF เฟส M สำหรับกรณีที่ 2	90
4.21 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF เฟส T สำหรับกรณีที่ 2	90
4.22 มุมเฟสระหว่าง v_s และ i_s ของวิธี SRF กรณีที่ 2	91
5.1 ระบบการจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบแรงไฟฟ้า.....	94
5.2 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก	95
5.3 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม	96
5.4 สเปกตรัมกระแสไหลในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาการจัดฮาร์มอนิก	98
5.5 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่โหลดกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก	100
5.6 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่โหลดกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม.....	100
5.7 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ	102
5.8 ระบบควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ด้วยเทคนิค PWM.....	103
5.9 การสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยเทคนิค PWM	104
5.10 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ	105
5.11 ระบบการจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีโครงสร้าง แบบตัวเก็บประจุแยก	107
5.12 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส M กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก	108
5.13 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส T กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก	108
5.14 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของเฟส M กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก.....	109
5.15 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของเฟส T กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก.....	109

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.16 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม.....	110
5.17 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส M กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม.....	111
5.18 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส T กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม.....	112
5.19 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีโครงสร้างตัวเก็บประจุร่วม...	112
5.20 การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink และบอร์ด TMS320C2000™ Experiment Kit.....	115
5.21 ไดอะแกรมการรับส่งข้อมูลของการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป.....	116
5.22 ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าแบบฮาร์ดแวร์ในลูป.....	118
5.23 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในลูปของเฟส M.....	120
5.24 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในลูปของเฟส T.....	120
5.25 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง.....	121
6.1 ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสำหรับระบบรางไฟฟ้า.....	124
6.2 แผนภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF สำหรับระบบสามเฟส.....	125
6.3 การใช้ LPF แยกปริมาณ $\tilde{I}_{Ld}$	126
6.4 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสในระบบรางไฟฟ้า.....	127
6.5 สเปกตรัมกระแสไหลดสามเฟส (กรณีเฟส A) ในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาการกำจัดฮาร์มอนิก.....	128
6.6 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ไหลด.....	130
6.7 ระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส.....	131
6.8 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ.....	132
6.9 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ.....	133
6.10 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส.....	136
6.11 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า.....	137
6.12 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส.....	137

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.13	แสดงฝั่งแรงสูงและฝั่งแรงต่ำของระบบรางไฟฟ้า.....138
6.14	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกกรณีใช้วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส 140
6.15	ผลการจำลองสถานการณ์กรณีการใช้วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม 142
6.16	วงจรสมมูลแสดงค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ 146
6.17	การสร้างวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส 157
6.18	การสร้างวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม 157
7.1	สถานีไฟฟ้าย่อยในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าประเทศไต้หวัน.....163
7.2	ผลการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมด้วยวงจรรองกำลัง แอกทีฟแบบขนาน 166
7.3	ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม (ยกตัวอย่างสถานี Hsinchu).....169
7.4	ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกทั้งสามสถานีไฟฟ้าย่อย.....172
7.5	ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิก 173
ข.1	การสร้างวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส 197
ข.2	การสร้างวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม 197
ข.3	วงจรไอจีบีทีโมดูลรุ่น FZ1500R33HE3 198
ข.4	ตัวเก็บประจุ รุ่น B25645A2677K003 199
ข.5	ตัวเหนี่ยวนำ รุ่น B82727E6403A040 199
ข.6	ตัวเก็บประจุ รุ่น B25645A1108K003 201

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	=	อัตราส่วนของหม้อแปลง
C_{dc}	=	ตัวเก็บประจุดีซี
h	=	อันดับฮาร์โมนิก
i	=	กระแสไฟฟ้า
i_C^*	=	ค่ากระแสไฟฟ้าชดเชยอ้างอิง
i_C	=	ค่ากระแสไฟฟ้าชดเชย
i_S	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย
i_L	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย
I	=	กระแสไฟฟ้าในรูปเฟสเซอร์
L_f	=	ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง
N_1	=	จำนวนรอบขดลวดหม้อแปลงฝั่งปฐมภูมิ
N_2	=	จำนวนรอบขดลวดหม้อแปลงฝั่งทุติยภูมิ
pf	=	ค่าตัวประกอบกำลัง
pf _{disp}	=	ค่าตัวประกอบกำลังการกระจัด
pf _{dist}	=	ค่าตัวประกอบกำลังความเพี้ยน
p_L	=	ค่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง
$\tilde{p}_L$	=	กำลังแอกทีฟที่เป็นปริมาณฮาร์โมนิก
$\bar{p}_L$	=	กำลังแอกทีฟที่เป็นปริมาณมูลฐาน
q_L	=	ค่ากำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง
R	=	ค่าความต้านทาน
u^*	=	ค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง
v	=	แรงดันไฟฟ้า
V	=	แรงดันไฟฟ้าในรูปเฟสเซอร์
Z	=	ค่าอิมพีแดนซ์
X	=	ค่ารีแอกแตนซ์
α	=	แกนแอลฟ่า
β	=	แกนเบต้า

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ζ	=	อัตราส่วนการหน่วง
ω_n	=	ความถี่ธรรมชาติ
%THD	=	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม
%THD _i	=	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก
AC	=	ไฟฟ้ากระแสตรง
CSI	=	Current Source Inverter
DC	=	ไฟฟ้ากระแสสลับ
HIL	=	Hardwar in the loop
HPF	=	High pass filter
IGBT	=	Isolate gate bipolar transistor
LPF	=	Low pass filter
PCC	=	จุดต่อร่วม
PLL	=	Phase Lock Loop
PQ	=	Instantaneous reactive power
PWM	=	Pulse width modulation
SAPF	=	Shunt active power filter
SRF	=	Synchronous reference frame
VSI	=	Voltage Source Inverter

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบรางไฟฟ้ามีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในการขนส่งมวลชนและการขนส่งสินค้าในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากการขนส่งด้วยระบบรางถือเป็นการขนส่งที่มีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยสูงเมื่อเทียบกับการขนส่งประเภทอื่น ๆ (นคร จันทกร, 2016) ระบบรางไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้กำลังไฟฟ้าสำหรับการขับเคลื่อน ซึ่งการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบรางจะต่อใช้งานกับโหลดอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ชุดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ชุดวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เพื่อใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าใช้สอยภายในขบวนรถไฟ เช่น โหลดแสงสว่าง โหลดระบบปรับอากาศ เป็นต้น โดยโหลดเหล่านี้เป็นโหลดมีลักษณะการทำงานไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear loads) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางไฟฟ้าที่เรียกว่า ฮาร์โมนิก (Harmonic) อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังในระบบมีค่าต่ำลงด้วย ปัญหาดังกล่าวก่อให้เกิดผลเสียหลายประการต่อระบบรางไฟฟ้า เช่น ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในสายส่ง ทำให้ความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบรางมีค่าลดลง (A. Luo and et al., 2011) เกิดปัญหาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่เหวี่ยงขึ้นหรือลง (Pantograph) มีขนาดลดลง (P-C. Tan and et al., 2004) เกิดสัญญาณรบกวนทำให้ระบบสื่อสารและระบบอัตโนมัติสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมรถไฟทำงานผิดพลาด รวมถึงทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาด (Z. He, Z. Zheng and H. Hu., 2016) เป็นต้น จากผลเสียที่เกิดขึ้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการกำจัดฮาร์โมนิกให้ลดน้อยลง การกำจัดฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี เช่น การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter: PPF) (H. Hu, Z. He and S. Gao., 2015) การใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) (L. Wu and W. Mingli., 2017) หรือการใช้งานร่วมกันเรียกว่าวงจรไฮบริดจ์ (Hybrid) (S. Senini and P. J. Wolfs., 2000) ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการศึกษาการกำจัดกระแสฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานเท่านั้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิผลการกำจัดกระแสฮาร์โมนิกสูง สามารถชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้ มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของโหลดในระบบรางไฟฟ้า รวมถึงไม่ประสบปัญหาเรโซแนนซ์เมื่อเทียบกับการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Xiangzheng X., 2012) การกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานมีจุดพิจารณาการจัด

ฮาร์มอนิกอยู่ด้วยกันสองตำแหน่ง คือ ที่ตำแหน่งฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองเฟสและที่ตำแหน่งจุดต่อร่วม (point of common coupling: PCC) ที่ฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเริ่มต้นพิจารณาการกำจัดฮาร์มอนิกทางฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอร์บลองค์ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม และได้มีการนำเสนอการเปรียบเทียบกับ การกำจัดฮาร์มอนิกที่จุด PCC โดยตรงด้วยการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสด้วยเช่นกัน

ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งประกอบด้วย 5 ส่วนที่สำคัญ คือ ระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม การตรวจจับฮาร์มอนิก โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ระบบควบคุมการฉีดกระแสชดเชย และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ส่วนที่หนึ่ง ระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมประกอบด้วย ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางโดยเริ่มต้นจากหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับระบบราง (Traction Transformer) ที่รับแรงดันไฟฟ้าที่มีพิกัดแรงดันตั้งแต่ 69 kV ขึ้นไป จากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้า (Transportation System) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงมาที่ระดับแรงดันในช่วง 25-27.5 kV ก่อนจะจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดรถไฟ (Traction Load) โดยความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ใช้งานจะมีค่าเท่ากับ 50 Hz หรือ 60 Hz ขึ้นกับระบบไฟฟ้าของแต่ละประเทศ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางในอดีตจะใช้เป็นระบบหนึ่งเฟส (Single-phase Power Supply Systems) ซึ่งระบบนี้จะใช้งานร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส (Single-Phase Linear Transformer) (B.-K. Chen and B.-S. Guo, 1996) เนื่องจากการใช้หม้อแปลงดังกล่าวมีต้นทุนการผลิตต่ำและง่ายต่อการนำมาใช้งาน อย่างไรก็ตาม การใช้งานระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบหนึ่งเฟสดังกล่าวส่งผลให้เกิดให้เกิดปัญหาเฟสไม่สมดุลขึ้นที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (A. Luo and et al., 2011) จากปัญหาเฟสไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจึงมีการใช้งานระบบหนึ่งเฟสแบบ 2 ชุด หรือ 2 เฟส เรียกว่า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสรวม (Co-phase Power Supply Systems) (Z. Shu and et al., 2013) โดยระบบนี้จะใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงแรงดันจากระบบสามเฟสให้เป็นระบบสองเฟสสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าที่นิยมใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสรวมมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส (ใช้ 2 ตัว) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า (Open Delta Transformer) (Ch.-P. Huang and et al., 2006) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก๊อต (Scott Transformer) (B.-K. Chen and B.-S. Guo, 1996) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอร์บลองซ์ (Leblanc Transformer) (K.-C. Lu and N. Chen., 1997) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอร์บลองค์ เนื่องจากการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าง่ายสามารถช่วยลดปัญหาเฟสไม่สมดุลทางฝั่งปฐมภูมิได้ (T.-H. Chen., 1994) และยังมีต้นทุนราคาที่ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ (Ch.-P. Huang and et al., 2006) นอกจากนี้ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ

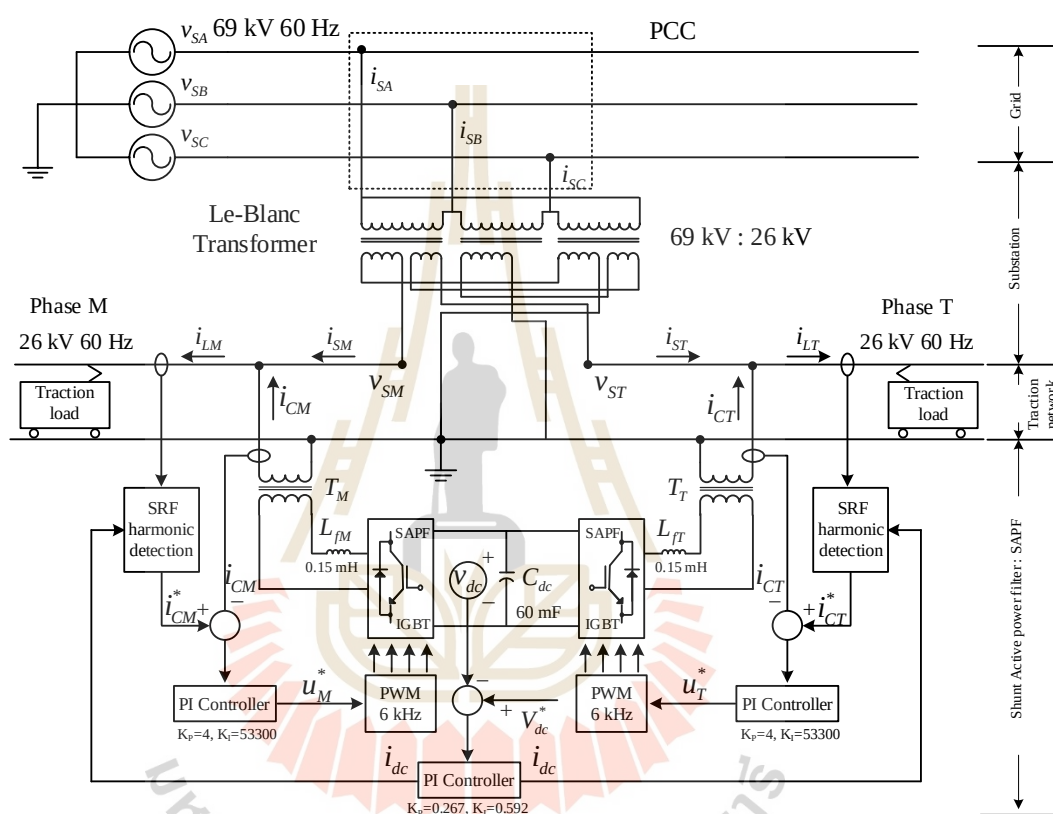
เลอร์บลองค์ยังเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบรางไฟฟ้าของประเทศไต้หวัน(S-R. Huang and B-N. Chen., 2002) ซึ่งเป็นระบบรางไฟฟ้าที่นำมาใช้อ้างอิงสำหรับพิจารณากำจัดฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ส่วนที่สอง การตรวจจับฮาร์มอนิกใช้สำหรับคำนวณค่ากระแสอ้างอิงในการชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานให้สามารถฉีดกระแสชดเชยได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ซึ่งปัจจุบันการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (Instantaneous reactive power theory: PQ) (V. Khadkikar, A.Chandra and B.N. Singh, 2009) วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (Synchronous Reference Frame: SRF) (V. Khadkikar, M. Singh, A. Chandra and B. Singh, 2010) วิธีฟูรีเยร์วินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis: SWFA) (M. El-Habrouk and M. K. Darwish, 2001) และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neuron Network: NN) (M. Cirrincione and et al., 2009) เป็นต้น โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า 2 วิธี คือ วิธี PQ และ วิธี SRF ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสองวิธีเป็นวิธีที่สามารถตรวจจับฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้อง มีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ และสามารถชดเชยค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบไฟฟ้าได้ (M. Gonzalez et al., 2004)

ส่วนที่สาม วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน สามารถแบ่งได้เป็น 2 โครงสร้าง คือ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) (C.-Y Hsu and H.-Y Wu., 1995) และมีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI) (L. Benchaita, S. Saadate and A. Salemnia., 1999) ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน เนื่องจากเป็นวงจรที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดี มีความซับซ้อนในการควบคุมน้อย มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบไฟฟ้า และยังมีราคาต้นทุนถูก (A Zouidi and et al., 2006) เมื่อเทียบกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส

ส่วนที่สี่ ระบบควบคุมกระแสชดเชย ทำหน้าที่ควบคุมให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานฉีดกระแสชดเชยได้ตามค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก ซึ่งสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) (B. Han., 2009) ที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบพัลส์เบรียดม (Pulse Width Modulation: PWM) (S. Fukuda and T. Yoda , 2001) เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวเป็นวิธีควบคุมพื้นฐานที่มีประสิทธิภาพการควบคุมที่ดี และง่ายต่อการออกแบบ

ส่วนที่ห้า ระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง ทำหน้าที่ควบคุมให้ค่าแรงดันบัลไฟตรงของ วงจรกรองกำลังแอกทีฟมีค่าตรงกับค่าแรงดันบัลไฟตรงอ้างอิงที่ออกแบบไว้ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวควบคุมพีไอ (H.-L. Jou., 1994) ในการควบคุมแรงดันดังกล่าวเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบใช้งานตัวควบคุมพีไอมีความเรียบง่าย นอกจากนี้ ตัวควบคุมดังกล่าวยังให้สมรรถนะที่ดีเพียงพอสำหรับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง



รูปที่ 1.1 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน
- 1.2.3 เพื่อดำเนินการเปรียบเทียบการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าระหว่างวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง และวิธีกรอบอ้างอิงโครนส์ สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.2.4 เพื่อศึกษาการออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดัน บัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.2.5 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าระหว่างใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมและวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส

1.2.6 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ค่ากำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอร်บลองค์ ระหว่างการกำจัดฮาร์มอนิกโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมและวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส

1.2.7 เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์การติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมและวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสำหรับระบบรางไฟฟ้า

1.2.8 เพื่อสร้างโปรแกรมจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกเป็นระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม (Co-phase) ของประเทศไต้หวัน (Sy-Ruen H. and Bing-Nan C., 2002) ระบบแรงดัน 26 kV 60 Hz

1.3.2 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอร်บลองค์ สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าสามเฟสเป็นระบบไฟฟ้าสองเฟส

1.3.3 โหลดของระบบรางไฟฟ้า คือ โหลดที่ประกอบด้วยองค์ประกอบมูลฐานและ องค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าของประเทศไต้หวัน (Sy-Ruen H. and Bing-Nan C., 2002) ซึ่งจะแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติ

1.3.4 แรงดันไฟฟ้าของระบบราง จะพิจารณาทั้งในกรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็น รูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์และกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน

1.3.5 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ Simulink บนโปรแกรม MATLAB

1.3.6 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่าย แรงดัน

1.3.7 การวัดประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกจะใช้ค่า % THD เป็นตัวชี้วัด โดยจะพิจารณา ตรวจวัดที่ตำแหน่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอร်บลองค์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณากำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น

1.4.2 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โหลดค่าเฉลี่ยที่ได้จากตรวจวัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าของประเทศไต้หวัน (Sy-Ruen H. and Bing-Nan C., 2002) ซึ่งกำหนดให้มีขนาดเท่ากันทั้งสองเฟส (เฟส M และเฟส T)

1.4.3 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการกำจัดฮาร์มอนิกทั้งฝั่งปฐมภูมิและฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงในระบบรางไฟฟ้า

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ

1.5.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.5.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวิธีทฤษฎีกำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง และวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

1.5.4 ได้ระบบควบคุมกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

1.5.5 ได้ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีสมรรถนะที่ดี

1.5.6 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์กำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

1.5.7 ได้ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์การติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมและวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส

1.5.8 ได้ระบบจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าแบบเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

1.5.9 ได้บทความวิจัยเผยแพร่ในระดับชาติ และระดับนานาชาติ

1.6 การจัดรูปแบบรายงาน

โครงร่างวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วย 8 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย รวมถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ และการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

บทที่ 3 นำเสนอโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม นำเสนอการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสร่วม 4 ประเภท ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพิลเดลต้า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรบลองค์

บทที่ 4 นำเสนอขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม 2 วิธี คือ การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ขณะหนึ่งและวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส รวมถึงนำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าของทั้งสองวิธี

บทที่ 5 กล่าวถึงระบบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม โดยเนื้อหาประกอบด้วย โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบระหว่างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกและวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม และในส่วนท้ายของบทนี้ได้นำเสนอการทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโดยใช้วิธีการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูบที่ใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experiment Kit

บทที่ 6 กล่าวถึงการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส ประกอบไปด้วย ขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัสสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสำหรับระบบรางไฟฟ้า การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิวที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ การออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ รวมถึงนำเสนอการเปรียบเทียบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสและวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม โดยทำการเปรียบเทียบ 3 หัวข้อ คือ สมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกกำลังงานสูญเสียที่หม้อแปลงไฟฟ้าเลอรบลองค์ และจำนวนและพิกัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองกรณี

บทที่ 7 กล่าวถึงระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของประเทศได้หวัน โดยเนื้อหาประกอบด้วย ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของประเทศได้หวัน ข้อมูลปริมาณฮาร์มอนิกของสถานีไฟฟ้าย่อย การติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดในแต่ละ

สถานีไฟฟ้าย่อย และการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยรวมถึงฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในแหล่งจ่ายไฟฟ้ารวมของระบบแรงไฟฟ้า

บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดโปรแกรมภาษาซีสำหรับการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป ข. แสดงตัวอย่างการประมาณราคาสำหรับการสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ค. แสดงรายการบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างทำวิจัยวิทยานิพนธ์



บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวกับการกำจัตรฮารมอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสลัับด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยดังกล่าว พบว่า ในอดีตที่ผ่านมาผู้ทำการวิจัยคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในบทนี้ จึงนำเสนอผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้ากระแสลัับ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการกำจัตรฮารมอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยในส่วนแรกโครงสร้างของระบบรางไฟฟ้ากระแสลัับจะประกอบด้วยหัวข้องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้าส่งจ่ายที่ใช้ในระบบรางไฟฟ้า ในส่วนที่สอง ระบบการกำจัตรฮารมอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานซึ่งประกอบด้วยหัวข้องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การตรวจจัตรฮารมอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การควบคุมกระแสชดเชยและเทคนิคการสวิตช์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งในแต่ละหัวข้อผู้วิจัยจะเรียงลำดับการนำเสนอตามปีที่ตีพิมพ์งานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน คณะผู้วิจัย รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไว้พอสังเขป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามเทคโนโลยีการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งจากที่ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าพบว่าระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบ คือ ระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) และระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสลัับ (Alternating Current: AC) โดยปรัทัศนัวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งจากตารางดังกล่าวสามารถสรุปรายละเอียดของระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า และประเทศที่ใช้งานได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1915	J. V. B. Duer	นำเสนอระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าที่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้วิธีการจ่ายไฟฟ้าแบบรางที่สาม (Third rail) พิกัดแรงดัน 700 V โดยนำเสนอรายละเอียดของโครงสร้างระบบส่งจ่าย รวมถึงค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบรางไฟฟ้าที่ใช้ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแบบรางที่สาม
1932	BY F. H. Brehob and F. H. Craton	นำเสนอระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสตรง 2 พิกัด คือ พิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 600 V ที่ใช้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบรางที่สาม และพิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3000 V โดยใช้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเหนือศีรษะ (Overhead wire system)
1933	BY W. A. Giger	นำเสนอการส่งจ่ายไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าที่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส 2 พิกัด คือ พิกัด 11 kV ความถี่ 25 Hz ที่มีการใช้งานอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา และพิกัดแรงดัน 15 kV ความถี่ $16 \frac{2}{3}$ Hz ซึ่งมีการใช้งานอยู่ที่ประเทศในแถบยุโรป
1971	Blair A. Ross	นำเสนอการสำรวจระบบรางไฟฟ้าของประเทศในแถบยุโรปตะวันตกที่เป็นระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส พิกัด 25 kV ความถี่ 50 Hz โดยมีหัวข้อที่นำเสนอ คือ ความถี่ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า การออกแบบสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย การออกแบบระบบการป้องกันกระแสไฟฟ้าให้กับขบวนรถ รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลต้นทุนดำเนินการ สำหรับนำไปปรับใช้กับระบบรางไฟฟ้าของประเทศสหรัฐอเมริกาที่ใช้ระบบความถี่ 60 Hz
1983	N. Howard, C. eng, F. I. E. E.	นำเสนอการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าในประเทศอังกฤษโดยระบบดังกล่าวจะรับไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยที่ 132 kV 50 Hz ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสเป็นแรงดัน 25 kV 50 Hz รวมถึงนำเสนอระบบที่ติดตั้งสายส่งตัวนำเพิ่ม 1 ชุด และหม้อแปลงบูสเตอร์ (Booster Transformer) ทุก 3 กิโลเมตรเพื่อให้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า(ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		กระแสไฟฟ้าไหลกลับที่สายส่งแทนการไหลกลับทางราง ซึ่งระบบดังกล่าวเรียกว่า การจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบให้กระแสไหลกลับทางสายส่งตัวนำและติดตั้งหม้อแปลงบูสเตอร์ (Booster Transformer Return Conductor: BTRC)
1983	S.H. Case, B. SC, C.eng, M.I.E.E., and others	นำเสนอระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าในประเทศไต้หวัน โดยระบบดังกล่าวจะรับไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 69 kV 60 Hz ผ่านหม้อแปลงแบบเลอว์บลอนด์เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ขนาด 25 kV 60 Hz รวมถึงนำเสนอผลการตรวจวัดแรงดันและกระแสที่แหล่งจ่ายกรณีที่มีฮาร์โมนิกกะปน
1985	P. J. Lambeth and D.H. Nquyen	นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับจุดแข็งของช่องว่างอากาศในระบบรางไฟฟ้าของประเทศแคนาดา ซึ่งระบบดังกล่าวใช้ระบบการส่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัด 50 kV ความถี่ 60 Hz
1987	L.R. Denning	นำเสนอระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีด้วยกัน 3 พิกัด ได้แก่ 750 V 1500 V และ 3000 V โดยการจ่ายไฟฟ้าด้วยระบบรางที่สามนั้นสามารถใช้ได้สูงสุดที่ระดับแรงดัน 750 V หรือ 1500 V แต่ในกรณีที่แรงดันสูงกว่านั้นแต่ไม่เกิน 3000 V จะใช้การจ่ายไฟฟ้าแบบระบบสายส่งเหนือศีรษะ นอกจากนี้ ระบบรางไฟฟ้าที่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงจำเป็นจะต้องติดตั้งสถานีสำหรับจ่ายไฟฟ้าในระยะทางทุก ๆ 3-5 กิโลเมตร เนื่องจากต้องคำนึงถึงสมภาวะแรงดันตก
1990	B. Mellitt, J. Allan, Z.Y. Shao, W.B. Johnston and C.J. Goodman	นำเสนอรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขบวนรถไฟของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสพิกัด 25 kV 50 หรือ 60 Hz โดยมี 5 รูปแบบ ได้แก่ การจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบไหลกลับทางรางทั้งหมด (Rail return: RR) การจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบไหลกลับทางรางและติดตั้งหม้อแปลงบูสเตอร์ (Booster transformer rail return: BTRR) การจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบกระแสไหลกลับทางสายส่งตัวนำและติดตั้งหม้อแปลงบูสเตอร์ การจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบติดตั้งหม้อแปลงโอโต้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า(ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		(Auto-transformer: AT) และการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบใช้สายไฟโคแอกเซียลเคเบิล (CO-axial Cable) ซึ่งทำหน้าที่เหมือนกับกรณีที่ใช้หม้อแปลงอโต้
2001	L. Battistelli, D. Lauria and P. Vernillo	นำเสนอนวัตกรรมทางเทคโนโลยีที่ใช้กับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสพิกัด 25 kV 50 Hz โดยนวัตกรรมดังกล่าวจะใช้งานร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตและวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับใช้ชดเชยแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดปัญหาเฟสไม่สมดุล
2005	J. Dixon and L. Moran	นำเสนอวงจรเรียงกระแสแบบใหม่สำหรับใช้งานในระบบรางไฟฟ้าที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพิกัด 750 V โดยวงจรเรียงกระแสดังกล่าวมีโครงสร้างแบบ 3 ชั้น 27 ระดับ ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้มีผลฮาร์มอนิกที่ปะปนน้อยมาก
2010	M. Brenna, F. Foiadelli and D. Zaninelli	นำเสนอระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับพิกัด 2 x 25 kV 50 Hz ที่ใช้ร่วมกับหม้อแปลงอโต้ โดยวิธีการของระบบนี้จะใช้การจ่ายไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าย่อยผ่านทางสายส่งเหนือศีรษะ (Overhead line) และสายป้อนกระแสไฟฟ้า (Feeder line) ที่มีพิกัดแรงดัน 25 kV เท่ากันแต่มีมุมเฟสตรงข้ามกัน และจะใช้หม้อแปลงอโต้ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าทำให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขบวนรถไฟที่สายส่งเหนือหัวและรางรถไฟมีค่าเท่ากับ 25 kV ตลอดเส้นทางรถไฟ โดยข้อดีของระบบนี้ คือ ช่วยลดปัญหาแรงดันตกที่ปลายทางของสายส่งช่วยลดสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รวมถึงช่วยเพิ่มระยะห่างของการติดตั้งสถานีไฟฟ้าย่อยให้มีระยะทางมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามเป้าหมายหลักของบทความ คือ การประเมินผลของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทำการเปรียบเทียบกับผลที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าของประเทศอิตาลี

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า(ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		อย่างไรก็ตามเป้าหมายหลักของบทความ คือ การประเมินผลของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทำการเปรียบเทียบกับผลที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้าของประเทศอิตาลี
2016	F. Caracciolo, A. Fumi and E. Cinieri	นำเสนอระบบรางไฟฟ้าของประเทศอิตาลีโดยใช้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกัน 2 ระบบ คือ ระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ $2 \times 25 \text{ kV } 50 \text{ Hz}$ และระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3000 V ซึ่งขบวนรถไฟสามารถเปลี่ยนการรับไฟฟ้าได้ทั้งระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงตามพื้นที่ที่ขบวนรถไฟวิ่งผ่าน
2016	I. Krastev, P. Tricoil, S. Hillmansen and M. Chen	นำเสนอประวัติความเป็นมาของระบบส่งจ่ายกำลังของระบบรางไฟฟ้า การเลือกใช้และการพัฒนาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางในแต่ละประเทศ รวมถึงนำเสนอระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบใหม่ที่ช่วยลดปัญหาของเฟสไม่สมดุลทางฝั่งปฐมภูมิของระบบไฟฟ้า พร้อมทั้งยังสามารถชดเชยฮาร์มอนิกได้อีกด้วย
2016	นคร จันทศร	นำเสนอรายละเอียดระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าของระบบรางที่มีใช้งานอย่างแพร่หลายในแต่ละภูมิภาคทั่วโลก โดยนำเสนอเกี่ยวกับ ประเภทและพิกัดของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ความยาวของระบบทางรถไฟ รวมถึงกลุ่มประเทศที่มีการใช้งานระบบส่งจ่ายไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ
2017	L. Wu and W. Mingli	นำเสนอการปรับปรุงคุณภาพทางไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบต่อร่วมกันหลายชั้น ซึ่งวงจรกรองกำลังแอกทีฟดังกล่าวสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพพร้อมทั้งยังสามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังได้ โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงช่วยในการฉีดยกระแสและไม่เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ตามมาอีกด้วย

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้า (นคร จันทพร, 2016)

ระบบไฟฟ้า			ความยาวระบบทางรถไฟและประเทศที่ใช้งานระบบรางไฟฟ้า		
			กิโลเมตร	สัดส่วนการใช้งาน (%)	กลุ่มประเทศที่ใช้
DC	< 1500 V		5,106	2	เยอรมัน อังกฤษ สวิตเซอร์แลนด์ สหรัฐอเมริกา
	1500 V – 3000 V		22,138	9	ฝรั่งเศส เนเธอร์แลนด์ ออสเตรเลีย อิตาลี ไทย
	1500 V		78,276	33	รัสเซีย โปแลนด์ สเปน อเมริกาใต้
Single-Phase AC	50 Hz or 60 Hz	< 20 kV	245	0	สหรัฐอเมริกา
		20 kV	3,741	2	ญี่ปุ่น เยอรมนี ฝรั่งเศส
		25 kV	343,761	36	ฝรั่งเศส ญี่ปุ่น จีน อิตาลี อังกฤษ ไต้หวัน รัสเซีย โรมาเนีย อินเดีย ไทย
		50 kV	1,173	0	แคนาดา สหรัฐอเมริกา อเมริกาใต้
	25 Hz	6 – 13 kV	1,469	1	สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย
	16 2/3 Hz	11 KV	120	0	สวิตเซอร์แลนด์
		15 kV	35,461	15	เยอรมัน สวีเดน สวิตเซอร์แลนด์ นอร์เวย์
	Three-Phase AC		43	0	สวิตเซอร์แลนด์
อื่น ๆ		3668	2	คาซัคสถาน	
รวม		495,201	100		

จากผลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าพบว่า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสพิกัด 25 kV ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบรางไฟฟ้าที่มีเส้นทางเดินระยะไกล เนื่องจากเป็นระบบส่งจ่ายที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าสูงจึงสามารถติดตั้งสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยได้ไกลกว่าระบบจ่ายไฟแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง รวมถึงมีค่ากำลังงานสูญเสียต่ำและความปลอดภัยสูง ส่งผลให้ขบวนรถไฟสามารถวิ่งด้วยความเร็วที่สูงกว่าระบบที่ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง อีกทั้งยังพบว่า ระบบรางไฟฟ้า

กระแสสลับหนึ่งเฟสพิกัด 25 kV ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz มีสัดส่วนและกลุ่มประเทศที่มีการใช้งานมากกว่าระบบอื่น ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกศึกษาระบบแรงไฟฟ้าที่ใช้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสพิกัด 25 kV ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz เพื่อทำการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบดังกล่าว รวมถึงทำการศึกษาและออกแบบระบบการจำกัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรองกำลังแอคทีฟเพื่อแก้ปัญหาต่อไป

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงส่งจ่ายที่ใช้ในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับ

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งจ่ายของระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับตามที่ผู้วิจัยได้ค้นคว้าจากงานวิจัยในอดีตถึงปัจจุบัน พบว่า ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยที่เป็นระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับใช้ลดระดับแรงดันเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบแรงไฟฟ้า และโหลดของระบบแรงไฟฟ้าที่เป็นระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยในอดีตที่ผ่านมาหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีต้นทุนการผลิตต่ำและมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสสำหรับแปลงแรงดันจากระบบไฟฟ้าสามเฟสจะส่งผลให้เกิดปัญหาเฟสไม่สมดุลของแหล่งจ่ายทางฝั่งปฐมภูมิของระบบไฟฟ้า จากปัญหาเฟสไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจึงมีการใช้งานระบบหนึ่งเฟสแบบ 2 ชุดจากระบบจ่ายไฟของหนึ่งสถานีไฟฟ้าย่อยเรียกว่าระบบหนึ่งเฟสรวม (Co-phase system) โดยระบบดังกล่าวจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแปลงแรงดันจากระบบสามเฟสเป็นระบบสองเฟส ทำให้กระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสทางฝั่งปฐมภูมิมีความสมดุลเมื่อมีการใช้งานโหลดทางฝั่งทุติยภูมิของระบบแรงทั้งสองเฟสที่มีขนาดเท่ากัน จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัย พบว่า หม้อแปลงแบบสมดุล (balanced transformer) มีอยู่หลายประเภทด้วยกัน เช่น หม้อแปลงแบบสก๊อต (Scott transformer) หม้อแปลงแบบเลอว์บลองค์ (Leblanc transformer) หม้อแปลงแบบวูดบริดจ์ (Woodbridge transformer) หม้อแปลงแบบแมทชิงอิมพีแดนซ์ (Impedance matching balanced transformer: IM) เป็นต้น ซึ่งหม้อแปลงแต่ละประเภทมีข้อดีข้อเสียรวมถึงข้อจำกัดการใช้งานที่แตกต่างกัน ผลการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบแรงไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.3 และจากปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยในตารางดังกล่าวสามารถสรุปเปรียบเทียบคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภทแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงส่งจ่ายที่ใช้ในระบบรางไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1996	B.-K. Chen and B.-S. Guo	นำเสนอการวิเคราะห์เกี่ยวกับปัญหาเฟสไม่สมดุลของระบบรางไฟฟ้าเมื่อใช้หม้อแปลงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ โดยผลการวิเคราะห์ พบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสมีปัญหาเฟสไม่สมดุลมากที่สุด รองลงมา คือหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า (V/V transformer) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบวายเดลต้า (Wye-Delt transformer) ในขณะที่หม้อแปลงแบบสก็อต หม้อแปลงแบบเลอรร์บลองค์ และหม้อแปลงแบบวูดบริดจ์เป็นหม้อแปลงประเภทที่ประสบปัญหาเรื่องเฟสไม่สมดุลน้อยที่สุด
2002	S-R. Huang and B-N. Chen	นำเสนอโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear load) ของระบบรางไฟฟ้าประเทศไต้หวันที่ได้จากการวัดจริงในฝั่งปฐมภูมิและฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรร์บลองค์ ซึ่งโหลดดังกล่าวประกอบไปด้วยองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิก
2006	P. E. Sutherland, M. Waclawiak and M. F. McGrangahan	นำเสนอการประเมินผลกระทบของการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับโดยแบ่งเป็น 3 ปัจจัย คือฮาร์มอนิกที่เกิดจากการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในระบบ เฟสไม่สมดุลที่เกิดจากลักษณะของโหลดที่เป็นระบบหนึ่งเฟส การกระพริบ (flicker) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดรถไฟอย่างรวดเร็ว
2006	Ch-P. Huang, Ch-J Wu, Y-S. Chuang, Sh-K. Peng, J-L. Yen and M-H. Ham	นำเสนอการวิเคราะห์เกี่ยวกับค่าตัวประกอบกำลังของระบบรางไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า หม้อแปลงแบบสก็อต และหม้อแปลงแบบเลอรร์บลองค์ ซึ่งผลการเปรียบเทียบ พบว่า หม้อแปลงแบบโอเพนเดลต้ามีค่าตัวประกอบกำลังต่ำกว่าหม้อแปลงแบบสก็อตและหม้อแปลงแบบเลอรร์บลองค์ เนื่องจากการใช้งานหม้อแปลงดังกล่าวก่อให้เกิดปัญหาเฟสไม่สมดุลทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนี้ยังนำเสนอกลุ่มประเทศที่นำหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภทไปใช้งาน

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงส่งจ่ายที่ใช้ในระบบรางไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	H. Morimoto, T. UZuka and A. Horiguchi	นำเสนอหม้อแปลงแบบสมดุคที่ใช้ในรถไฟความเร็วสูงของประเทศญี่ปุ่น โดยกรณีระดับแรงดันไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิอยู่ที่ 66-154 kV จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต และในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นระดับ 187-275 kV จะใช้หม้อแปลงแบบวูดบริดจ์ และหม้อแปลงแบบรูปเดลต้า อย่างไรก็ตาม การใช้งานหม้อแปลงแบบวูดบริดจ์จำเป็นต้องใช้งานร่วมกับหม้อแปลงออโต้ (Autotransformer: AT) เพื่อยกระดับแรงดันเพิ่มขึ้นทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น ในขณะที่หม้อแปลงแบบรูปเดลต้าไม่จำเป็นต้องใช้
2009	Z. Zhang, B. Wu, J Kang and L. Luo	นำเสนอหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแมทชิงอิมพีแดนซ์ว่ามีดัชนีการใช้ประโยชน์ของวัสดุ (material utilization factor) สูงที่สุดเมื่อเทียบกับหม้อแปลงแบบสก็อต หม้อแปลงแบบเลอว์บลองค์ และหม้อแปลงแบบวูดบริดจ์ และนำเสนอหม้อแปลงเอ็มพีบี (multi-purpose balanced) ซึ่งพัฒนามาจากหม้อแปลงแมทชิงอิมพีแดนซ์
2015	F. Fathima and S. Prabhakar Karthikeyan	นำเสนอการเปรียบเทียบระหว่างหม้อแปลงแบบรูปเดลต้า (Roof-delta transformer) หม้อแปลงแบบสก็อต หม้อแปลงแบบแมทชิงอิมพีแดนซ์ และหม้อแปลงแบบเลอว์บลองค์ โดยทำการเปรียบเทียบใน 3 ประเด็น คือ ความต้องการอุปกรณ์ต่อร่วมทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลง เฟสสมดุคทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลง และราคา ซึ่งผลการเปรียบเทียบในประเด็นที่ 1 มีเพียงหม้อแปลงแบบแมทชิงอิมพีแดนซ์ที่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ต่อร่วมทางฝั่งทุติยภูมิ ประเด็นที่ 2 หม้อแปลงทั้ง 4 ประเภท มีเฟสสมดุคทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงใกล้เคียงกัน ในขณะที่ประเด็นที่ 3 ราคาของหม้อแปลงแบบแมทชิงอิมพีแดนซ์มีราคาสูงที่สุด รองลงมาคือ หม้อแปลงแบบรูปเดลต้า หม้อแปลงแบบสก็อต และหม้อแปลงแบบเลอว์บลองค์ตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบราง

คุณสมบัติ	ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้า						
	Single-phase	V/V	Scott	Le-Blanc	Wood bridge	Roof-delta	IM
1. โครงสร้าง	ไม่ซับซ้อน	ปานกลาง	ซับซ้อน	ซับซ้อน	ซับซ้อน	ปานกลาง	ซับซ้อน
2. ปัญหาเฟสไม่สมดุล	สูง	ปานกลาง	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย	น้อย
3. พิกัดใช้งาน ฝั่งปฐมภูมิ	66 kV - 154 kV	66 kV - 154 kV	66 kV - 154 kV	66 kV - 154 kV	187 kV - 275 kV	187 kV - 275 kV	187 kV - 275 kV
4. อุปกรณ์ ต่อร่วมในฝั่ง ทุติยภูมิ	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ต้องใช้ หม้อแปลง ออโต้	ไม่มี	ต้องใช้ Filter
5. ราคา	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง	สูง
6. กลุ่มประเทศ ที่ใช้งาน	อิตาลี, ฝรั่งเศส, นิวซีแลนด์	ฝรั่งเศส, อังกฤษ, ฟินแลนด์	ญี่ปุ่น, ไต้หวัน, จีน	ญี่ปุ่น, ไต้หวัน	ญี่ปุ่น, จีน	ญี่ปุ่น	จีน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงส่งจ่ายที่ใช้ในระบบรางไฟฟ้าจะสามารถแบ่งประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้าตามคุณสมบัติการใช้งานออกเป็น 2 ประเภท คือ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดปัญหาเฟสไม่สมดุล ได้แก่ หม้อแปลงแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบวายเดลต้า และหม้อแปลงไฟฟ้าที่ไม่เกิดปัญหาเฟสไม่สมดุล (หม้อแปลงสมดุล) ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรบลองค์ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบวูดบริดจ์ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบรูฟเดลต้าและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแมทซิงอิมพีแดนซ์ และจากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของหม้อแปลงแต่ละชนิดในตารางที่ 2.4 พบว่า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรบลองค์เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีผลของเฟสไม่สมดุลทางฝั่งปฐมภูมิน้อย ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ต่อร่วมทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงส่งผลให้มีราคาไม่สูงมาก อีกทั้งยังมีการใช้งานจริงในระบบรางไฟฟ้าที่ใช้อย่างกว้างขวาง ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรบลองค์เพื่อส่งจ่ายไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าที่จะพิจารณากำจัดฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรบลองค์จะอธิบายในบทที่ 3

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการกำจัดการกระแสมอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสที่ใช้วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 ดังนี้

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1995	C.-Y Hsu and H.-Y Wu	นำเสนอการกำจัดการกระแสมอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่ประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว ตัวเก็บประจุ 1 ตัว และอุปกรณ์สวิตช์ 4 ตัว จากผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบจริง พบว่า วงจรรอกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างดังกล่าวสามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดการกระแสมอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ
1997	Ingram and Round	นำเสนอวิธีการออกแบบขนาดของตัวเหนี่ยวนำในวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยค่าที่ได้จากการออกแบบจะถูกใช้เป็นขอบเขตค่าสูงที่สุดของขนาดตัวเหนี่ยวนำ จากนั้นต้องเลือกขนาดของตัวเหนี่ยวนำให้อยู่ในขอบเขตดังกล่าว
1998	Thomas, T. Haddad, K. Joos, G. and Jaafari	นำเสนอวิธีการออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานโดยค่าที่ออกแบบได้ คือ ขอบเขตต่ำสุดของค่าตัวเก็บประจุ ซึ่งจะมีผลต่อแรงดันกระแสเพื่อมและระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวของค่าแรงดันบัสไฟตรง
1999	Benchaita, Saadate, And A.Salem Nia	นำเสนอการเปรียบเทียบโครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟที่เป็นอินเวอร์ชันแหล่งจ่ายแรงดัน และอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส โดยพบว่าอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันมีต้นทุนราคาถูกกว่า และมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของโหลดมากกว่าอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	B. Fujita	นำเสนอโครงสร้างวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน 3 แบบ คือ แบบครึ่งบริดจ์ (Half-bridge) ที่ประกอบด้วยสวิตช์ 2 ตัว และตัวเก็บประจุ 2 ตัว แบบเต็มบริดจ์ (Full-bridge) ที่ประกอบด้วยสวิตช์ 4 ตัวและ ตัวเก็บประจุ 1 ตัว และแบบเอช-บริดจ์ (H-bridge) ที่มีสวิตช์ 4 ตัว และตัวเก็บประจุ 2 ตัว
2011	Z. Shu, Sh. Xie, and Q. Li	นำเสนอการใช้วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานที่โครงสร้างเป็นระบบหนึ่งเฟสแบ็คทูแบ็คคอนเวอร์เตอร์ (Single-phase back-to-back converter) สำหรับระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวม โดยโครงสร้างดังกล่าวประกอบด้วย สวิตช์ 8 ตัว ตัวเหนี่ยวนำ 2 ตัว และตัวเก็บประจุ 1 ตัว
2013	V-F. Andres, M-R. Panfilo G. Escobar L-P. Ceser	นำเสนอวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานที่โครงสร้างเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบ 5 ระดับ (cascade five-level inverter) โดยมีตัวเก็บประจุ 2 ตัว ซึ่งจำเป็นต้องมีการควบคุมระดับแรงดันของตัวเก็บประจุทั้งสองตัวให้มีขนาดเท่ากันด้วย
2016	M. Ammirul, M. Amran, A. Che Soh, and N. Mariun	ใช้วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานที่โครงสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบเต็มบริดจ์ในการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสโดยทำการทดสอบด้วยการจำลองสถานการณ์และการสร้างชุดทดสอบจริง ซึ่งผลการทดสอบพบว่า วงจรรอกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างดังกล่าวสามารถลดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกได้

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและการออกแบบวงจรรอกำลังแอกทีฟพบว่า วงจรรอกำลังแอกแบบขนานมีโครงสร้างหลักอยู่ 2 รูปแบบ คือ โครงสร้างที่เป็นอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter: VSI) และโครงสร้างที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter: CSI) โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้โครงสร้างที่เป็น VSI แบบเต็มบริดจ์ เนื่องจากมีความซับซ้อนในการควบคุมน้อย มีราคาถูก อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นต่อการ

เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของโหลดในระบบไฟฟ้ามากกว่าโครงสร้างแบบ CSI โดยในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาการจัดฮาร์มอนิกประกอบไปด้วยโหลดรางไฟฟ้าหนึ่งเฟสจำนวน 2 ชุด ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน 2 ชุด ที่มีโครงสร้างและพิกัดเท่ากัน ซึ่งรายละเอียดการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟจะนำเสนอในบทที่ 5

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟจำเป็นต้องมีการตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อใช้เป็นกระแสน้ำอิงสำหรับการชดเชย ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน พบว่าการตรวจจับฮาร์มอนิกมีหลายวิธีด้วยกัน โดยแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไปดังแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1999	J. Lie, J. Yang, Z. Wan, Jaiotong and Shaanxi	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟ ขณะหนึ่งหรือวิธี PQ สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส ซึ่งจะใช้วิธีแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (v_s) และค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_L) ให้เป็นค่าแรงดันและกระแสบนแกน $\alpha\beta$ โดยที่ค่าบนแกน α จะมีขนาดและมุมเฟสเท่ากับค่าบนแกนเฟส ส่วนค่าบนแกน β จะมีขนาดเท่ากับค่าบนแกนเฟสเช่นกัน แต่มุมเฟสจะเลื่อนไปเท่ากับ $\pi/2$
2001	M. Rukonuzzaman and M. Nakaoka	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีโครงข่ายประสาทแบบปรับตัว (adaptive neural network) ในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยพิจารณาโหลดฮาร์มอนิกเป็นวงจรเรียงกระแสที่ต่อกับ

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ จากผลการทดสอบพบว่า วิธีที่นำเสนอสามารถระบุกระแสฮาร์มอนิกตามเวลาจริง (real time) ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถให้ผลลัพธ์ภายในหนึ่งคาบของสัญญาณมูลฐาน
2001	M.El-Habrouk and M.K.Darwish	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อนหรือวิธี SWFA สำหรับใช้คำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นจากวิธีการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบเร็ว (FFT) ผลทดสอบการสร้างชุดตรวจจับฮาร์มอนิกโดยใช้บอร์ด DSP พบว่าผลการตรวจจับมีความถูกต้องแม่นยำ และมีความเร็วในการคำนวณมากกว่าวิธี FFT โดยจะคำนวณ เฉพาะค่าองค์ประกอบมูลฐานแล้วนำไปหักลบกับกระแสโหลดจะทำให้ได้กระแสฮาร์มอนิกอ้างอิง
2002	M. Tarafdar	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟสซึ่งมีสมการเช่นเดียวกับระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยสามารถคำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกับสามารถคำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟเพื่อชดเชยค่าตัวประกอบกำลังได้อีกด้วย
2003	M. Saitou, N. Matsui and T. Shimizu	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการรอบอ้างอิงซิงโครนัสหรือวิธี SRF สำหรับใช้ร่วมกับวงจรรอกกำลังแอกทีฟหนึ่งเฟส โดยใช้วิธีการแปลงของฮิวเบิร์ตเพื่อแปลงกระแสโหลดให้อยู่บนแกนดีคว หลังจากนั้นใช้วงจรกรองผ่านต่ำ (low pass filter: LPF) เพื่อแยกให้เหลือเฉพาะองค์ประกอบมูลฐานก่อนนำไปลบกับกระแสทั้งหมด ซึ่งจะได้กระแสอ้างอิงสำหรับใช้กับวงจรรอกกำลังแอกทีฟต่อไป

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004	M. Gonzalez, V. Cardenas and F. Pazos	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการแปลงแกนดีคิว สำหรับ วงจรรอกำลังแอกทีฟหนึ่งเฟส โดยพิจารณาจากวิธีการ ตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยการแปลงแกนดีคิวในระบบสามเฟส ซึ่ง สามารถอธิบายได้ว่ากระแสไฟฟ้าบนแกนคิวประกอบไปด้วย องค์ประกอบของกำลังรีแอกทีฟและองค์ประกอบฮาร์มอนิก ดังนั้น การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีดังกล่าวสามารถคำนวณ กระแสฮาร์มอนิกและค่ากำลังรีแอกทีฟเพื่อให้วงจรรอกำลัง แอกทีฟกำจัดฮาร์มอนิกพร้อมกับชดเชยค่าตัวประกอบกำลังได้
2009	M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale and A.2 Miraoui	นำเสนอการเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกของวิธี โครงข่ายประสาทเชิงเส้นแบบปรับตัว (linear adaptive neuron) กับการใช้ทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง ซึ่งผลการ เปรียบเทียบการกำจัดฮาร์มอนิกพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยน ฮาร์มอนิก (% THD) ภายหลังการชดเชยทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียง กัน
2009	V. Khadkikar, A.Chandra and B.N. Singh	นำเสนอการปรับปรุงการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ โดยใช้ Phase Lock Loop (PLL) ช่วยในการคำนวณมุมเฟสกริดเพื่อ นำไปใช้คำนวณค่าแรงดันที่แหล่งจ่ายบนแกน $\alpha\beta$ แทนการใช้ แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายร่วมกับการเลื่อนมุมเฟสไป $\pi/2$ ตามวิธี PQ แบบดั้งเดิม จากผลการจำลองสถานการณ์และผลการ ทดสอบจริง การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าด้วยวงจรรอก กำลังแอกทีฟ โดยการเปรียบเทียบกับวิธีตรวจจับฮาร์มอนิกด้วย วิธี PQ แบบดั้งเดิม พบว่า กรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมี ฮาร์มอนิกปะปน วิธี PQ ที่ปรับปรุงใหม่ให้ผลการตรวจจับ ฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี PQ แบบดั้งเดิม

ตารางที่ 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2010	V. Khadkikar, M. Singh,A. Chandra and B. Singh	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วย SRF สำหรับใช้ร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟหนึ่งเฟส โดยการใช้ Phase Lock Loop (PLL) ช่วยในการคำนวณมุมเฟสกริดเพื่อแปลงให้อยู่บนแกนดีคิว โดยทำการทดสอบ 2 กรณี คือ กรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์และกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายบิดเบี้ยวเนื่องจากมีฮาร์มอนิกปะปน ซึ่งผลทดสอบจากการสร้างระบบกำจัดฮาร์มอนิกจริง พบว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF สามารถคำนวณกระแสอ้างอิงให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีใกล้เคียงกันทั้ง 2 กรณี
2014	B A. Angelico, L B.G. Campanhol, S A. Oliveira da silva	นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการรอบอ้างอิงซิงโครนัสหรือวิธี SRF สำหรับใช้ร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟหนึ่งเฟส โดยใช้ Phase Lock Loop (PLL) ช่วยในการคำนวณมุมเฟสกริดเพื่อแปลงแกนให้อยู่บนแกนดีคิว และคำนวณหาค่ากระแสชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟต่อไป
2014	S. Tiyarachakun, K-L. and K-N. Areerak	นำเสนอการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยการใช้วิธีทฤษฎีกำลังไฟฟ้แอกทีฟขณะหนึ่งร่วมกับการวิเคราะห์ฟูริเยร์แบบวินโดว์เลื่อนหรือวิธี PQF สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยจะใช้การวิเคราะห์แบบฟูริเยร์วินโดว์เลื่อนเพื่อแยกองค์ประกอบฮาร์มอนิกแทนการใช้วงจรกรอง (Filter) ซึ่งผลการทดสอบพบว่าให้ผลการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าการใช้ทฤษฎีกำลังไฟฟ้แอกทีฟขณะหนึ่งแบบทั่วไป

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ พบว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน ในเบื้องต้นผู้วิจัยได้เลือกการเปรียบเทียบการตรวจจับฮาร์มอนิก 2 วิธีพื้นฐาน คือ วิธีทฤษฎีกำลังไฟฟ้แอกทีฟขณะหนึ่งหรือวิธี PQ และวิธีการรอบอ้างอิงซิงโครนัสหรือวิธี SRF สำหรับใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟผิดกระแสกำจัดฮาร์มอนิก ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสองวิธีเป็นวิธีที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายและมี

ความถูกต้องในการคำนวณ มีความซับซ้อนน้อย และยังสามารถชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้อีกด้วย ซึ่งรายละเอียดของการตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SRF รวมถึงผลการเปรียบเทียบของทั้งสองวิธี จะนำเสนอในบทที่ 4

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

การควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้สามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามภาระอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับสนามอนิกเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า จำเป็นจะต้องมีกระบวนการสำหรับควบคุมกระแสชดเชยและเทคนิคการสวิตช์ ซึ่งการศึกษางานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1998	N. R. Zargari and G. Joos	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) โดยจะใช้กระแสที่ได้จากการตรวจจับสนามอนิกมาลบกับกระแสที่ใช้สำหรับชดเชยจริง จากนั้นจะนำเข้าสู่บล็อกตัวควบคุมพีไอก่อนนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสามเหลี่ยมเพื่อสร้างเป็นสัญญาณพัลส์ควบคุมสวิตช์ให้สามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิก จากผลการทดสอบจริง พบว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมกระแสชดเชยให้มีลักษณะตามค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับสนามอนิก
2001	S. Fukuda and T.Yoda	นำเสนอการควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอที่พัฒนาขึ้นโดยการเพิ่มการพิจารณาค่า K_s เรียกว่าตัวควบคุมพีไอเอส โดยที่องค์ประกอบของค่า K_s ช่วยทำให้ระบบควบคุมมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงระหว่างความถี่อ้างอิงและความถี่เรโซแนนซ์

ตารางที่ 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	B. Han	นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยใช้ตัวควบคุมพีไอควบคุมการผิดกระแสชดเชยร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM
2009	M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale and A. Miraoui	ใช้วิธีมัลติโรโซแนนซ์ในการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส โดยวิธีดังกล่าวสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังมีความซับซ้อนน้อย แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ จำเป็นต้องเลือกเฉพาะบางอันดับของฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัด
2010	V. Khadkikar, M. Singh,A. Chandra and B. Singh	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสแบบแอนะล็อกในการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟหนึ่งเฟส ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกดีใกล้เคียงกันทั้งในกรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นคลื่นรูปไซน์และกรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน
2004	k. Nisgida, M. Rukonuzzman and M. Nakaoka	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมแบบเดดบีต (Deadbeat Current Control) สำหรับควบคุมการผิดกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟส โดยที่ตัวควบคุมดังกล่าวจะทำงานร่วมกับเทคนิค Adaptive Line Enhancer (ALE) ทำหน้าที่ทำนายความผิดพลาดของการควบคุมกระแสชดเชย ซึ่งจะทำให้ตัวควบคุมมีความแม่นยำและมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น
2011	A. Luo, C Wu, J. Shen, and F. MA	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมฮีสเตอร์ซิสในการควบคุมการผิดกระแสสำหรับกำจัดฮาร์มอนิกและการชดเชยค่าตัวประกอบกำลังในระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวม (1 เฟส 2 ชุด) โดยใช้ตัวควบคุมแบบฮีสเตอร์ซิส 2 ชุด

ตารางที่ 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระแสชดเชยสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกำลัง
แอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	Bruno, Leonardo and and Sérgio	นำเสนอการออกแบบและทำการเปรียบเทียบการควบคุมกระแสชดเชยระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีไอและพีไอดี ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์และการทดสอบกำจัดฮาร์มอนิกพบว่า ทั้งสองตัวควบคุมมีประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกได้ดีใกล้เคียงกัน
2014	Ant'onio Martins, Sandro Vale, Vitor Sobrado, and Adriano Carvalho	นำเสนอการเปรียบเทียบการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟสามวิธี คือ ตัวควบคุมแบบพีไอ ตัวควบคุมแบบฮีสเทอรีซิส และตัวควบคุมแบบกรอปอ้างอิงซิงโครนัส จากผลการทดสอบพบว่า ตัวควบคุมฮีสเทอรีซิสและตัวควบคุมพีไอดีมีประสิทธิภาพดีกว่าตัวควบคุมแบบกรอปอ้างอิงซิงโครนัส
2017	B. Leandro, V.-D. Bacon, A. Oliveira and B.-A. Angelico	นำเสนอการเปรียบเทียบการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรอกำลังแอกทีฟหนึ่งเฟสระหว่างการใช้ตัวควบคุมพีไอ-มัลติเรโซแนนซ์ (PI-MS) สองรูปแบบกับตัวควบคุมพีไอ ซึ่งจากผลการทดสอบทำให้เห็นว่าการพัฒนาตัวควบคุมพีไอร่วมกับวิธีมัลติเรโซแนนซ์ทั้งสองรูปแบบสามารถทำให้ระบบควบคุมมีประสิทธิภาพมากขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมกระแสชดเชยสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรรอกำลังแอกทีฟพบว่ามียุทธวิธีการควบคุมกระแสชดเชยอยู่ด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมแบบเดดบิต ตัวควบคุมฮีสเทอรีซิส ตัวควบคุมมัลติเรโซแนนซ์ ตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมแบบกรอปอ้างอิงซิงโครนัส ดังที่ได้นำเสนอในตารางที่ 2.7 ซึ่งในเบื้องต้นผู้วิจัยนี้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM เนื่องจากเป็นวิธีพื้นฐานและมีประสิทธิภาพที่ดีในการควบคุมการฉีดกระแสของวงจรรอกำลังแอกทีฟ อีกทั้งยังง่ายต่อการออกแบบ โดยผู้วิจัยจะทดสอบสมรรถนะการควบคุมวงจรรอกำลังแอกทีฟเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าในลักษณะโหลดรูปแบบต่าง ๆ เพื่อหาข้อจำกัดและหาวิธีพัฒนาตัวควบคุมต่อไป

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

เพื่อให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงให้มีค่าเท่ากับแรงดันอ้างอิงที่ได้ทำการออกแบบไว้ถือเป็นเรื่องสำคัญ โดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1996	J.-C. Wu and H.-L. Jou	นำเสนอใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส จากผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกพบว่า ตัวควบคุมพีไอสามารถควบคุมแรงดันบัลไฟตรงให้มีค่าตามแรงดันอ้างอิงที่ออกแบบไว้ รวมถึงทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยการจัดฮาร์โมนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2004	P.-C. Tan, P. Loh and D. Holmes	ใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังโบริดที่ประกอบด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและวงจรกรองกำลังพาสซีฟสำหรับใช้การจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งผลจากการทดสอบจริงพบว่า ตัวควบคุมพีไอที่ใช้งานร่วมกับระบบดังกล่าวสามารถกำจัดฮาร์โมนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2010	I. Colak and R. Bayindir	นำเสนอการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีซีลอจิก โดยตัวควบคุมดังกล่าวให้ผลการทำงานที่รวดเร็ว และยังสามารถทำงานได้ดีกว่าตัวควบคุมพีไอในระบบที่ซับซ้อน
2011	Z. Shu, S. Xie and Q. Li	นำเสนอการใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีโครงสร้างแบบแบ็คทูแบ็คที่ใช้ตัวเก็บประจุร่วมกัน โดยตัวควบคุมดังกล่าวใช้ในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบหนึ่งเฟสรวม (1 เฟส 2 ชุด) ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยการใช้ตัวควบคุมพีไอเพียงชุดเดียว

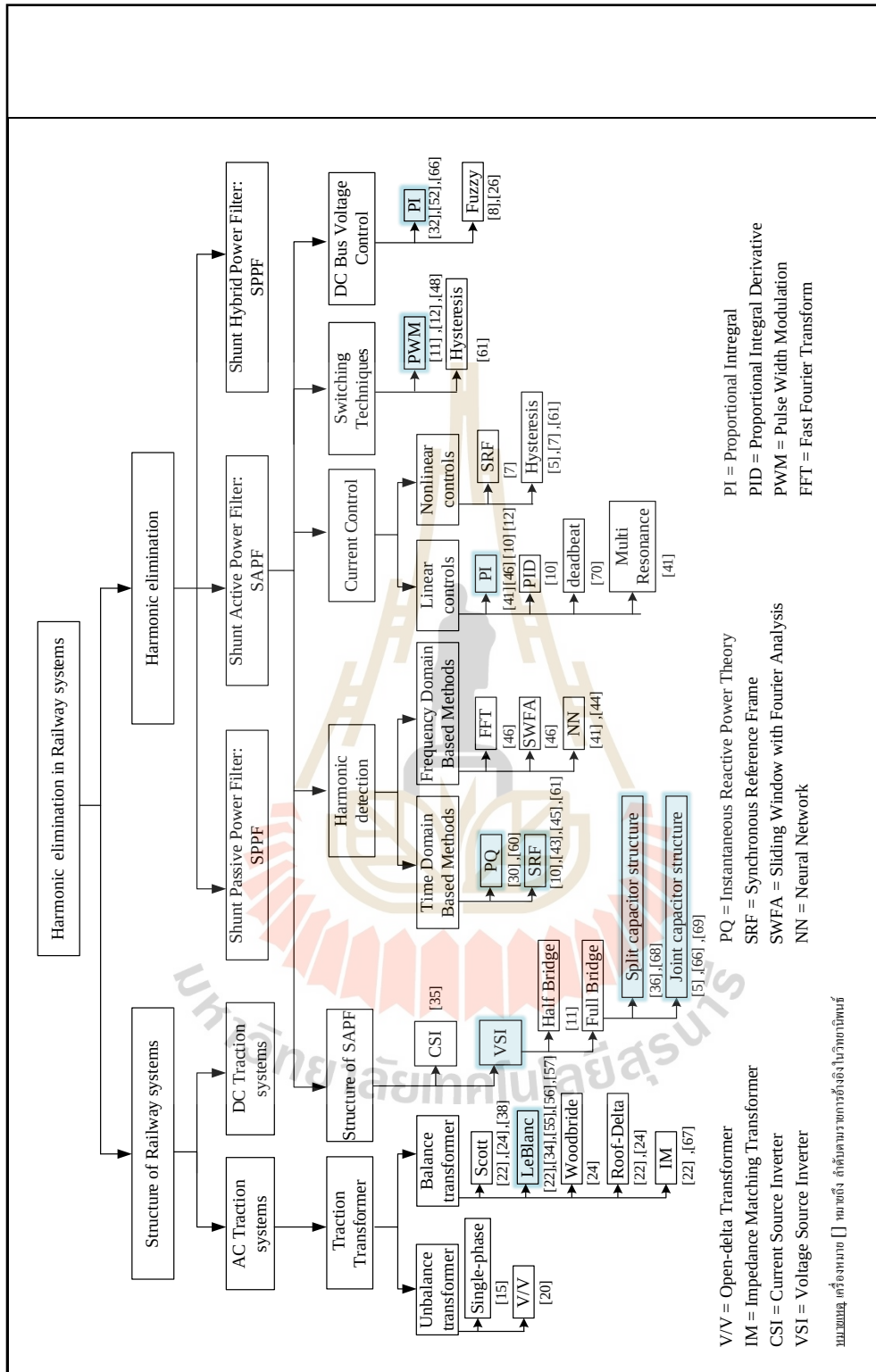
ตารางที่ 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2016	Atiqi Mohd Zainuri, Mohd Radzil, and al.	นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยตัวควบคุมพีชซีและตัวควบคุมพีไอ ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่า การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีชซีมีผลของการพุ่งเกิน (Overshoot) น้อยกว่าวิธีพีไอ

ในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับใช้งานร่วมกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ พบว่า งานวิจัยส่วนมากนิยมใช้การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ เนื่องจากมีโครงสร้างการควบคุมที่ไม่ซับซ้อนและให้ผลการควบคุมที่ดีเพียงพอ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดการออกแบบตัวควบคุมจะนำเสนอในบทที่ 5

2.8 สรุป

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถสรุปเป็นแผนภาพแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 โดยผลการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ผู้วิจัยตัดสินใจเลือกระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกและโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟรวมถึงระบบควบคุมการทำงานได้ดังนี้ ส่วนแรกผู้วิจัยเลือกใช้ระบบส่งจ่ายของระบบแรงไฟฟ้าที่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสพิกัด 26 kV 60 Hz ร่วมกับการใช้หม้อแปลงแบบเลอว์บลองคี่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส 2 ชุด เพื่อใช้งานกับโหลดของระบบแรงไฟฟ้า 2 ชุด โดยโหลดแรงไฟฟ้าที่ใช้จะแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติที่มีทั้งองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบแรงไฟฟ้าของประเทศไทยได้หวั่น ในส่วนที่สองวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน ผู้วิจัยเลือกใช้โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน โดยจะเปรียบเทียบใช้วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งกับวิธีการอ้างอิงซึ่งโครนส์เพื่อเลือกใช้ในส่วนการตรวจจับฮาร์มอนิก และสุดท้ายจะใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง



รูปที่ 2.1 แผนภาพผลการปรัศนัรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้า

บทที่ 3

การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ

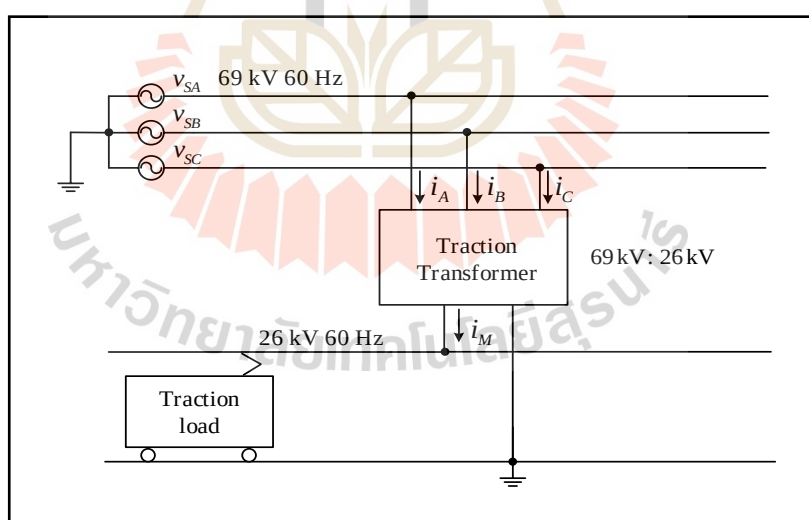
3.1 บทนำ

ระบบรางไฟฟ้าจำเป็นต้องมีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (Substation) สำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดของระบบราง โดยในปัจจุบันการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางมีอยู่สองรูปแบบ คือ ระบบไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current: DC) (L.R. Denning, 1987) และระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current: AC) (Blair A. Ross, 1971) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะระบบรางไฟฟ้าที่ใช้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นแบบระบบไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น เนื่องจากระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับมีสัดส่วนการใช้งานที่มากกว่าระบบรางไฟฟ้ากระแสตรง รวมถึงมีค่ากำลังงานสูญเสียต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบรางไฟฟ้ากระแสตรง (นคร จันทศร, 2011) เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ และการวิเคราะห์การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าที่นิยมใช้ทั้งหมด 4 ประเภท คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส (Linear transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า (Open delta transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก๊อต (Scott transformer) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ (Le-blanc transformer) ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้จากหัวข้อที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ นอกจากนี้ในหัวข้อที่ 3.4 จะเป็นการจำลองสถานการณ์ทดสอบการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภทเพื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติข้อดีและข้อเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสี่ประเภทสำหรับเลือกใช้งานในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ต่อไป

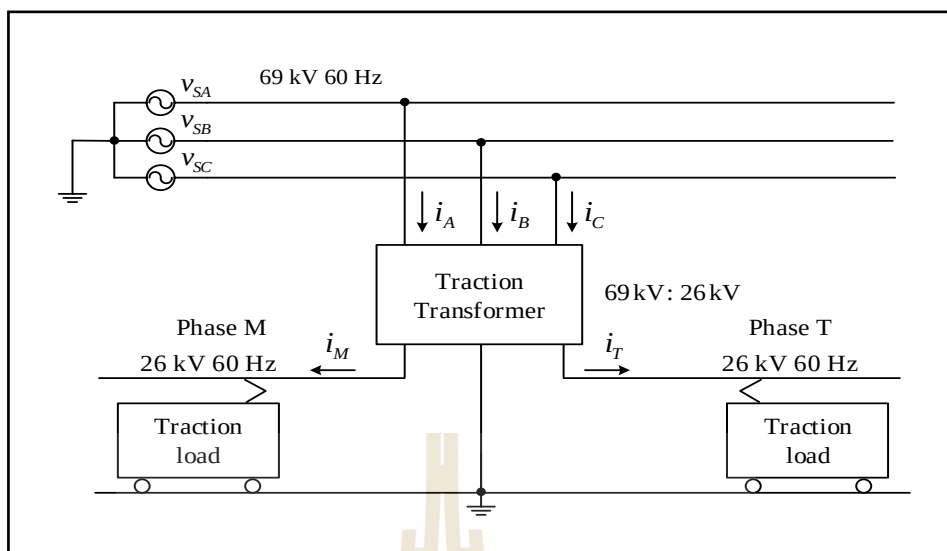
3.2 การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือ ระบบที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าในช่วง 25 kV ถึง 27.5 kV ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz ตามการผลิตไฟฟ้าของแต่ละประเทศ ทั้งนี้เนื่องจากระบบดังกล่าวเป็นระบบที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าสูงจึงทำให้สถานีจ่ายไฟฟ้ามีเสถียรภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและมีพิสัยการจ่ายไฟฟ้า (Feeding rang) ได้ไกลจึงเหมาะสมสำหรับรถไฟฟ้าทางไกลที่ต้องการความเร็วในการขับเคลื่อน ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบหนึ่งเฟส (Single-phase AC electric railway power system) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 โดยจากรูปดังกล่าว การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเริ่มจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยรับไฟฟ้าระดับแรงดัน

สูงที่พิกัด 69 kV จากกริดกำลังไฟฟ้าสามเฟส (Three-phase power grid) จากนั้นจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้า (Traction transformer) เพื่อแปลงเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีพิกัดแรงดันปานกลางขนาด 26 kV 60 Hz สำหรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับจะใช้วิธีการป้อนแบบสายส่งเหนือศีรษะ (Overhead wire system) ผ่านอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า แหนบรับไฟ หรือ สาลี่ (Pantograph) ซึ่งทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าจากสายส่งของระบบส่งจ่ายเข้าสู่ตัวรถไฟไปยังชุดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power converter) ใช้ในการขับเคลื่อนหรือดูดลากรถไฟ (Traction load) ต่อไป ระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสในรูปที่ 3.1 มีการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าลดระดับแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าสามเฟสให้เป็นระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสเพียงชุดเดียว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาเรื่องกระแสไม่สมดุลทางฝั่งปฐมภูมิของระบบไฟฟ้าได้ ดังนั้น เพื่อลดผลกระทบเรื่องกระแสไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจึงมีการใช้งานระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เป็นระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสร่วม (Co-phase AC electric railway power system) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยระบบดังกล่าวจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าดำเนินการแปลงแรงดันไฟฟ้าของหนึ่งสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยจากระบบไฟฟ้าสามเฟสให้เป็นระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสจำนวน 2 ชุด หรือ 2 เฟส (Phase M , Phase T) ซึ่งระบบหนึ่งเฟสทั้งสองชุดจะมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากันแต่มีมุมเฟสที่ต่างกัน ทั้งนี้มุมเฟสที่แตกต่างกันจะขึ้นอยู่กับประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เลือกใช้ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบหนึ่งเฟส



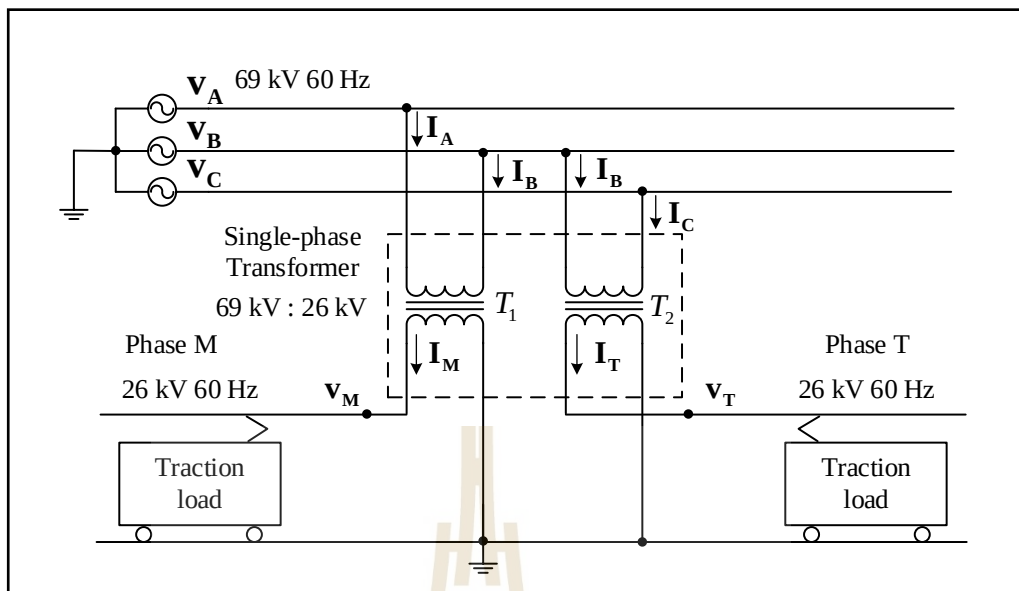
รูปที่ 3.2 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

3.3 หม้อแปลงส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม

หม้อแปลงไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมใช้สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าสามเฟสให้เป็นระบบไฟฟ้าสองเฟสและลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าลงให้เหมาะสมกับโหลดของระบบรางไฟฟ้า ปัจจุบันหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีใช้ในระบบรางอยู่หลายประเภท เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส (ใช้ 2 ตัว) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ (Le-blanc transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบวูดบริดจ์ (Woodbridge transformer) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบรูฟเดลต้า (Roof-delta transformer) เป็นต้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการวิเคราะห์การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า 4 ประเภท คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสี่ประเภทดังกล่าวเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้งาน และมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิเท่ากันในช่วง 66 kV ถึง 154 kV โดยรายละเอียดการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภทสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.3.1 การวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส

การวิเคราะห์การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสของระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวมดังแสดงในรูปที่ 3.3 มีจุดประสงค์เพื่อหาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้อธิบายการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิ (V_M, V_T) ค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิ (I_M, I_T) และค่ากระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า (I_A, I_B, I_C) ที่อยู่ในรูปของเฟสเซอร์ (phasor) ดังที่ปรากฏในระบบตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส

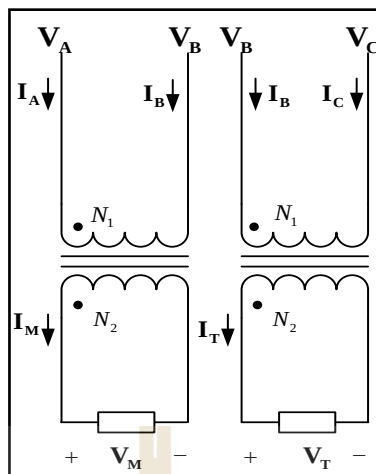
การวิเคราะห์การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสจะเริ่มต้นจากการพิจารณากำหนดให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมดุลแบบลำดับเฟสบวก (Positive sequence) ดังสมการที่ (3.1) ถึง (3.3)

$$V_A = V_m \angle 0^\circ \quad V \quad (3.1)$$

$$V_B = V_m \angle -120^\circ \quad V \quad (3.2)$$

$$V_C = V_m \angle 120^\circ \quad V \quad (3.3)$$

โดยที่ V_m คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิ



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส

การวิเคราะห์หาค่าแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ

จากโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสดังรูปที่ 3.4 เมื่อกำหนดให้ N_1 คือ จำนวนรอบขดลวดหม้อแปลงฝั่งปฐมภูมิ และ N_2 คือ จำนวนรอบขดลวดหม้อแปลงฝั่งทุติยภูมิ และอัตราส่วนของหม้อแปลงมีค่าเท่ากับ a โดยที่ $a = N_1 / N_2$ จะสามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิของเฟส M (V_M) และเฟส T (V_T) ได้จากสมการที่ (3.4) และ (3.5) ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงที่มาของสมการได้ดังนี้

จาก
$$\frac{V_M}{V_{AB}} = \frac{N_2}{N_1}$$

จะได้ว่า
$$V_M = \frac{1}{a} V_{AB} ; V_{AB} = V_{AN} - V_{BN}$$

ดังนั้น
$$V_M = \frac{1}{a} (V_{AN} - V_{BN})$$

แทนค่า
$$V_{AN} = V_m \angle 0^\circ \text{ และ } V_{BN} = V_m \angle -120^\circ$$

จะได้
$$V_M = \frac{1}{a} (V_m \angle 0^\circ - V_m \angle -120^\circ)$$

ดังนั้น
$$V_M = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle 30^\circ \quad (3.4)$$

จาก
$$\frac{V_T}{V_{BC}} = \frac{N_2}{N_1}$$

จะได้ว่า
$$V_T = \frac{1}{a} V_{BC} \quad ; \quad V_{BC} = V_{BN} - V_{CN}$$

ดังนั้น
$$V_T = \frac{1}{a} (V_{BN} - V_{CN})$$

แทนค่า
$$V_{BN} = V_m \angle -120^\circ$$

และ
$$V_{CN} = V_m \angle 120^\circ$$

จะได้
$$V_T = \frac{1}{a} (V_m \angle -120^\circ - V_m \angle 120^\circ)$$

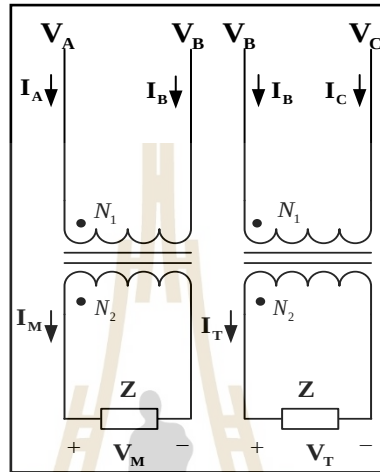
ดังนั้น
$$V_T = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle -90^\circ \quad (3.5)$$

จากสมการแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิในสมการที่ (3.4) และ (3.5) จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเฟส M (V_M) และแรงดันไฟฟ้าเฟส T (V_T) มีขนาดเท่ากันเท่ากับ $\sqrt{3}/a V_m$ แต่จะมีมุมเฟสแตกต่างกัน โดยเฟส M มีมุมเท่ากับ 30° และเฟส T มีมุมเท่ากับ -90°

การวิเคราะห์หาค่ากระแสไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ

การวิเคราะห์หาค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า จะใช้การพิจารณาการจ่ายโหลดอิมพีแดนซ์ (Impedance: Z) ของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยที่ $Z = R + jX$ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นค่าจริงที่เป็นค่าความต้านทาน (Resistance: R) และส่วนที่เป็นค่าจินตภาพที่เป็นค่ารีแอคแตนซ์ (Reactance: X) อย่างไรก็ตามสำหรับการวิเคราะห์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาใช้โหลดอิมพีแดนซ์ที่มีเฉพาะค่าความต้านทานเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการให้ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิมีมุมเฟสที่ตรงกันโดยไม่ต้องการให้เกิดผลของการเลื่อนเฟส (Phase shift) ที่เกิดขึ้นจากผลของค่ารีแอคแตนซ์

จากโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสในรูปที่ 3.4 หากพิจารณาการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสทั้งสองดังปรากฏในรูปที่ 3.5 จะสามารถคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าผั่งทุติยภูมิของเฟส M (I_M) และเฟส T (I_T) ได้ดังสมการที่ (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส

จาก

$$I_M = \frac{V_M}{Z}$$

แทนค่า

$$V_M = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle 30^\circ$$

และกำหนดให้

$$I_{m1} = \frac{V_m}{Z}$$

จะได้

$$I_M = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 30^\circ \quad (3.6)$$

และจาก

$$I_T = \frac{V_T}{Z}$$

แทนค่า

$$V_T = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle -90^\circ$$

และกำหนดให้

$$I_{m1} = \frac{V_m}{Z}$$

จะได้

$$I_T = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -90^\circ \quad (3.7)$$

โดยที่ I_{m1} คือ กระแสไฟฟ้าค่ายอดทางฝั่งปฐมภูมิ

จากผลการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสดังแสดงในสมการที่ (3.6) และ (3.7) จะเห็นว่าการจ่ายโหลดอิมพีแดนซ์ที่มีเฉพาะค่าความต้านทาน ขนาดกระแสไฟฟ้าของเฟส M และกระแสไฟฟ้าเฟส T มีค่าเท่ากันเท่ากับ $(\sqrt{3}/a)I_{m1}$ แต่มุมเฟสต่างกัน คือ เฟส M มีค่าเท่ากับ 30° และเฟส T มีค่าเท่ากับ -90° เช่นเดียวกับกรณีของมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ (ในกรณีการจ่ายโหลดที่มีคาร์แอคแตนต์ร่วมด้วยค่ามุมเฟสของกระแสและแรงดันฝั่งทุติยภูมิจะมีค่าต่างกันซึ่งเกิดจากค่ามุม $\angle Z$)

การวิเคราะห์หาค่ากระแสไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิ

จากการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสในรูปที่ 3.5 จะสามารถแสดงการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟส (I_A, I_B, I_C) ทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ตั้งสมการที่ (3.8) ถึง (3.10)

จาก

$$\frac{I_A}{I_M} = \frac{N_2}{N_1}$$

ดังนั้น

$$I_A = \frac{I_M}{a} \quad (3.8)$$

จาก

$$I_B = -\frac{N_2}{N_1} I_M + \frac{N_2}{N_1} I_T$$

ดังนั้น

$$I_B = -\frac{1}{a} I_M + \frac{1}{a} I_T \quad (3.9)$$

และจาก

$$\frac{I_C}{-I_T} = \frac{N_2}{N_1}$$

ดังนั้น
$$I_c = -\frac{I_r}{a} \quad (3.10)$$

จากสมการกระแสไฟฟ้าสามเฟสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสในสมการที่ (3.8) ถึง (3.10) เมื่อแทนค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิตามสมการที่ (3.6) และ (3.7) คือ $I_M = (\sqrt{3}/a)I_{m1}\angle 30^\circ$ และ $I_T = (\sqrt{3}/a)I_{m1}\angle -90^\circ$ ลงในสมการดังกล่าว จะสามารถแสดงสมการการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเชิงเส้นหนึ่งเฟสได้ดังสมการที่ (3.11) ถึง (3.13) ดังนี้

จาก
$$I_A = \frac{I_M}{a}$$

แทนค่า
$$I_M = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 30^\circ$$

จะได้
$$I_A = \frac{3}{a^2} I_{m1} \angle 30^\circ \quad (3.11)$$

จาก
$$I_B = -\frac{N_2}{N_1} I_M + \frac{N_2}{N_1} I_T$$

แทนค่า
$$I_M = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 30^\circ$$

และ
$$I_T = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -90^\circ$$

จะได้
$$I_B = -\frac{\sqrt{3}}{a^2} I_{m1} \angle 30^\circ + \frac{\sqrt{3}}{a^2} I_{m1} \angle -90^\circ$$

ดังนั้น
$$I_B = \frac{3}{a^2} I_{m1} \angle -120^\circ \quad (3.12)$$

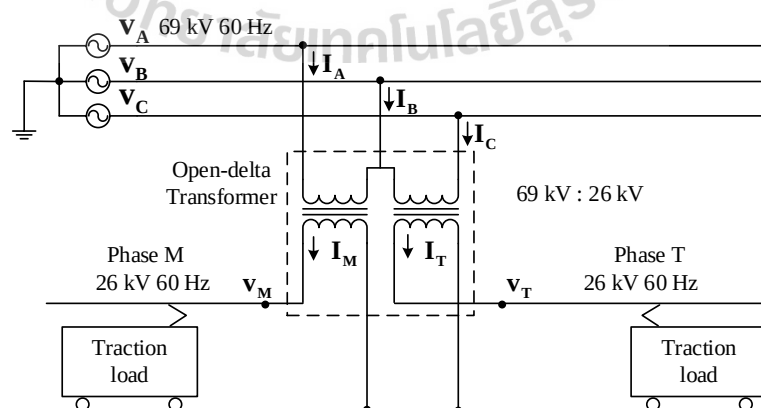
จาก
$$I_c = -\frac{I_r}{a}$$

แทนค่า	$I_T = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -90^\circ$	
จะได้	$I_C = -\frac{\sqrt{3}}{a^2} I_{m1} \angle -90^\circ$	
ดังนั้น	$I_C = \frac{\sqrt{3}}{a^2} I_{m1} \angle 90^\circ$	(3.13)

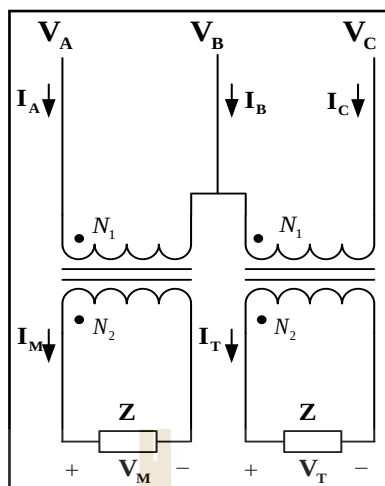
จากสมการการคำนวณกระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิทั้งสามเฟสในข้างต้น จะสังเกตได้ว่า ค่ากระแส I_A มีขนาดเท่ากับค่ากระแส I_C ในขณะที่ค่ากระแส I_B มีขนาดมากกว่า I_A และ I_C นอกจากนี้เมื่อพิจารณามุมเฟส จะพบว่ามุมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากับ 30° และ 90° ตามลำดับ จากค่าขนาดและมุมเฟสของกระแสไฟฟ้าดังกล่าวหมายความว่า ค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสมีลักษณะไม่สมดุลทั้งขนาดและมุมเฟส

3.3.2 การวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวมที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 จากระบบดังกล่าวสามารถวิเคราะห์การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อหาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ (V_M, V_T) ค่ากระแสไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ (I_M, I_T) และค่ากระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า (I_A, I_B, I_C) โดยการวิเคราะห์จะเริ่มต้นจากการกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสามเฟสสมดุลดังสมการที่ (3.1) ถึง (3.3) เช่นเดียวกับการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.6 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของระบบรางที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า

การวิเคราะห์หาค่าแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ

จากค่าแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าและอัตราส่วนของขดลวดหม้อแปลง ($N_1/N_2 = a$) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 จะสามารถคำนวณหาแรงดันทางฝั่งทุติยภูมิของเฟส M (V_M) และเฟส T (V_T) ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า แสดงได้ดังสมการที่ (3.14) และ (3.15) ตามลำดับ

$$\text{จาก } \frac{V_M}{V_{AB}} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\text{จะได้ว่า } V_M = \frac{1}{a} V_{AB} ; V_{AB} = V_{AN} - V_{BN}$$

$$\text{ดังนั้น } V_M = \frac{1}{a} (V_{AN} - V_{BN})$$

$$\text{แทนค่า } V_{AN} = V_m \angle 0^\circ$$

$$\text{และ } V_{BN} = V_m \angle -120^\circ$$

$$\text{จะได้ } V_M = \frac{1}{a} (V_m \angle 0^\circ - V_m \angle -120^\circ)$$

ดังนั้น
$$V_M = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle 30^\circ \quad (3.14)$$

จาก
$$\frac{V_T}{V_{BC}} = \frac{N_2}{N_1}$$

จะได้ว่า
$$V_T = \frac{1}{a} V_{BC} \quad ; \quad V_{BC} = V_{BN} - V_{CN}$$

ดังนั้น
$$V_T = \frac{1}{a} (V_{BN} - V_{CN})$$

แทนค่า
$$V_{BN} = V_m \angle -120^\circ$$

และ
$$V_{CN} = V_m \angle 120^\circ$$

จะได้
$$V_T = \frac{1}{a} (V_m \angle -120^\circ - V_m \angle 120^\circ)$$

ดังนั้น
$$V_T = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle -90^\circ \quad (3.15)$$

จากสมการที่ (3.14) และ (3.15) จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิทั้งสองเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้ามีค่าเท่ากันเท่ากับ $(\sqrt{3}/a)V_m$ และมีมุมเฟสเท่ากับ 30° และ -90° ตามลำดับเฟส ซึ่งเหมือนกับกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส นอกจากนี้ เนื่องจากโครงสร้างของหม้อแปลงแบบโอเพนเดลต้าและหม้อแปลงแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสมีลักษณะการต่อโหลดใช้งานที่เหมือนกัน จึงส่งผลให้สมการที่ใช้หากระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิ (I_M, I_T) และกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า (I_A, I_B, I_C) เหมือนกับกรณีการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสด้วยเช่นกัน ดังนั้น

ค่ากระแสไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ

$$I_M = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 30^\circ$$

$$I_T = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -90^\circ$$

ค่ากระแสไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิ

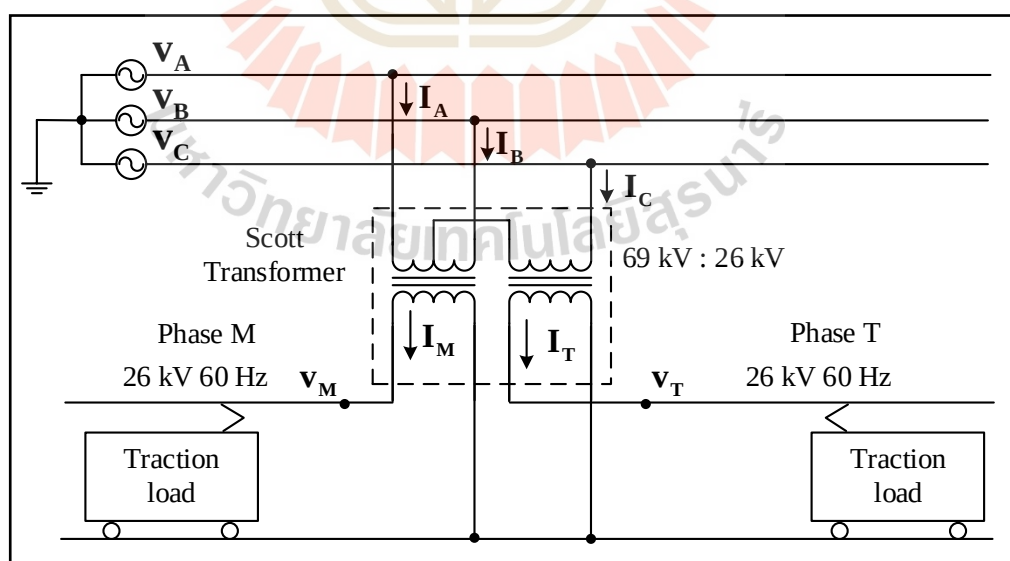
$$I_A = \frac{I_M}{a}$$

$$I_B = -\frac{1}{a} I_M + \frac{1}{a} I_T$$

$$I_C = -\frac{I_T}{a}$$

3.3.3 การวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต

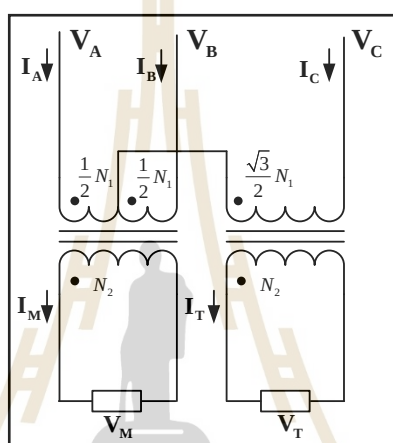
ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสรวมที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 โดยการวิเคราะห์การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้างกล่าวเพื่อคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ (V_M, V_T) ค่ากระแสไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ (I_M, I_T) และค่ากระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า (I_A, I_B, I_C) สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3.8 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของระบบรางที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต

การวิเคราะห์หาค่าแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ

การวิเคราะห์การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตจะเริ่มจากการกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสามเฟสสมดุลลำดับเฟสบวกตามสมการที่ (3.1) ถึง (3.3) เช่นกัน ซึ่งจากแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าและอัตราส่วนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต ($a = N_2/N_1$) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 จะสามารถคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิเฟส M (V_M) และ เฟส T (V_T) ได้ดังสมการที่ (3.16) และ (3.17) ตามลำดับ โดยสามารถแสดงที่มาของสมการได้ดังนี้



รูปที่ 3.9 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต

จาก
$$\frac{V_M}{V_{AB}} = \frac{N_2}{N_1}$$

จะได้ว่า
$$V_M = \frac{1}{a} V_{AB} ; V_{AB} = V_{AN} - V_{BN}$$

ดังนั้น
$$V_M = \frac{1}{a} (V_{AN} - V_{BN})$$

แทนค่า
$$V_{AN} = V_m \angle 0^\circ$$

และ
$$V_{BN} = V_m \angle -120^\circ$$

จะได้
$$V_M = \frac{1}{a}(V_m \angle 0^\circ - V_m \angle -120^\circ)$$

ดังนั้น
$$V_M = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle 30^\circ \quad (3.16)$$

จาก
$$\frac{V_T}{0.5(V_{AN} + V_{BN}) - V_{CN}} = \frac{N_2}{\frac{\sqrt{3}}{2} N_1}$$

จะได้ว่า
$$V_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{a} ((0.5V_{AN} + 0.5V_{BN}) - V_{CN})$$

แทนค่า
$$V_{AN} = V_m \angle 0^\circ,$$

$$V_{BN} = V_m \angle -120^\circ$$

และ
$$V_{CN} = V_m \angle 120^\circ$$

จะได้
$$V_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{a} (0.5V_m \angle 0^\circ + 0.5V_m \angle -120^\circ - V_m \angle 120^\circ)$$

ดังนั้น
$$V_T = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle -60^\circ \quad (3.17)$$

จากสมการแรงดันไฟฟ้าในสมการที่ (3.16) และ (3.17) จะเห็นว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเฟส M (V_M) และแรงดันไฟฟ้าเฟส T (V_T) มีขนาดเท่ากันเท่ากับ $(\sqrt{3}/a)V_m$ โดยที่เฟส M จะมีมุมเฟสเท่ากับ 30° ส่วนเฟส T จะมีมุมเฟสเท่ากับ -60°

การวิเคราะห์หาค่ากระแสไฟฟ้าผึ่งทุติยภูมิ

จากโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตในรูปที่ 3.9 หากพิจารณาให้โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตทั้งสองเฟสแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ดังแสดงรูปที่ 3.10 จะสามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าเฟส M และกระแสไฟฟ้าเฟส T ได้ดังสมการที่ (3.18) และ (3.19) ตามลำดับ

จาก
$$I_M = \frac{V_M}{Z}$$

แทนค่า
$$V_M = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle 30^\circ$$

และกำหนดให้
$$I_{m1} = \frac{V_m}{Z}$$

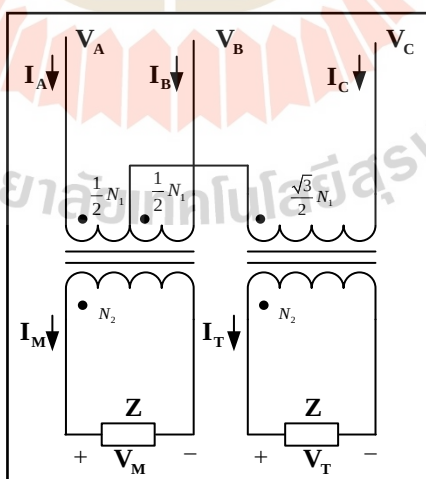
จะได้
$$I_M = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 30^\circ \quad (3.18)$$

และจาก
$$I_T = \frac{V_T}{Z}$$

แทนค่า
$$V_T = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle -60^\circ$$

และกำหนดให้
$$I_{m1} = \frac{V_m}{Z}$$

จะได้
$$I_T = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -60^\circ \quad (3.19)$$



รูปที่ 3.10 การจ่ายโหลดอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต

การวิเคราะห์หาค่ากระแสไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิ

การคำนวณหากระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตจะใช้การพิจารณาการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าในรูปที่ 3.10 ซึ่งสามารถแสดงผลสมการสำหรับใช้คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฟส A เฟส B และเฟส C ได้ดังสมการที่ (3.20) ถึง (3.22) ตามลำดับดังนี้

จาก
$$I_A = \frac{N_2}{N_1} I_M + \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{N_2}{\sqrt{3}}}{\frac{N_1}{2}} I_T \right)$$

ดังนั้น
$$I_A = \frac{1}{a} I_M + \frac{1}{\sqrt{3}a} I_T \quad (3.20)$$

จาก
$$I_B = -\frac{N_2}{N_1} I_M + \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{N_2}{\sqrt{3}}}{\frac{N_1}{2}} I_T \right)$$

ดังนั้น
$$I_B = -\frac{1}{a} I_M + \frac{1}{\sqrt{3}a} I_T \quad (3.21)$$

และจาก
$$I_C = -\frac{\frac{N_2}{\sqrt{3}}}{\frac{N_1}{2}} I_T$$

ดังนั้น
$$I_C = -\frac{2}{\sqrt{3}a} I_T \quad (3.22)$$

จากสมการกระแสไฟฟ้าสามเฟสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตในสมการที่ (3.20) ถึง (3.22) เมื่อแทนค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิ (I_M, I_T) ตามสมการที่ (3.18) และ (3.19) จะสามารถแสดงผลการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตได้ดังสมการที่ (3.23) ถึง (3.25) ดังนี้

จาก
$$I_A = \frac{N_2}{N_1} I_M + \frac{1}{2} \left(\frac{N_2}{\frac{\sqrt{3}}{2} N_1} I_T \right)$$

แทนค่า
$$I_M = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 30^\circ$$

และ
$$I_T = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -60^\circ$$

จะได้
$$I_A = \frac{1}{a} \cdot \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 30^\circ + \frac{1}{\sqrt{3}a} \cdot \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -60^\circ$$

$$I_A = \frac{\sqrt{3}}{a^2} I_{m1} \angle 30^\circ + \frac{1}{a^2} I_{m1} \angle -60^\circ$$

ดังนั้น
$$I_A = \frac{2}{a^2} I_{m1} \angle 0^\circ \quad (3.23)$$

จาก
$$I_B = -\frac{1}{a} I_M + \frac{1}{\sqrt{3}a} I_T$$

แทนค่า
$$I_M = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 30^\circ$$

และ
$$I_T = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -60^\circ$$

จะได้
$$I_B = -\frac{1}{a} \cdot \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 30^\circ + \frac{1}{\sqrt{3}a} \cdot \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -60^\circ$$

$$I_B = -\frac{\sqrt{3}}{a^2} I_{m1} \angle 30^\circ + \frac{1}{a^2} I_{m1} \angle -60^\circ$$

ดังนั้น
$$I_B = \frac{2}{a^2} I_{m1} \angle -120^\circ \quad (3.24)$$

และจาก

$$I_C = -\frac{2}{\sqrt{3}a} I_T$$

แทนค่า

$$I_T = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -60^\circ$$

จะได้

$$I_C = -\frac{2}{\sqrt{3}a} \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -60^\circ$$

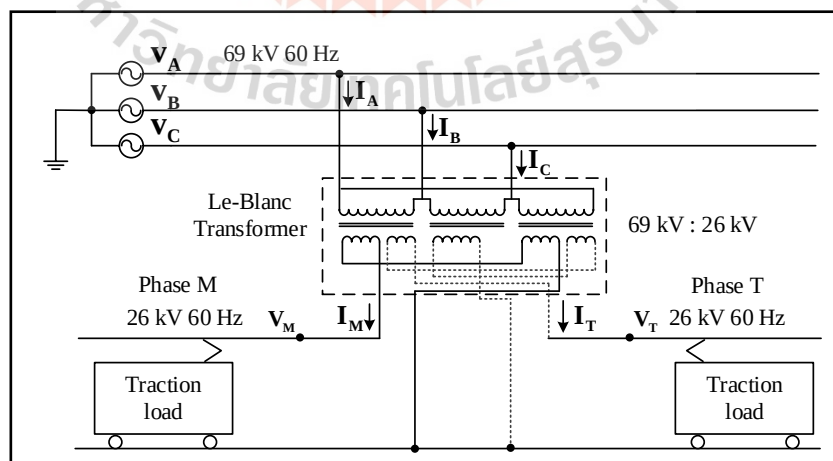
ดังนั้น

$$I_C = \frac{2}{a^2} I_{m1} \angle (120^\circ) \quad (3.25)$$

จากผลการคำนวณกระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิทั้งสามเฟส (I_A , I_B , I_C) จะสังเกตได้ว่า ค่ากระแสไฟฟ้า I_A , I_B และ I_C มีขนาดเท่ากันเท่ากับ $(2/a^2)I_{m1}$ ส่วนมุมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากับ 0° , 120° และ 240° ตามลำดับ จากขนาดและมุมเฟสของค่ากระแสไฟฟ้างกล่าวหมายความว่า กระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตมีลักษณะสมดุลแบบลำดับเฟสบวก

3.3.4 การวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์

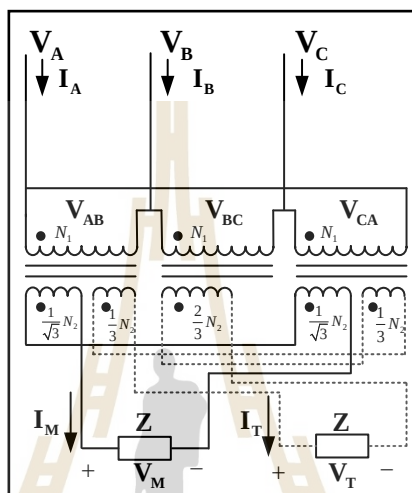
การวิเคราะห์การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ที่ใช้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสรวมแสดงได้ดังรูปที่ 3.11 จากรูปดังกล่าวการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ (V_M , V_T) ค่ากระแสไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ (I_M , I_T) และค่ากระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ (I_A , I_B , I_C) สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3.11 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของระบบรางที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์

การวิเคราะห์หาค่าแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ

การวิเคราะห์การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์จะเริ่มจากการกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสามเฟสสมดุลเช่นเดียวกับการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภทที่ผ่านมา ดังสมการที่ (3.1) ถึง (3.3)



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์

จากแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าและอัตราส่วนของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์ ($N_1 / N_2 = a$) สามารถแสดงโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์ได้ดังรูปที่ 3.12 จากรูปดังกล่าวการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิเฟส M (V_M) และเฟส T (V_T) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.26) และ (3.27) ตามลำดับ โดยที่มาของสมการแสดงได้ดังนี้

จาก
$$V_M + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} V_{AB} - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} V_{CA} = 0$$

จะได้ว่า
$$V_M = \frac{1}{\sqrt{3}a} (V_{CA} - V_{AB})$$

โดยที่
$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN}$$

และ

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN}$$

ดังนั้น

$$V_M = \frac{1}{\sqrt{3}a} ((V_{CN} - V_{AN}) - (V_{AN} - V_{BN}))$$

แทนค่า

$$V_{AN} = V_m \angle 0^\circ,$$

$$V_{BN} = V_m \angle -120^\circ$$

และ

$$V_{CN} = V_m \angle 120^\circ$$

จะได้

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

$$V_M = -\frac{3}{\sqrt{3}a} V_m \angle 0^\circ$$

ดังนั้น

$$V_M = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle 180^\circ$$

(3.26)

จาก

$$V_T + \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} V_{AB} - \frac{2}{3} \frac{N_2}{N_1} V_{BC} + \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} V_{CA} = 0$$

จะได้ว่า

$$V_T = \frac{2}{3a} V_{BC} - \frac{1}{3a} [V_{CA} + V_{AB}]$$

โดยที่

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN},$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN}$$

และ

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN}$$

ดังนั้น

$$V_T = \frac{2}{3a} (V_{BN} - V_{CN}) - \frac{1}{3a} [(V_{CN} - V_{AN}) + (V_{AN} - V_{BN})]$$

$$V_T = \frac{2}{3a}(V_{BN} - V_{CN}) - \frac{1}{3a}(V_{CN} - V_{BN})$$

$$V_T = \frac{2}{3a}(V_{BN} - V_{CN}) + \frac{1}{3a}(V_{BN} - V_{CN})$$

$$V_T = \frac{3}{3a}(V_{BN} - V_{CN})$$

แทนค่า

$$V_{BN} = V_m \angle -120^\circ$$

และ

$$V_{CN} = V_m \angle 120^\circ$$

จะได้

$$V_T = \frac{1}{a}(V_m \angle -120^\circ - V_m \angle 120^\circ)$$

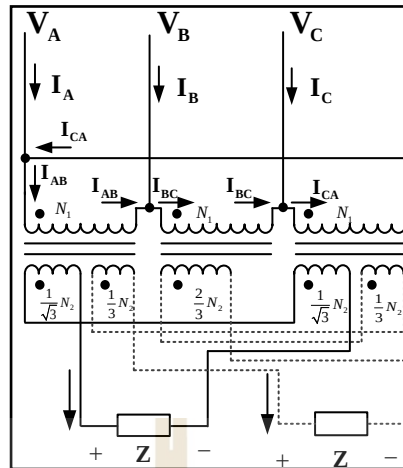
ดังนั้น

$$V_T = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle -90^\circ \quad (3.27)$$

จากสมการแรงดันไฟฟ้าในสมการที่ (3.26) และ (3.27) จะเห็นว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าเฟส M (V_m) และแรงดันไฟฟ้าเฟส T (V_T) มีขนาดเท่ากันเท่ากับ $(\sqrt{3}/a)V_m$ โดยแรงดันไฟฟ้าที่เฟส M จะมีมุมเฟสเท่ากับ 180° ส่วนแรงดันไฟฟ้าที่เฟส T จะมีมุมเฟสเท่ากับ -90°

การวิเคราะห์หาค่ากระแสไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิ

จากโครงสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ในรูปที่ 3.12 หากพิจารณาให้โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองเฟสแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ดังแสดงในรูปที่ 3.13 จะสามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าเฟส M (I_M) และกระแสไฟฟ้าเฟส T (I_T) ได้ดังสมการที่ (3.28) และ (3.29) ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 3.13 การจ่ายโวลต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอร်บลองค์

จาก
$$I_M = \frac{V_M}{Z}$$

แทนค่า
$$V_M = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle 180^\circ$$

และกำหนดให้
$$I_{m1} = \frac{V_m}{Z}$$

จะได้
$$I_M = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 180^\circ \quad (3.28)$$

จาก
$$I_T = \frac{V_T}{Z}$$

แทนค่า
$$V_T = \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle -90^\circ$$

และกำหนดให้
$$I_{m1} = \frac{V_m}{Z}$$

จะได้
$$I_T = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -90^\circ \quad (3.29)$$

การวิเคราะห์หาค่ากระแสไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิ

การคำนวณหากระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์จะพิจารณาโดยใช้การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งสามารถแสดงผลการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า I_{AB} , I_{BC} และ I_{CA} ได้ดังสมการที่ (3.30) ถึง (3.32) ตามลำดับดังนี้

จาก
$$I_{AB} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} I_M - \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} I_T$$

ดังนั้น
$$I_{AB} = -\frac{1}{\sqrt{3}a} I_M - \frac{1}{3a} I_T \quad (3.30)$$

จาก
$$I_{BC} = \frac{2}{3} \frac{N_2}{N_1} I_T$$

ดังนั้น
$$I_{BC} = \frac{2}{3a} I_T \quad (3.31)$$

จาก
$$I_{CA} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} I_M - \frac{1}{3} \frac{N_2}{N_1} I_T$$

ดังนั้น
$$I_{CA} = \frac{1}{\sqrt{3}a} I_M - \frac{1}{3a} I_T \quad (3.32)$$

จากการจ่ายกระแสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์ในรูปที่ 3.13 จะสามารถคำนวณหากระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟส (I_A , I_B , I_C) ได้ดังสมการที่ (3.33) ถึง (3.35) ซึ่งแสดงที่มาได้ดังนี้

จาก
$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

แทนค่า
$$I_{AB} = -\frac{1}{\sqrt{3}a} I_M - \frac{1}{3a} I_T$$

และ

$$I_{CA} = \frac{1}{\sqrt{3}a} I_M - \frac{1}{3a} I_T$$

จะได้

$$I_A = -\frac{1}{\sqrt{3}a} I_M - \frac{1}{3a} I_T - \left[\frac{1}{\sqrt{3}a} I_M - \frac{1}{3a} I_T \right]$$

ดังนั้น

$$I_A = -\frac{2}{\sqrt{3}a} I_M \quad (3.33)$$

จาก

$$I_B = I_{BC} - I_{AB}$$

แทนค่า

$$I_{BC} = \frac{2}{3a} I_T$$

และ

$$I_{AB} = -\frac{1}{\sqrt{3}a} I_M - \frac{1}{3a} I_T$$

จะได้

$$I_B = \frac{2}{3a} I_T - \left[-\frac{1}{\sqrt{3}a} I_M - \frac{1}{3a} I_T \right]$$

นั่นคือ

$$I_B = \frac{1}{\sqrt{3}a} I_M + \frac{1}{a} I_T \quad (3.34)$$

จาก

$$I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

แทนค่า

$$I_{BC} = \frac{2}{3a} I_T$$

และ

$$I_{CA} = \frac{1}{\sqrt{3}a} I_M - \frac{1}{3a} I_T$$

จะได้

$$I_C = \frac{1}{\sqrt{3}a} I_M - \frac{1}{3a} I_T - \left[\frac{2}{3a} I_T \right]$$

ดังนั้น

$$I_C = \frac{1}{\sqrt{3}a} I_M - \frac{1}{a} I_T \quad (3.35)$$

จากสมการกระแสไฟฟ้าสามเฟสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรบลองค์ในสมการที่ (3.33) ถึง (3.35) เมื่อแทนค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิ (I_M, I_T) ตามสมการที่ (3.18) และ (3.19) จะสามารถแสดงผลสมการสำหรับใช้คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าสามเฟสฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรบลองค์ได้ดังสมการที่ (3.36) ถึง (3.38) ดังนี้

$$\begin{aligned}
 &\text{จาก} \quad I_A = -\frac{2}{\sqrt{3}a} I_M \\
 &\text{แทนค่า} \quad I_M = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 180^\circ \\
 &\text{จะได้} \quad I_A = -\frac{2}{\sqrt{3}a} \frac{\sqrt{3}}{a} V_m \angle 180^\circ \\
 &\text{ดังนั้น} \quad I_A = \frac{2}{a^2} I_{m1} \angle 0^\circ \quad (3.36) \\
 &\text{จาก} \quad I_B = \frac{1}{\sqrt{3}a} I_M + \frac{1}{a} I_T \\
 &\text{แทนค่า} \quad I_M = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 180^\circ \\
 &\text{และ} \quad I_T = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -90^\circ \\
 &\text{จะได้} \quad I_B = \frac{1}{\sqrt{3}a} \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 180^\circ + \frac{1}{a} \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -90^\circ \\
 &\quad I_B = \frac{1}{a^2} I_{m1} \angle 180^\circ + \frac{\sqrt{3}}{a^2} I_{m1} \angle -90^\circ \\
 &\text{ดังนั้น} \quad I_B = \frac{2}{a^2} I_{m1} \angle -120^\circ \quad (3.37)
 \end{aligned}$$

และจาก
$$I_C = \frac{1}{\sqrt{3}a} I_M - \frac{1}{a} I_T$$

แทนค่า
$$I_M = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 180^\circ$$

และ
$$I_T = \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -90^\circ$$

จะได้
$$I_C = \frac{1}{\sqrt{3}a} \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle 180^\circ - \frac{1}{a} \frac{\sqrt{3}}{a} I_{m1} \angle -90^\circ$$

$$I_C = \frac{1}{a^2} I_{m1} \angle 180^\circ - \frac{\sqrt{3}}{a^2} I_{m1} \angle -90^\circ$$

ดังนั้น
$$I_C = \frac{2}{a^2} I_{m1} \angle (120^\circ) \quad (3.38)$$

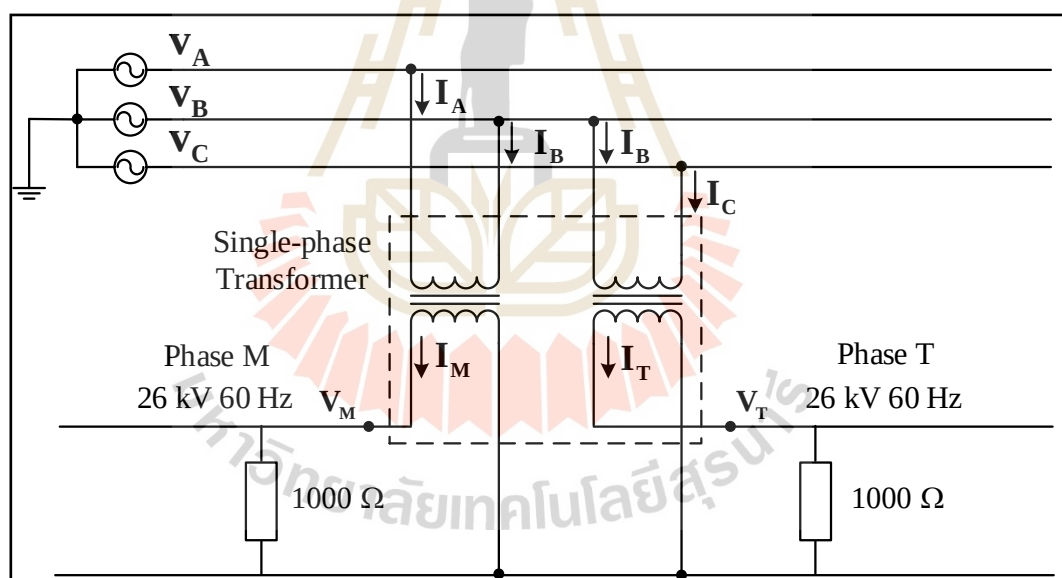
จากผลการคำนวณกระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิทั้งสามเฟส (I_A , I_B , I_C) จะสังเกตได้ว่า ค่ากระแส I_A , I_B และ I_C มีขนาดเท่ากันทั้งสามเฟส เท่ากับ $(2/a^2)I_{m1}$ ส่วนมุมเฟสของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสมีค่าเท่ากับ 0° - 120° และ 120° ตามลำดับ จากขนาดและมุมเฟสของค่ากระแสไฟฟ้างกล่าวแสดงให้เห็นว่า การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิที่มีลักษณะสมดุลแบบลำดับเฟสบวก

จากการวิเคราะห์การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสี่ประเภทในข้างต้น จะสังเกตได้ว่า ภายหลังการจ่ายโหลดอิมพีแดนซ์ทั้งสองเฟส กระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิ (I_A , I_B , I_C) ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้ามีลักษณะไม่สมดุลทั้งขนาดและมุมเฟสเหมือนกัน คือ $(\sqrt{3}/a^2)I_{m1} \angle 30^\circ$, $(3/a^2)I_{m1} \angle -120^\circ$ และ $(\sqrt{3}/a^2)I_{m1} \angle 90^\circ$ ตามลำดับเฟส ในขณะที่การจ่ายโหลดด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์จะให้ผลของกระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิที่มีลักษณะสมดุลทั้งขนาดและมุมเฟสแบบลำดับเฟสบวก คือ มีค่า I_A , I_B และ I_C เท่ากับ $(2/a^2)I_{m1} \angle 0^\circ$, $(2/a^2)I_{m1} \angle -120^\circ$ และ $(2/a^2)I_{m1} \angle 120^\circ$ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสี่ประเภท ในหัวข้อถัดไปจะทำการจำลองสถานการณ์ทดสอบการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสี่ประเภทด้วยโปรแกรม Simulink/MATLAB เพื่อเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิ

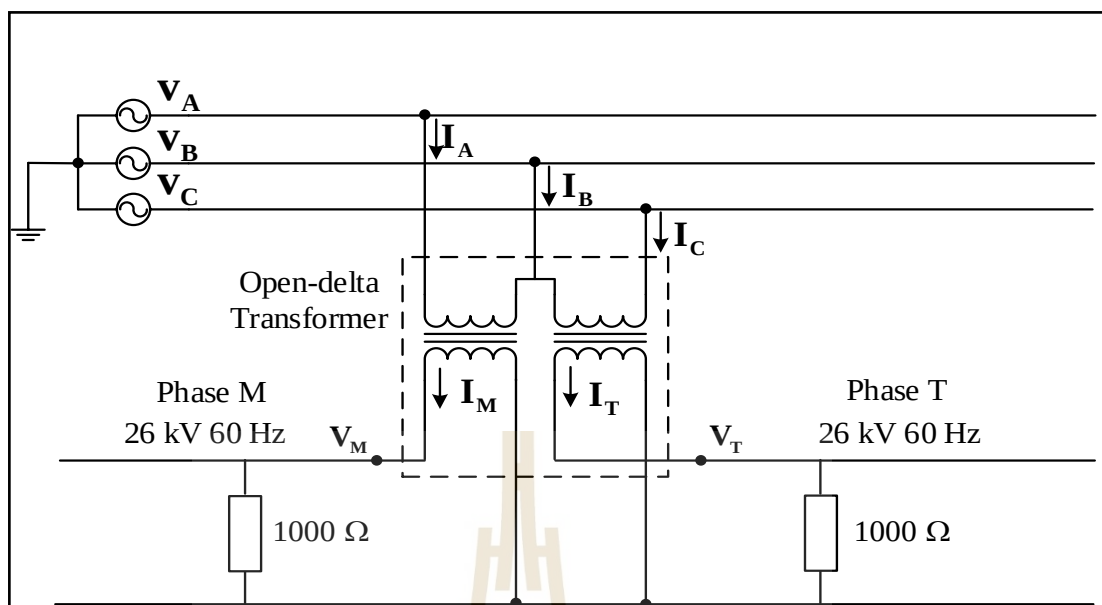
ที่ได้จากผลการจำลองสถานการณ์การณ้กับผลการที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภทตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อนี้ การจำลองสถานการณ์ดังกล่าวสามารถดูได้จากหัวข้อที่ 3.4

3.4 การจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดของหม้อแปลงในระบบรางไฟฟ้า

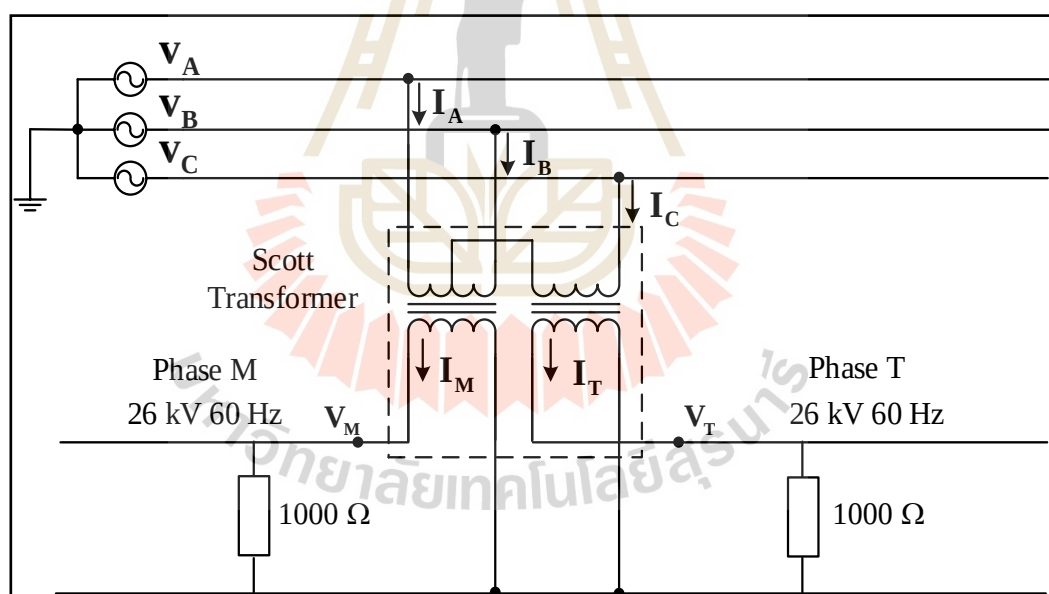
ในหัวข้อนี้จะทำการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้า 4 ประเภท คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลอนด์แสดงในรูปที่ 3.14 ถึง 3.17 โดยโหลดที่ใช้ในการทดสอบจะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์คงที่เท่ากับ $1000\ \Omega$ (เนื่องจากไม่ต้องการให้เกิดผลของการเลื่อนเฟสของค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิจึงกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ให้มีเฉพาะค่าความต้านทานเท่านั้น) ทั้งนี้การเปรียบเทียบดังกล่าวจะแบ่งเป็นสามกรณีการจ่ายโหลด คือ กรณีจ่ายโหลดทั้งเฟส M และเฟส T กรณีจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M และกรณีจ่ายโหลดเฉพาะเฟส T ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้



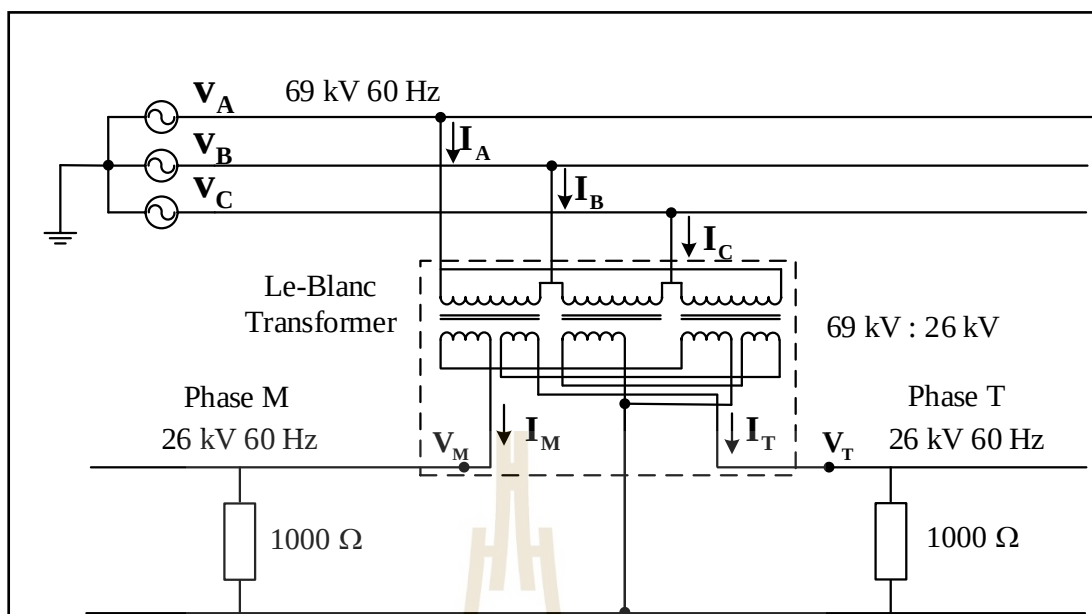
รูปที่ 3.14 ระบบจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส



รูปที่ 3.15 ระบบจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า



รูปที่ 3.16 ระบบจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต

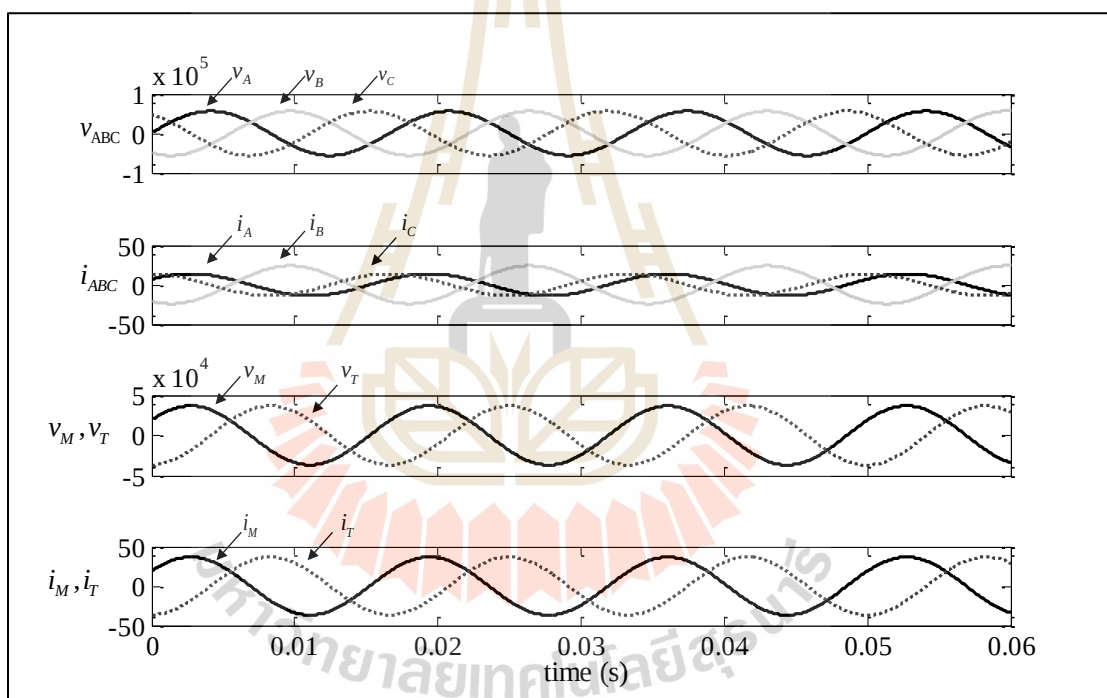


รูปที่ 3.17 ระบบจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์

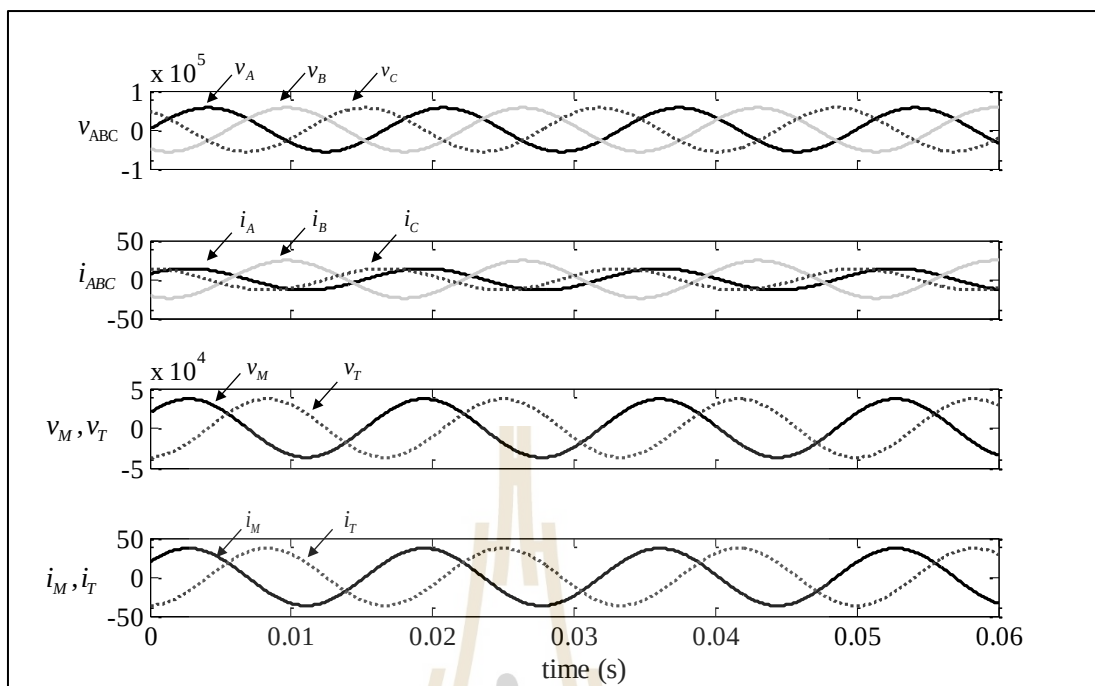
กรณีที่ 1 จ่ายโหลดทั้งเฟส M และเฟส T

ผลการจำลองสถานการณ์การทดสอบจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ ในกรณีการจ่ายโหลดพร้อมกันทั้งเฟส M และเฟส T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.18 ถึง 3.21 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่า เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลเข้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้ทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า มีค่าแรงดันไฟฟ้าเฟส M (V_M) เท่ากับ $36.77 \angle 30^\circ$ kV และเฟส T (V_T) เท่ากับ $36.77 \angle -90^\circ$ kV กรณีของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตจะมีค่า V_M เท่ากับ $36.77 \angle 30^\circ$ kV และ V_T เท่ากับ $36.77 \angle -60^\circ$ kV และกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์จะมีค่า V_M เท่ากับ $36.77 \angle 180^\circ$ kV และ V_T เท่ากับ $36.77 \angle -90^\circ$ kV จากนั้นเมื่อพิจารณาการจ่ายโหลดที่แทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ขนาด 1000 Ω โดยต่อเข้าทั้งเฟส M และเฟส T จะพบว่ากรณีของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้ามีค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิเท่ากัน คือ กระแสเฟส M (I_M) เท่ากับ $36.77 \angle 30^\circ$ A และกระแสเฟส T (I_T) เท่ากับ $36.77 \angle -90^\circ$ A กรณีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตมีค่ากระแส I_M เท่ากับ $36.77 \angle 30^\circ$ A และค่า I_T เท่ากับ $36.77 \angle -60^\circ$ A ส่วนกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ให้ค่ากระแส I_M เท่ากับ $36.77 \angle 180^\circ$ A และค่า I_T เท่ากับ $36.77 \angle -90^\circ$ A นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของกระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าสังเกตได้ว่า ในกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่ง

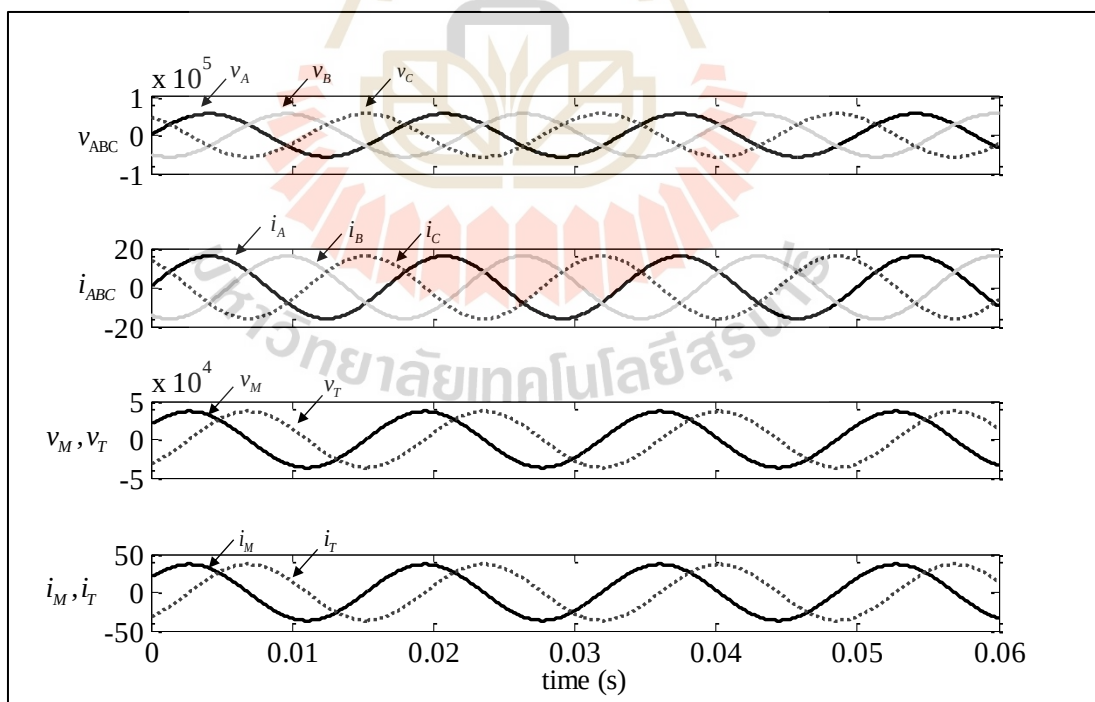
เฟสและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้าจะมีลักษณะกระแสไม่สมดุลเหมือนกัน โดยวัดค่ากระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟส (I_A , I_B , I_C) ได้ค่าเท่ากับ $13.94 \angle 29.8^\circ$ A $24.14 \angle -119.52^\circ$ A และ $13.94 \angle 89.28^\circ$ A ตามลำดับ ส่วนผลการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ จะสังเกตได้ว่า กระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมินั้นมีลักษณะสมดุลทั้งขนาดและมุมเฟส โดยวัดค่า I_A , I_B และ I_C ได้เท่ากันเท่ากับ $16.01 \angle -0.72^\circ$ A $16.01 \angle -119.5^\circ$ A และ $16.01 \angle 119.5^\circ$ A ตามลำดับเฟส จากผลการจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดในกรณีนี้สามารถสรุปเป็นตารางเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภทตามที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.3 โดยสำหรับการเปรียบเทียบค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิสามารถได้จากตารางที่ 3.1 ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิสามารถได้จากตารางที่ 3.2



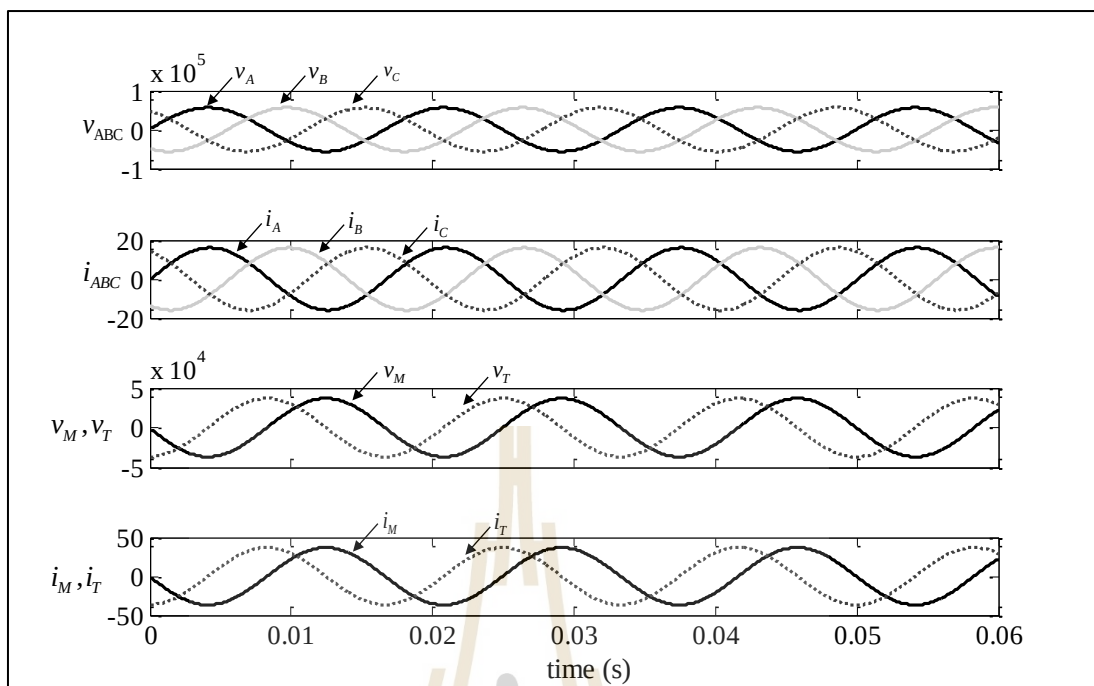
รูปที่ 3.18 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดทั้งสองเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้น
หนึ่งเฟส



รูปที่ 3.19 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดทั้งสองเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า



รูปที่ 3.20 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดทั้งสองเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต



รูปที่ 3.21 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดทั้งสองเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิกรณีการจ่ายโหลดทั้งสองเฟส

แรงดันและ กระแสไฟฟ้า	แรงดันและกระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า							
	หม้อแปลงไฟฟ้า แบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส		หม้อแปลงไฟฟ้า แบบโอเพนเดลต้า		หม้อแปลงไฟฟ้า แบบสก็อต		หม้อแปลงไฟฟ้า แบบเลอว์บลองค์	
	ผลการจำลอง สถานการณ์	ผลการ คำนวณ	ผลการจำลอง สถานการณ์	ผลการ คำนวณ	ผลการจำลอง สถานการณ์	ผลการ คำนวณ	ผลการจำลอง สถานการณ์	ผลการ คำนวณ
V_m	$36770 \angle 29.89^\circ$	$36770 \angle 30^\circ$	$36770 \angle 29.89^\circ$	$36770 \angle 30^\circ$	$36770 \angle 29.89^\circ$	$36770 \angle 30^\circ$	$36770 \angle 179.9^\circ$	$36770 \angle 180^\circ$
V_T	$36770 \angle -90.11^\circ$	$36770 \angle -90^\circ$	$36770 \angle -90.11^\circ$	$36770 \angle -90^\circ$	$36770 \angle -60.11^\circ$	$36770 \angle -60^\circ$	$36770 \angle -90.11^\circ$	$36770 \angle -90^\circ$
I_m	$36.77 \angle 29.89^\circ$	$36.77 \angle 30^\circ$	$36.77 \angle 29.89^\circ$	$36.77 \angle 30^\circ$	$36.77 \angle 29.89^\circ$	$36.77 \angle 30^\circ$	$36.77 \angle 179.9^\circ$	$36.77 \angle 180^\circ$
I_T	$36.77 \angle -90.11^\circ$	$36.77 \angle -90^\circ$	$36.77 \angle -90.11^\circ$	$36.77 \angle -90^\circ$	$36.77 \angle -60.11^\circ$	$36.77 \angle -60^\circ$	$36.77 \angle -90.11^\circ$	$36.77 \angle -90^\circ$

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิกรณีการจ่ายโหลดทั้งสองเฟส

กระแสไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า							
	หม้อแปลงไฟฟ้า แบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส		หม้อแปลงไฟฟ้า แบบโอเพนเดลต้า		หม้อแปลงไฟฟ้า แบบสก็อต		หม้อแปลงไฟฟ้า แบบเลอว์บลองค์	
	ผลการจำลอง สถานการณ์	ผลการ คำนวณ	ผลการจำลอง สถานการณ์	ผลการ คำนวณ	ผลการจำลอง สถานการณ์	ผลการ คำนวณ	ผลการจำลอง สถานการณ์	ผลการ คำนวณ
I_a	$13.94 \angle 29.8^\circ$	$13.85 \angle 30^\circ$	$13.94 \angle 29.8^\circ$	$13.85 \angle 30^\circ$	$16.01 \angle -0.72^\circ$	$16.00 \angle 0^\circ$	$16.01 \angle -0.72^\circ$	$16.00 \angle 0^\circ$
I_b	$24.1 \angle -119.7^\circ$	$24 \angle -120^\circ$	$24.1 \angle -119.7^\circ$	$24 \angle -120^\circ$	$16.01 \angle -119.52^\circ$	$16.00 \angle -120^\circ$	$16.01 \angle -119.52^\circ$	$16.00 \angle -120^\circ$
I_c	$13.94 \angle 89.28^\circ$	$13.85 \angle 90^\circ$	$13.94 \angle 89.28^\circ$	$13.85 \angle 90^\circ$	$16.01 \angle 119.52^\circ$	$16.00 \angle 120^\circ$	$16.01 \angle 119.52^\circ$	$16.00 \angle 120^\circ$
% unbalance	39.23 %	39.23 %	39.23 %	39.23 %	0 %	0 %	0 %	0 %

จากตารางที่ 3.1 เมื่อคำนวณค่าแรงดันและกระแสทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ (3.4) ถึง (3.7) สำหรับกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า ใช้สมการที่ (3.16) ถึง (3.19) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต และใช้สมการที่ (3.26) ถึง (3.29)) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์จะเห็นว่า ขนาดของแรงดันและกระแสทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภทมีค่าเท่ากันส่วนมุมเฟสจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย

จากตารางที่ 3.2 เมื่อทำการคำนวณค่ากระแสทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ (3.8) ถึง (3.10) สำหรับกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้าจะได้ค่ากระแส I_A , I_B และ I_C เท่ากันเท่ากับ $13.85\angle 30^\circ$ A $24\angle -120^\circ$ A และ $13.85\angle 90^\circ$ A ตามลำดับ ส่วนกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตที่คำนวณโดยใช้สมการที่ (3.20) ถึง (3.22) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์ที่คำนวณตามสมการที่ (3.33) ถึง (3.35) จะได้ค่ากระแส I_A , I_B และ I_C เท่ากันเท่ากับ $16.00\angle 0^\circ$ A $16.00\angle -120^\circ$ A และ $16.00\angle 120^\circ$ A ตามลำดับ จากผลการคำนวณดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์พบว่า กระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภทมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภท นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความสมดุลของกระแสฝั่งปฐมภูมิพบว่า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้าจ่ายกระแสที่มีลักษณะไม่สมดุลทั้งขนาดและมุมเฟส แต่สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์ พบว่า การจ่ายกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสมีลักษณะที่สมดุลทั้งขนาดและมุมเฟส โดยเมื่อทำการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่สมดุล (% unbalance) โดยใช้สมการที่ (3.39) จะพบว่า การใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้าจ่ายโหลดทั้งสองเฟสมีค่า % unbalance สูงเท่ากัน คือ 39.23% ส่วนกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์คำนวณค่า % unbalance ได้เท่ากับ 0%

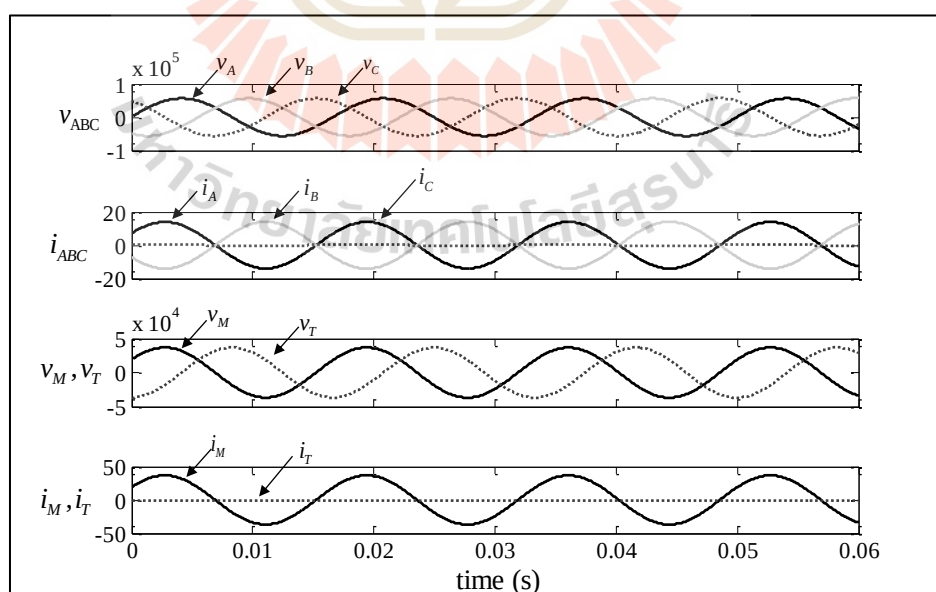
$$\% \text{ unbalance} = \frac{I_{\max} - I_{\text{avg}}}{I_{\text{avg}}} \times 100 \% \quad (3.39)$$

โดยที่ค่า $I_{\max}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าในเฟสที่มีขนาดสูงสุด

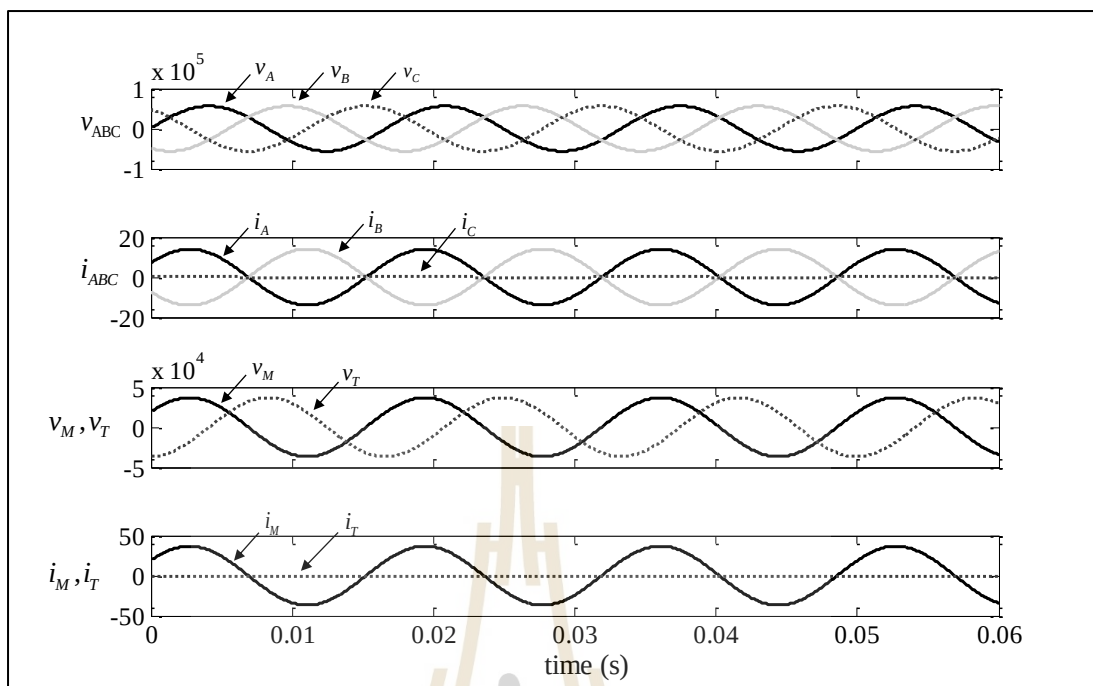
$$I_{\text{avg}} \text{ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยทั้งสามเฟส } \left(I_{\text{avg}} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \right)$$

กรณีที่ 2 จ่ายโหลดเฉพาะเฟส M

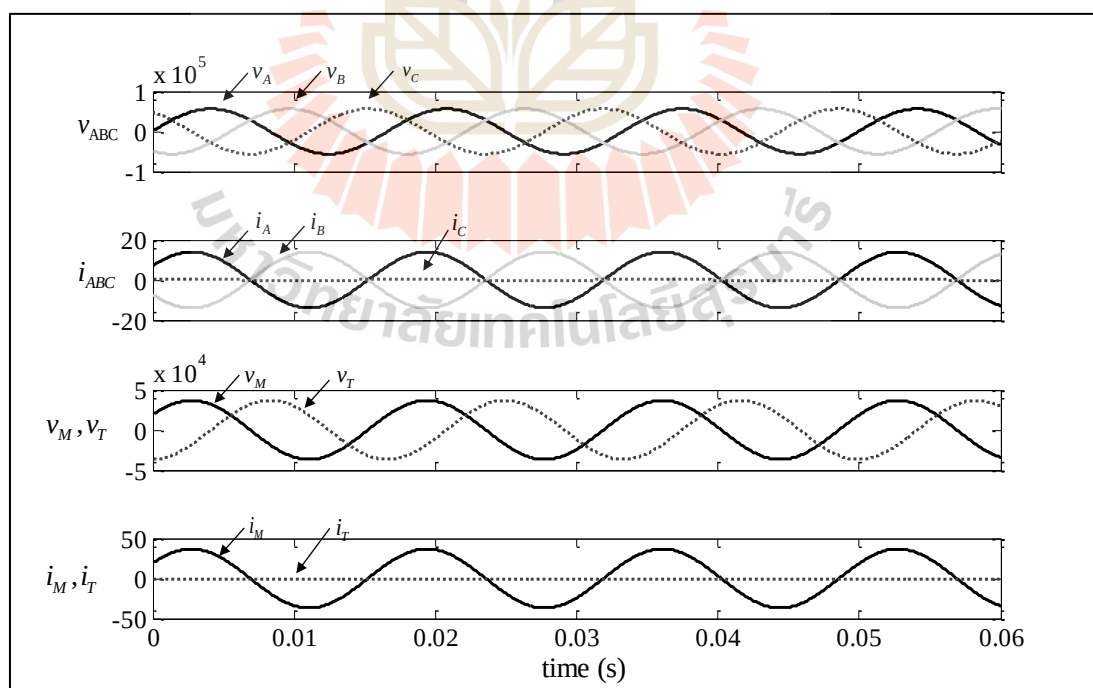
ผลการจำลองสถานการณ์การทดสอบจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรบลองค์ ในกรณีการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M (ปลดโหลดเฟส T) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.22 ถึง 3.25 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวสังเกตได้ว่า เมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลเข้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่า หม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองประเภทมีค่าแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิเหมือนกับกรณีที่ 1 ที่จ่ายโหลดทั้งสองเฟส และมีค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเฉพาะค่ากระแสที่เฟส M (I_M) เท่านั้น โดยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต มีค่ากระแส I_M และ I_T เท่ากับ $36.77 \angle 30^\circ$ A และ 0 A ตามลำดับ ส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรบลองค์กระแส I_M มีค่าเท่ากับ $36.77 \angle 180^\circ$ A และ I_T มีค่าเท่ากับ 0 A ต่อมาเมื่อพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองประเภทจะเห็นว่าหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสองประเภทมีลักษณะเฟสไม่สมดุล โดยวัดค่า I_A , I_B และ I_C ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตได้เท่ากับ $13.94 \angle 29.8^\circ$ A $14.05 \angle 210.24^\circ$ A และ 0 A ตามลำดับเฟส ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรบลองค์วัดค่า I_A , I_B และ I_C ได้เท่ากับ $16.01 \angle 0^\circ$ A $8.08 \angle 180^\circ$ A และ $7.92 \angle 180^\circ$ A ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดในกรณีนี้สามารถสรุปเป็นตารางเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภทได้ดังตารางที่ 3.3 และ 3.4



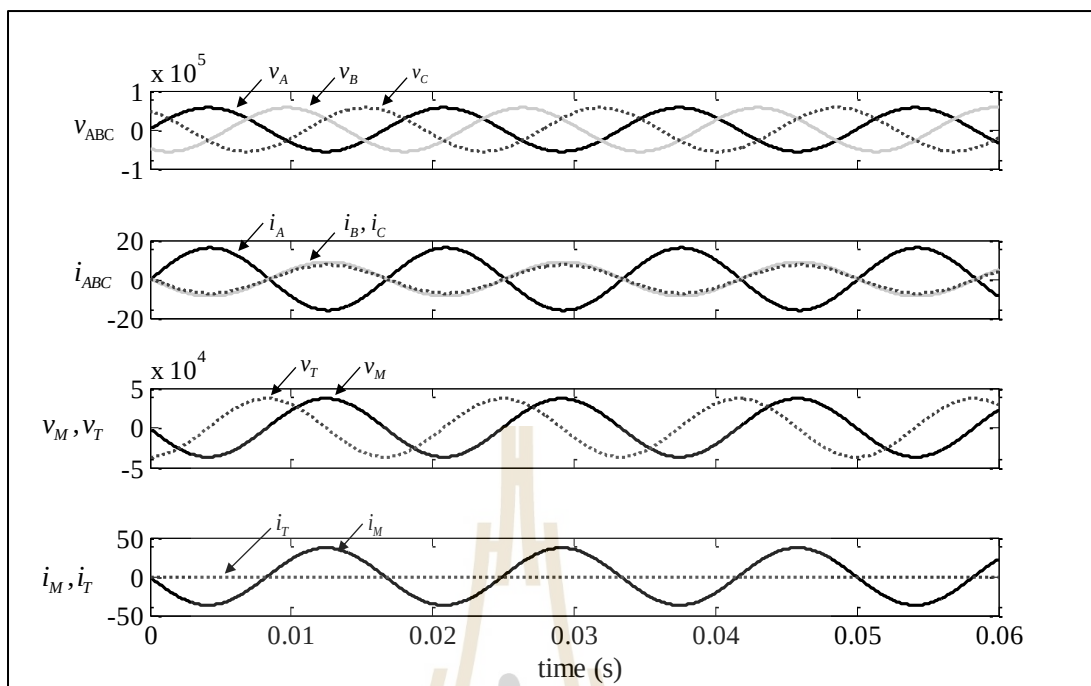
รูปที่ 3.22 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส



รูปที่ 3.23 ผลการจำลองสถานการณ์การกระจายโหลดเฉพาะเฟส M ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า



รูปที่ 3.24 ผลการจำลองสถานการณ์การกระจายโหลดเฉพาะเฟส M ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสตีก๊อต



รูปที่ 3.25 ผลการจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิกรณีการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M

แรงดันและกระแสไฟฟ้า	แรงดันและกระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า							
	หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส		หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า		หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสต็อก		หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์	
	ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการคำนวณ	ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการคำนวณ	ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการคำนวณ	ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการคำนวณ
V_M	$36770 \angle 29.89^\circ$	$36770 \angle 30^\circ$	$36770 \angle 29.89^\circ$	$36770 \angle 30^\circ$	$36770 \angle 29.89^\circ$	$36770 \angle 30^\circ$	$36770 \angle 179.9^\circ$	$36770 \angle 180^\circ$
V_T	$36770 \angle -90.11^\circ$	$36770 \angle -90^\circ$	$36770 \angle -90.11^\circ$	$36770 \angle -90^\circ$	$36770 \angle -60.11^\circ$	$36770 \angle -60^\circ$	$36770 \angle -90.11^\circ$	$36770 \angle -90^\circ$
I_M	$36.77 \angle 29.89^\circ$	$36.77 \angle 30^\circ$	$36.77 \angle 29.89^\circ$	$36.77 \angle 30^\circ$	$36.77 \angle 29.89^\circ$	$36.77 \angle 30^\circ$	$36.77 \angle 179.9^\circ$	$36.77 \angle 180^\circ$
I_T	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิกรณีการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M

กระแสไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า							
	หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส		หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า		หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสต็อก		หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์	
	ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการคำนวณ	ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการคำนวณ	ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการคำนวณ	ผลการจำลองสถานการณ์	ผลการคำนวณ
I_A	$13.94 \angle 29.08^\circ$	$13.85 \angle 30^\circ$	$13.94 \angle 29.8^\circ$	$13.85 \angle 30^\circ$	$13.83 \angle 29.24^\circ$	$13.85 \angle 30^\circ$	$16.01 \angle -0.72^\circ$	$16.00 \angle 0^\circ$
I_B	$14.05 \angle 210.24^\circ$	$13.85 \angle 210^\circ$	$14.05 \angle 210.24^\circ$	$13.85 \angle 210^\circ$	$13.83 \angle 210.12^\circ$	$13.85 \angle 210^\circ$	$8.08 \angle 180^\circ$	$8.00 \angle -120^\circ$
I_C	0	0	0	0	0	0	$7.93 \angle 180^\circ$	$8.00 \angle 120^\circ$
% unbalance	49.98%	50%	49.98%	50%	50%	50%	50%	50%

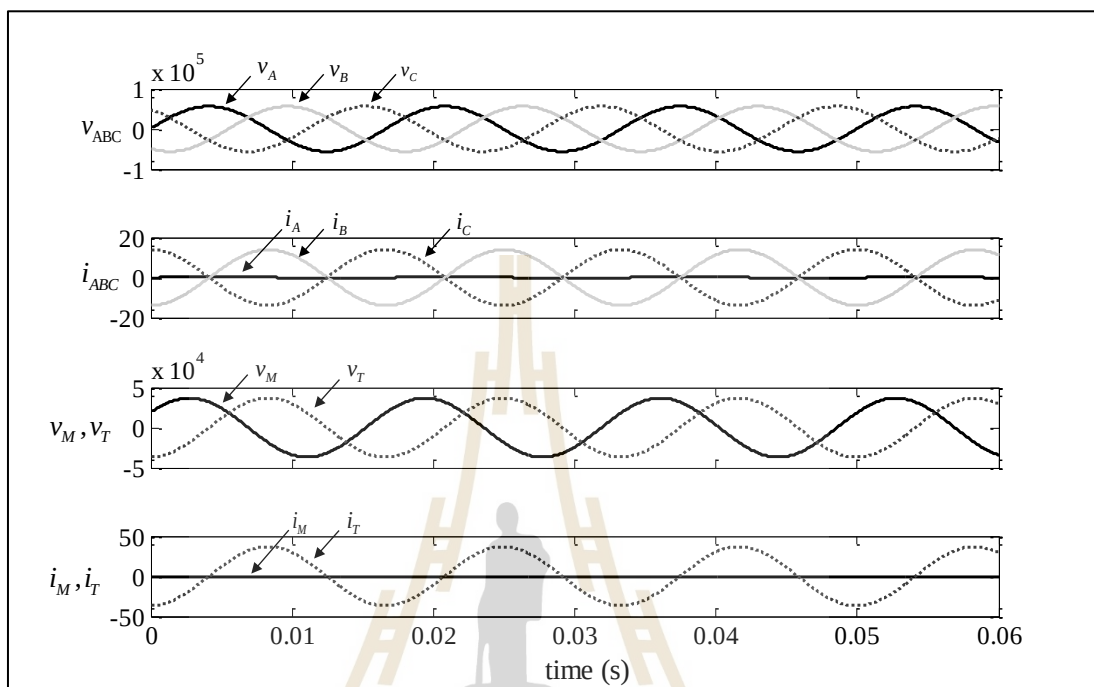
จากตารางที่ 3.3 เมื่อคำนวณค่าแรงดันและกระแสทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้สมการตามประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้าที่วิเคราะห์ได้ในหัวข้อที่ 3.3 จะเห็นว่า ขนาดของแรงดันและกระแสทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภทมีค่าเท่ากับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ส่วนมุมเฟสจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย นอกจากนี้เนื่องจากกรณีนี้มีการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M จึงทำให้ไม่มีค่ากระแสทางฝั่งทุติยภูมิที่เฟส T (I_T เท่ากับ 0 A) ทั้งผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการและผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์

จากตารางที่ 3.4 จะเห็นว่าผลกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตมีค่า I_A I_B และ I_C เท่ากันเท่ากับ $13.85\angle 30^\circ$ A $13.85\angle 210^\circ$ A และ 0 A ตามลำดับ ส่วนกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์สามารถคำนวณค่า I_A I_B และ I_C ได้เท่ากับ $16.00\angle 0^\circ$ A $8.00\angle 180^\circ$ A และ $8.00\angle 180^\circ$ A ตามลำดับ โดยผลจากการเปรียบเทียบค่า I_A I_B และ I_C ที่ได้จากการคำนวณดังกล่าวกับค่าที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ พบว่า ทั้งขนาดและมุมเฟสของกระแสทั้งสามเฟสมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสมดุลของกระแสไฟฟ้าในกรณีจ่ายโหลดเฉพาะเฟส M พบว่า หม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสี่ประเภทมีค่า % unbalance ที่สูงประมาณเท่ากับ 50.00% เหมือนกัน

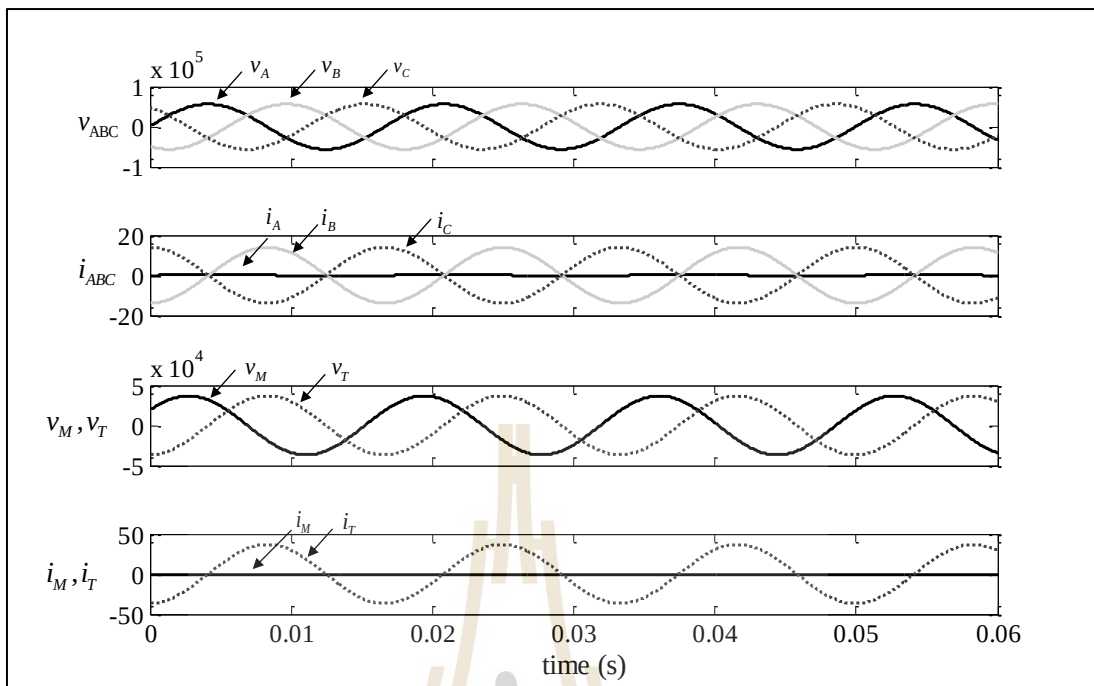
กรณีที่ 3 จ่ายโหลดเฉพาะเฟส T

ผลการจำลองสถานการณ์การทดสอบจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ ในกรณีการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส T (ปลดโหลดเฟส M) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.26 ถึง 3.29 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว จะเห็นว่า เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมดุลเข้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสี่ประเภท จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิเช่นเดียวกันกับกรณีการจ่ายโหลดพร้อมกันทั้งสองเฟส ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีนี้จะมีเพียงค่า I_T เท่านั้น นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์จะสังเกตได้ว่ามีลักษณะไม่สมดุล โดยวัดค่า I_A I_B และ I_C ได้เท่ากับ 0 A $13.91\angle -91.44^\circ$ A และ $13.94\angle 89.28^\circ$ A ตามลำดับ ส่วนกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตวัดค่า I_A I_B และ I_C ได้เท่ากับ $8.02\angle -61.44^\circ$ A $8.00\angle -61.44^\circ$ A และ $16.01\angle 119.54^\circ$ A ตามลำดับ ซึ่งค่าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางฝั่งทุติยภูมิและปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสี่ประเภทที่วัดได้สามารถเขียนสรุปเป็นตารางเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการจากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ผ่านมาแสดงได้ดังตารางที่ 3.5 และ 3.6 (ใช้สมการที่ (3.4) ถึง (3.10) สำหรับกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า ใช้สมการที่ (3.14)

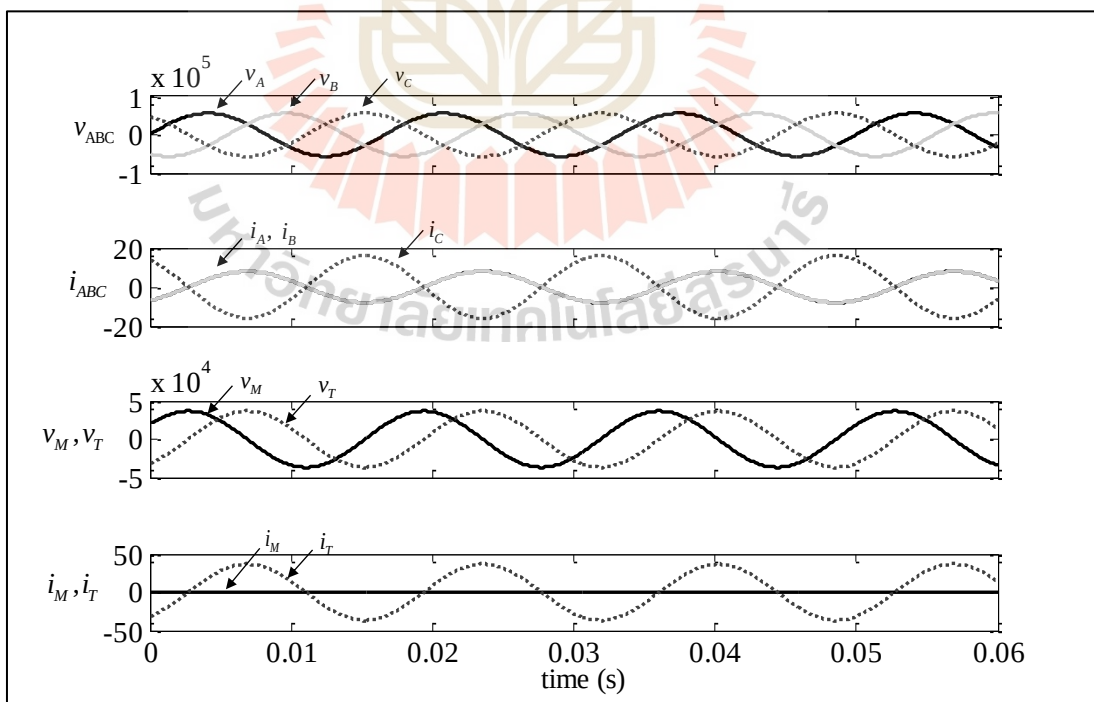
ถึง (3.22) สำหรับกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต และใช้สมการที่ (3.26) ถึง (3.35) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอร็บลองค์)



รูปที่ 3.26 ผลการจำลองสถานการณ์การจ่ายโหลดเฉพาะเฟส T ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส



รูปที่ 3.27 ผลการจำลองสถานการณ์การกระจายโหลดเฉพาะเฟส T ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า



รูปที่ 3.28 ผลการจำลองสถานการณ์การกระจายโหลดเฉพาะเฟส T ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสตาร์

จากตารางที่ 3.5 เมื่อคำนวณค่าแรงดันและกระแสทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้สมการตามประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้าที่วิเคราะห์ได้ในหัวข้อที่ 3.3 จะเห็นว่า ขนาดของแรงดันและกระแสทางฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภทมีค่าเท่ากันส่วนมุมเฟสจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย นอกจากนี้เนื่องจากกรณีนี้มีการจ่ายโหลดเฉพาะเฟส T จึงทำให้ไม่มีค่ากระแสทางฝั่งทุติยภูมิที่เฟส M (I_M เท่ากับ 0 A) ทั้งผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ และผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์

จากตารางที่ 3.6 จะเห็นว่าผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอร็บบล็อก มีค่ากระแส I_A , I_B และ I_C เท่ากันเท่ากับ 0 A $13.85\angle -90^\circ$ A และ $13.85\angle 90^\circ$ A ตามลำดับ ส่วนกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตสามารถคำนวณค่ากระแส I_A , I_B และ I_C ได้เท่ากับ $8\angle -60^\circ$ A $8\angle -60^\circ$ A และ $16.00\angle 120^\circ$ A ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ จะพบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณมีขนาดและมุมเฟสใกล้เคียงกันตามแต่ละประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้า และนอกจากนี้เมื่อคำนวณค่า % unbalance จะได้ค่าเท่ากันเท่ากับ 50 % ทุกกรณีของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากผลการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสี่ประเภทที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ได้จากการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้า พบว่า กรณีที่จ่ายโหลดทั้งเฟส M และเฟส T เท่ากันทั้งสองเฟส กระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอร็บบล็อกมีลักษณะสมดุล ในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้าให้ค่ากระแสที่มีลักษณะไม่สมดุลทั้งขนาดและมุมเฟส ส่วนกรณีที่จ่ายโหลดเฉพาะเฟส M หรือเฟส T เฟสใดเฟสหนึ่ง จะพบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสี่ประเภทเกิดปัญหาไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าขึ้นทางฝั่งปฐมภูมิเช่นเดียวกัน

การเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสี่ประเภทที่ได้จากการวิเคราะห์ และที่ได้จากการค้นคว้าข้อมูลเพิ่มเติมจากปริทัศน์วรรณกรรม (Bin-Kwie C. and Bing-somg G., 1996, Zhiwen Z. and et al., 2009, Fini F. and Karthikeyan S. P., 2016) ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวม

หัวข้อในการเปรียบเทียบ	ประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้า			
	หม้อแปลงไฟฟ้า แบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส	หม้อแปลงไฟฟ้า แบบโอเพนเดลต้า	หม้อแปลงไฟฟ้า แบบสก็อต	หม้อแปลงไฟฟ้า แบบเลอว์บลองค์
1. พิกัดใช้งานฝั่งปฐมภูมิ	66 kV - 154 kV	66 kV - 154 kV	66 kV - 154 kV	66 kV - 154 kV
2. ความซับซ้อนของโครงสร้าง	ไม่ซับซ้อน	ไม่ซับซ้อน	ซับซ้อนปานกลาง	ซับซ้อนมาก
3. ปัญหากระแสไฟฟ้าไม่สมดุล	มาก	มาก	น้อย	น้อย
4. ขนาดของขดลวดฝั่งปฐมภูมิ	ปานกลาง	ปานกลาง	ใหญ่	เล็ก
5. ราคา	ต่ำ	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

จากตารางที่ 3.7 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ร่วมกับระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวม พบว่า หม้อแปลงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท มีพิกัดใช้งานฝั่งปฐมภูมิเท่ากัน คือ 66-154 kV เมื่อพิจารณาความซับซ้อนของโครงสร้างจะสังเกตได้ว่า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์มีความซับซ้อนมากที่สุด รองลงมา คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตที่มีความซับซ้อนปานกลาง ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า มีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน และเมื่อพิจารณาผลของปัญหากระแสไฟฟ้าไม่สมดุลที่เกิดขึ้น พบว่า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ทำให้เกิดปัญหากระแสไฟฟ้าไม่สมดุลน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า ต่อมาเมื่อพิจารณาขนาดขดลวดฝั่งปฐมภูมิ พบว่า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตมีขนาดใหญ่ที่สุดเนื่องจาก การสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตมีขั้นตอนการแท็ป (Tap) หม้อแปลงที่จุดกึ่งกลางของขดลวด (T-H. Chen, 1994) ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวส่งผลให้ขดลวดฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตมีขนาดใหญ่กว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ นอกจากนี้ เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบรางไฟฟ้ามีพิกัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงส่งผลให้ราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีราคาสูงขึ้นตามขนาดขดลวดที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภทด้วยเช่นกัน

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ และการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวม 4 ประเภท ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ โดยผลการวิเคราะห์การจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสี่ประเภท พบว่า มีความถูกต้องเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละประเภทโดยใช้ผลการจำลองสถานการณ์ทดสอบการจ่ายโหลดในลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่า ระบบส่งจ่าย

กำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ เกิดปัญหากระแสไฟฟ้าไม่สมดุลน้อยกว่าระบบที่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในเรื่องของต้นทุนราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าร่วมด้วย จะเห็นว่า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์มีราคาต่ำกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต อีกทั้งหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ยังเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบรางไฟฟ้าของประเทศไต้หวัน ซึ่งเป็นระบบรางไฟฟ้าที่จะนำมาใช้อ้างอิงสำหรับพิจารณากำจัดฮาร์มอนิก ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์สำหรับใช้เป็นระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าในบทต่อไป



บทที่ 4

การตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบแรง ไฟฟ้า

4.1 บทนำ

การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานจำเป็นต้องมีการตรวจจับฮาร์มอนิก เพื่อใช้คำนวณค่ากระแสอ้างอิงในการชดเชยให้กับวงจรรอกำลังแอกทีฟ โดยในบทนี้จะนำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (instantaneous reactive power: PQ) และวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (synchronous reference frame: SRF) เนื่องจากทั้งสองวิธีมีสมรรถนะที่ดีสามารถคำนวณค่ากระแสอ้างอิงได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งค่ากระแสอ้างอิงดังกล่าวสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบไฟฟ้าได้อีกด้วย สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะประกอบด้วย การอธิบายขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ วิธี SRF และการเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างวิธี PQ และวิธี SRF เพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ต่อไป

4.2 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งหรือวิธี PQ สำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้ถูกนำเสนอโดย Khadkikar และคณะ ในปี 2009 เดิมทีวิธีดังกล่าวถูกคิดขึ้นเพื่อใช้ในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่นำเสนอโดย Akagi และคณะ ในปี 1983 โดยการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ สำหรับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสจะใช้การกำหนดแรงดันและกระแสไฟฟ้าบนแกนแอลฟาเบต้า ($\alpha\beta$) จากนั้นจะดำเนินการคำนวณค่ากำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งและค่ากำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งตามวิธีการของวิธี PQ ระบบสามเฟสปกติเพื่อนำไปคำนวณค่ากระแสชดเชยอ้างอิงต่อไป

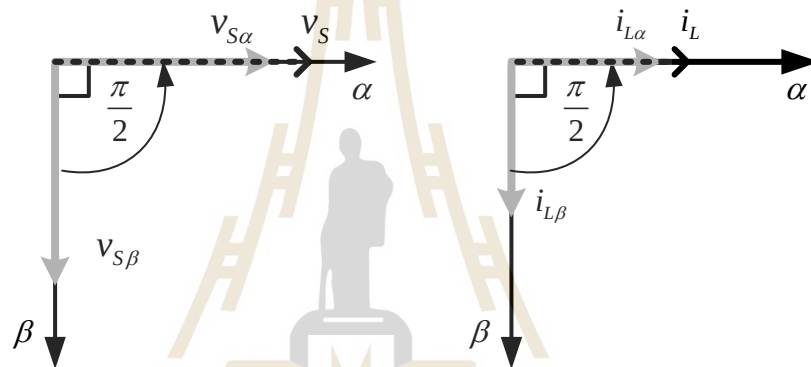
การประยุกต์ใช้วิธี PQ สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าหนึ่งเฟส เพื่อคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน มีรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณ 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการแปลงปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอร်บลองค์ (v_s) ซึ่งเป็นจุดที่พิจารณาการกำจัดฮาร์มอนิก และปริมาณกระแสที่โหลด (i_L) บนแกนเฟสเป็นปริมาณบนแกน $\alpha\beta$ โดยใช้สมการที่ (4.1) และ (4.2) ตามลำดับ โดยที่ปริมาณบนแกน α ($v_{s\alpha}, i_{L\alpha}$) จะมีขนาด

และมุมเฟสเท่ากับปริมาณบนแกนเฟสทุกประการ ส่วนในกรณีปริมาณบนแกน β ($v_{s\beta}, i_{L\beta}$) จะมีขนาดเท่ากับปริมาณบนแกนเฟสเช่นกันแต่จะมีมุมเฟสตามหลังเท่ากับ $\pi/2$ เรเดียนหรือ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.1

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha}(\omega t) \\ v_{s\beta}(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_s(\omega t) \\ v_s(\omega t - (\pi/2)) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha}(\omega t) \\ i_{L\beta}(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(\omega t) \\ i_L(\omega t - (\pi/2)) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่งทีโหลด (p_L) และค่ากำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งทีโหลด (q_L) โดยใช้สมการที่ (4.3)

$$\begin{bmatrix} p_L(\omega t) \\ q_L(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha}(\omega t) & v_{s\beta}(\omega t) \\ -v_{s\beta}(\omega t) & v_{s\alpha}(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha}(\omega t) \\ i_{L\beta}(\omega t) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

โดยที่ (p_L, q_L) จะประกอบด้วย องค์ประกอบที่เป็นสัญญาณกระแสตรง ($\bar{p}_L, \bar{q}_L$) ที่บ่งบอกถึงปริมาณมูลฐาน และองค์ประกอบที่เป็นสัญญาณกระแสสลับ ($\tilde{p}_L, \tilde{q}_L$) ที่บ่งบอกถึงปริมาณฮาร์มอนิก ดังแสดงในสมการที่ (4.4) และ (4.5) ตามลำดับ

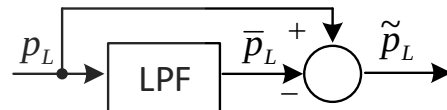
$$p_L(\omega t) = \bar{p}_L(\omega t) + \tilde{p}_L(\omega t) \quad (4.4)$$

$$q_L(\omega t) = \bar{q}_L(\omega t) + \tilde{q}_L(\omega t) \quad (4.5)$$

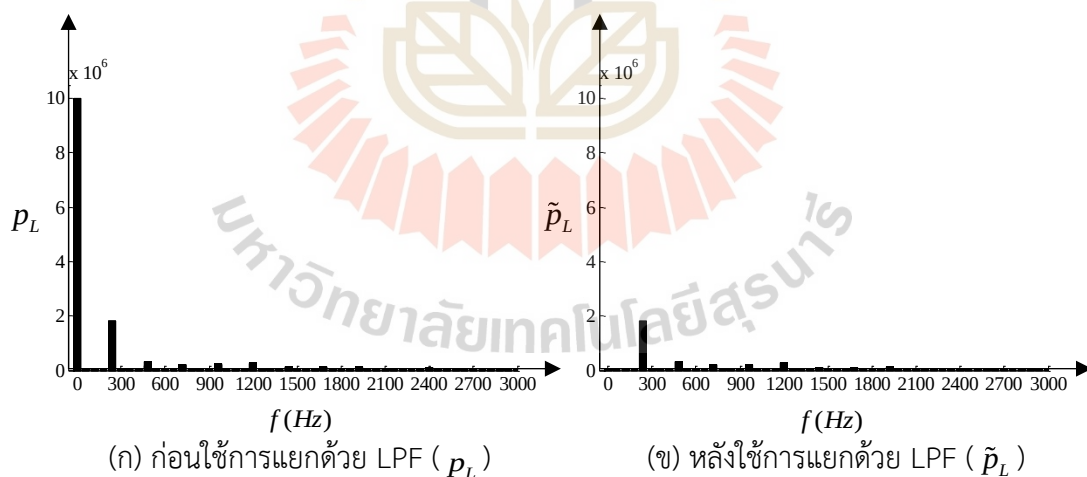
ขั้นตอนที่ 3 ใช้วงจรกรอง (Filter) แยกค่ากำลังแอกทีฟที่เป็นปริมาณฮาร์มอนิก ($\tilde{p}_L$) ออกจากปริมาณมูลฐาน ($\bar{p}_L$) ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้วงจรกรองผ่านสูง (High pass filter: HPF) หรือใช้วงจรกรองผ่านต่ำ (Low pass filter: LPF) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากการศึกษางานวิจัยในอดีต (ทศพร ณรงค์ฤทธิ์, 2552, บทที่ 4) พบว่า ภายหลังจากการจัดฮาร์มอนิกสัญญาณกระแสไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายกรณีที่ใช้วงจรกรองผ่านต่ำในการแยกปริมาณฮาร์มอนิกมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก (% THD_i) ที่น้อยกว่า รวมถึงใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่น้อยกว่ากรณีที่ใช้วงจรกรองผ่านสูง ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วงจรกรองผ่านต่ำ เนื่องจากต้องการแยกปริมาณที่เป็นกำลังแอกทีฟฮาร์มอนิกออกโดยไม่ให้ส่งผลกระทบต่อปริมาณที่เป็นกำลังแอกทีฟมูลฐาน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป 4.4 (ก) และ (ข)



รูปที่ 4.2 การแยกปริมาณ $\tilde{p}_L$ ด้วย HPF



รูปที่ 4.3 การแยกปริมาณ $\tilde{p}_L$ ด้วย LPF



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของค่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta$ (i_{Ca} , i_{Cb}) โดยใช้สมการที่ (4.6)

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha}(\omega t) \\ i_{C\beta}(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha}(\omega t) & v_{s\beta}(\omega t) \\ -v_{s\beta}(\omega t) & v_{s\alpha}(\omega t) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} p_L^*(\omega t) \\ q_L^*(\omega t) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

สำหรับค่า p_L^* และ q_L^* คือ ค่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่งและค่ากำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งอ้างอิง ซึ่งจะพิจารณาเลือกใช้ตามเงื่อนไขที่ต้องการชดเชย โดยมีทั้งหมด 3 เงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 4.1 (Peng, Ott, and Atlams, 1998) ดังนี้

ตารางที่ 4.1 การระบุค่า p_L^* และ q_L^* ตามเงื่อนไขที่ต้องการชดเชย

เงื่อนไขที่ต้องการชดเชย	การระบุค่ากำลังแอกทีฟขณะหนึ่ง และกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งอ้างอิง	
	p_L^*	q_L^*
ชดเชยกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	0	q_L
กำจัดกระแสฮาร์มอนิก	$\tilde{p}_L$	$\tilde{q}_L$
กำจัดกระแสฮาร์มอนิกและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	$\tilde{p}_L$	q_L

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ที่ต้องการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกและชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบ จึงเลือกใช้ค่า p_L^* เท่ากับ $\tilde{p}_L$ และ q_L^* เท่ากับ q_L ซึ่งสามารถเขียนสมการที่ (4.6) ใหม่ ได้ดังสมการที่ (4.7) ดังนี้

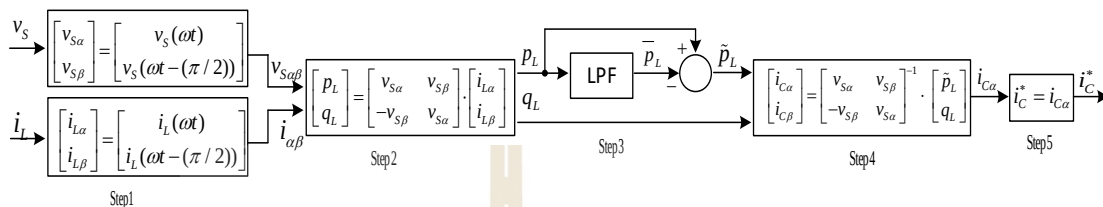
$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha}(\omega t) \\ i_{C\beta}(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha}(\omega t) & v_{s\beta}(\omega t) \\ -v_{s\beta}(\omega t) & v_{s\alpha}(\omega t) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p}_L(\omega t) \\ q_L(\omega t) \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดให้กระแสอ้างอิงบนแกนเฟส (i_C^*) มีค่าเท่ากับกระแสอ้างอิงบนแกน α ($i_{C\alpha}$) ดังสมการที่ (4.8) โดยกระแสดังกล่าวจะถูกใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับฉีดกระแสชดเชยฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า นอกจากนี้ สำหรับการกำหนดค่ากระแสอ้างอิงบนแกนเฟสนั้นสามารถกำหนดโดยใช้กระแสอ้างอิงบนแกน β ($i_{C\beta}$) ได้เช่นกัน ซึ่งการใช้กระแสอ้างอิงบนแกน β ทำได้โดยการเลื่อนมุมเฟสของค่า $i_{C\beta}$ กลับมาเท่ากับ $\pi/2$ เรเดียนหรือ 90 องศาได้ดังสมการที่ (4.9)

$$i_C^*(\omega t) = i_{C\alpha}(\omega t) \quad (4.8)$$

$$i_C^* = i_{C\beta}((\omega t) + (\pi / 2)) \quad (4.9)$$

จากขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ที่กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้น สามารถสรุปเป็นแผนภาพแสดงการคำนวณ ได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ

การทดสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ จะใช้การจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าบนโปรแกรม Simulink/MATLAB ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผลในจะนำเสนอในหัวข้อที่ 4.3

4.3 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัสหรือวิธี SRF ในอดีตนั้นจะถูกใช้กับระบบไฟฟ้าสามเฟสนำเสนอโดย Tekenda และคณะในปี 1988 โดยอาศัยสมการของคลาร์ก (Clarke's Transformer) ในการแปลงปริมาณกระแสบนแกนเฟสให้ไปอยู่บนแกน $\alpha\beta$ ต่อมาได้มีการปรับใช้วิธี SRF สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟส (Bruno, Leonardo and Sergio, 2014) ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะใช้วิธีการแปลงแกนด้วยการกำหนดค่าปริมาณบนแกน α เท่ากับปริมาณบนแกนเฟส และทำการเลื่อนมุมเฟสของปริมาณบนแกน β ออกไป $\pi/2$ เรเดียน เพื่อกำหนดให้เป็นปริมาณบนแกน β จากนั้นจึงนำค่ากระแสบนแกน $\alpha\beta$ ที่ได้ไปสู่กระบวนการคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงตามวิธี SRF ต่อไป

การประยุกต์ใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF เพื่อใช้คำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานในระบบแรงไฟฟ้ามีทั้งหมด 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 แปลงค่ากระแสที่โหลด (i_L) บนแกนเฟส เป็นค่ากระแสบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$) โดยใช้สมการที่ (4.2) (เช่นเดียวกับวิธี PQ)

ขั้นตอนที่ 2 แปลงค่ากระแสที่โหลดบนแกน $\alpha\beta$ ไปอยู่บนแกนหมุน dq (i_{Ld}, i_{Lq}) โดยใช้สมการที่ (4.10) โดยค่า $\sin(\omega t)$ และ $\cos(\omega t)$ ได้จากการคำนวณโดยใช้เทคนิคเฟสล็อกคลูป

(Phase-locked loop: PLL) ที่กำหนดให้หมุนด้วยมุมของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่จุดที่พิจารณา
 กำจัดฮาร์มอนิก (v_s) จากสมการที่ (4.10) ค่า (i_{Ld}, i_{Lq}) ประกอบไปด้วยสองส่วน คือ องค์ประกอบที่
 เป็นสัญญาณกระแสตรง ($\bar{i}_{Ld}, \bar{i}_{Lq}$) ที่บ่งบอกถึงปริมาณมูลฐาน และองค์ประกอบสัญญาณกระแสลับ
 ที่บ่งบอกถึงปริมาณฮาร์มอนิก ($\tilde{i}_{Ld}, \tilde{i}_{Lq}$) ดังแสดงในสมการที่ (4.10) และ (4.11) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} i_{Ld}(\omega t) \\ i_{Lq}(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha}(\omega t) \\ i_{L\beta}(\omega t) \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$i_{Ld}(\omega t) = \bar{i}_{Ld}(\omega t) + \tilde{i}_{Ld}(\omega t) \quad (4.11)$$

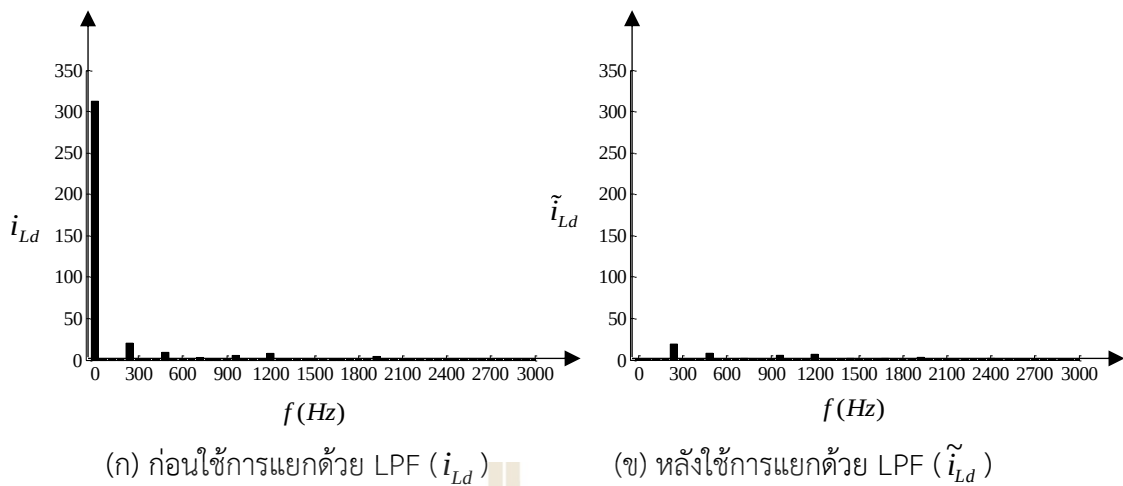
$$i_{Lq}(\omega t) = \bar{i}_{Lq}(\omega t) + \tilde{i}_{Lq}(\omega t) \quad (4.12)$$

ขั้นตอนที่ 3 แยกปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่อยู่บนแกนดี ($\tilde{i}_{Ld}$) ออกจากปริมาณกระแส
 มูลฐาน ($\bar{i}_{Ld}$) โดยใช้วงจรกรอง ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งวงจรกรองผ่านสูงหรือใช้วงจรกรองผ่านต่ำดัง
 แสดงในรูปที่ (4.6) และ (4.7) จากการศึกษางานวิจัยในอดีต (พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์, 2554) พบว่า
 กรณีการใช้วงจรกรองผ่านต่ำในขั้นตอนการแยกปริมาณฮาร์มอนิกสามารถให้สมรรถนะการกำจัดฮาร์
 มอนิกที่ดีกว่ากรณีการใช้วงจรกรองผ่านสูง (ค่า %THD_i ภายหลังการชดเชยมีค่าน้อยกว่าที่กรณีการใช้
 วงจรกรองผ่านสูง) ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วงจรกรองผ่านต่ำ เพื่อแยกปริมาณกระแสมูล
 ฐานออกจากปริมาณกระแสฮาร์มอนิกแสดงได้ดังรูป 4.8 (ก) และ (ข)



รูปที่ 4.6 การแยกปริมาณ $\tilde{i}_{Ld}$ ด้วย HPF

รูปที่ 4.7 การแยกปริมาณ $\tilde{i}_{Ld}$ ด้วย LPF



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของค่ากระแสบนแกนดี

ขั้นตอนที่ 4 แปลงค่ากระแสบนแกนดีคิว ($\tilde{i}_{Ld}, i_{Lq}$) ให้ไปอยู่บนแกน $\alpha\beta$ โดยใช้สมการที่ (4.13)

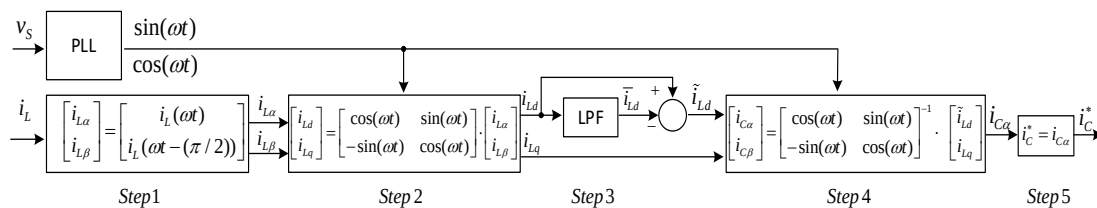
$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha}(\omega t) \\ i_{C\beta}(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{i}_{Ld}(\omega t) \\ i_{Lq}(\omega t) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดค่ากระแสอ้างอิงบนแกนเฟส (i_C^*) สำหรับใช้เป็นกระแสอ้างอิงสำหรับ วงจรกรองกำลังแยกทีฟแบบขนาน ซึ่งสามารถทำได้โดย การกำหนดค่า i_C^* เท่ากับกระแสอ้างอิงบน แกน α ($i_{C\alpha}$) ดังแสดงในสมการที่ (4.14) หรือการกำหนดค่า i_C^* เท่ากับ ค่ากระแสอ้างอิงบนแกน β ($i_{C\beta}$) ที่มีการเลื่อนมุมเฟสกลับมาเท่ากับ $\pi/2$ เรเดียนหรือ 90 ดังแสดงในสมการที่ (4.15)

$$i_C^*(\omega t) = i_{C\alpha}(\omega t) \quad (4.14)$$

$$i_C^*(\omega t) = i_{C\beta}((\omega t) + (\pi / 2)) \quad (4.15)$$

จากขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ทั้ง 5 ขั้นตอนในข้างต้นสามารถสรุปเป็น แผนภาพแสดงการคำนวณได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผนภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF

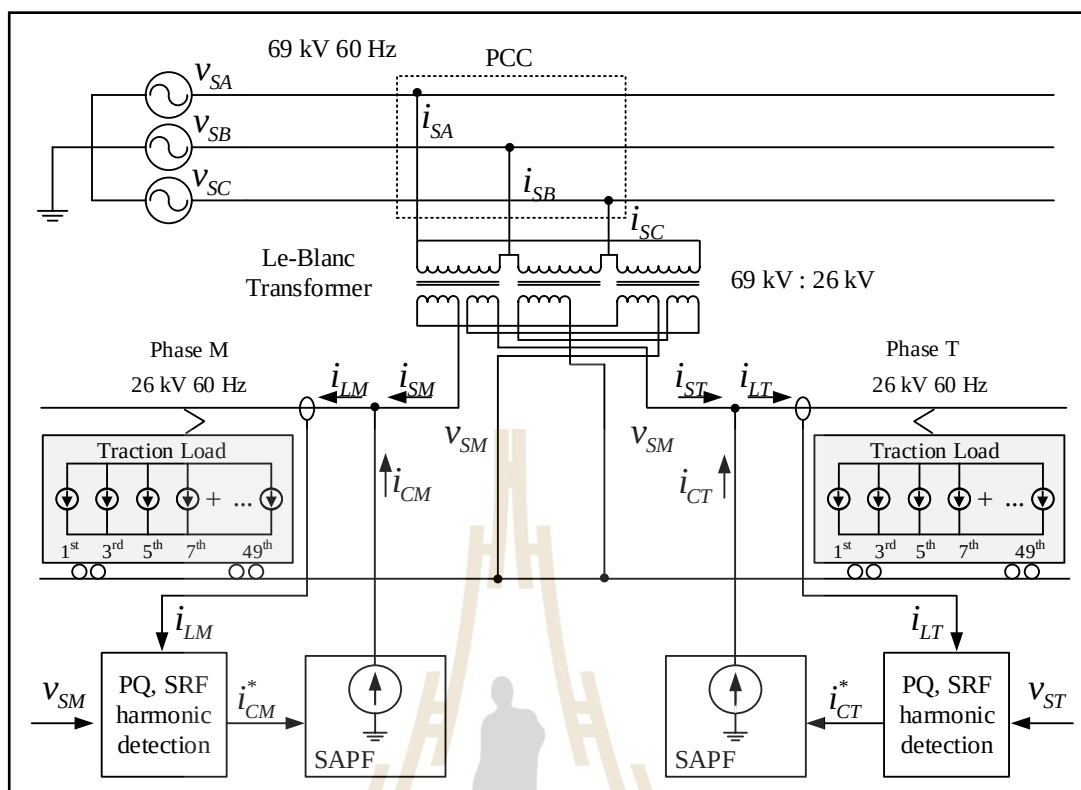
สำหรับการทดสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF จะนำเสนอผลการทดสอบในหัวข้อถัดไป โดยที่ขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF นี้จะถูกนำไปเขียนบนโปรแกรม Simulink/MATLAB ซึ่งจะอยู่ในส่วนที่ 2 ของระบบจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าของหัวข้อที่ 4.4

4.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SRF

ระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้พิจารณาเพื่อทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างวิธี PQ และวิธี SRF แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งระบบประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ

ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้าแบบเฟสรวม โดยเริ่มต้นจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยที่รับไฟฟ้าแรงดันสูงในระบบสามเฟสที่พิกัด 69 kV ความถี่ 60 Hz ต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลองค์เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นระบบไฟฟ้าสองเฟส (เฟส M และ เฟส T) ที่พิกัด 26 kV ความถี่ 60 Hz ซึ่งแต่ละเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าจะต่อเข้ากับโหลดแรงไฟฟ้าซึ่งแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสที่เป็นองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบแรงไฟฟ้าของประเทศไทย (Sy-Ruen and Bing-Nan, 2002)

ส่วนที่ 2 บล็อกการตรวจจับฮาร์มอนิก (harmonic detection) โดยในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกระหว่างการใช่วิธี PQ และวิธี SRF สำหรับคำนวณค่ากระแสอ้างอิงในการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน โดยทั้งสองวิธีกำหนดเลือกใช้วงจรกรองผ่านต่ำอันดับ 3 และมีค่าความถี่ตัดเท่ากับ 30 Hz เหมือนกันเพื่อแยกปริมาณฮาร์มอนิกออก ในขั้นตอนที่ 3 ของวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.10 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการตรวจสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก

ส่วนที่ 3 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) ที่แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าในทางอุดมคติ สำหรับใช้ทดสอบสมรรถนะของการตรวจจับฮาร์มอนิก เนื่องจากวงจร SAPF ดังกล่าวสามารถฉีดกระแสชดเชยได้อย่างสมบูรณ์ โดยกระแสชดเชยที่ฉีดโดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าทางอุดมคติจะมีลักษณะรูปสัญญาณเหมือนกับกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SRF ทุกประการ

การเปรียบเทียบการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SRF ในที่นี้ จะทดสอบสมรรถนะการตรวจจับในสองกรณีของลักษณะแรงดันที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้า คือ กรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นคลื่นรูปไซน์บริสุทธิ์ และกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีความเพี้ยนฮาร์มอนิกปะปน โดยการเปรียบเทียบจะใช้ค่า %THD_i ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (4.16) และค่าตัวประกอบกำลังภายหลังการชดเชย ซึ่งจะพิจารณาทั้งค่าตัวประกอบกำลังการกระจัด (displacement power factor: pf_{disp}) ดังสมการที่ (4.17) ค่าตัวประกอบกำลังความเพี้ยน (distortion power factor: pf_{dist}) ดังสมการที่ (4.18) และค่าตัวประกอบกำลัง (power factor: pf) ที่เป็นผลคูณของค่าตัวประกอบกำลังทั้งสองดังสมการที่ (4.19) เป็นค่าดัชนีชี้วัดผลสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกของทั้งสองวิธี

$$\%THD_i = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \times 100\% \quad (4.16)$$

$$pf_{disp} = \frac{P}{S_1} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt}{V_{rms,1} \cdot I_{rms,1}} \quad (4.17)$$

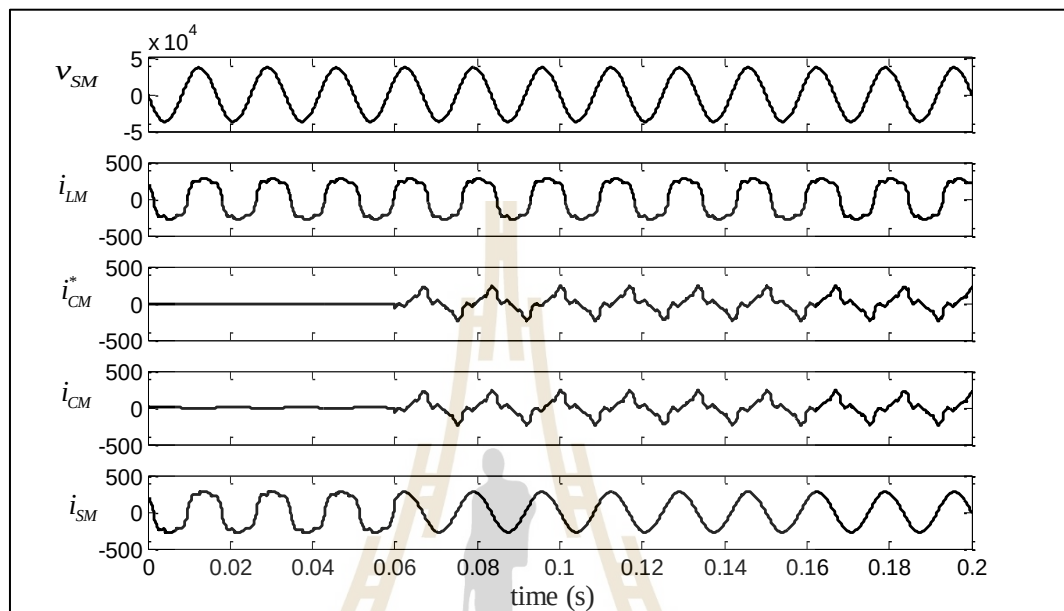
$$pf_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2} \cdot \sqrt{1+THD_i^2}} = \frac{V_{rms,1} \cdot I_{rms,1}}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \quad (4.18)$$

$$pf = pf_{disp} \times pf_{dist} \quad (4.19)$$

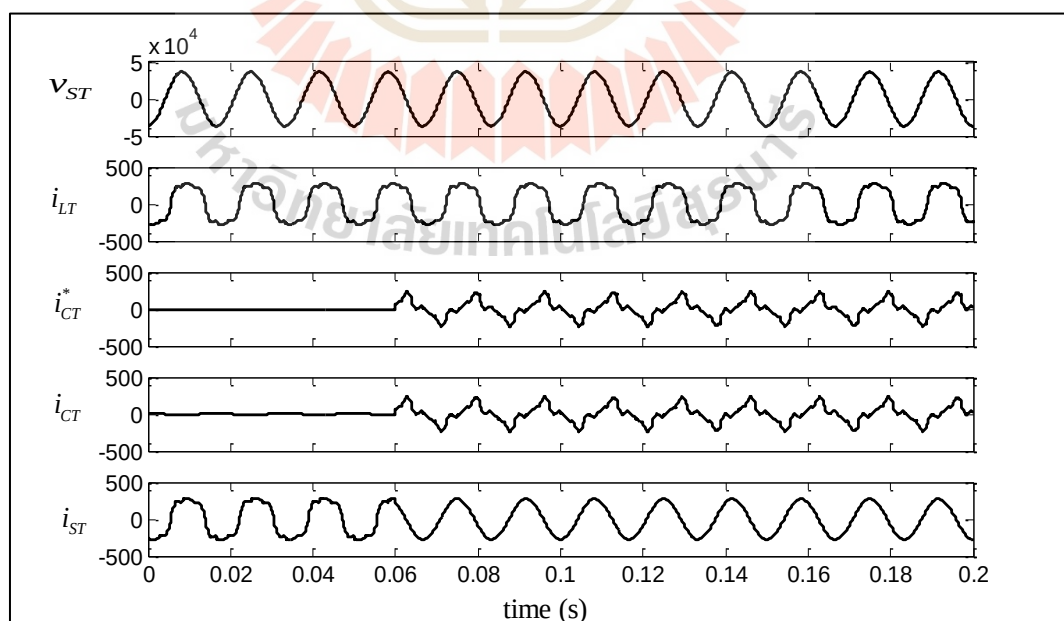
กรณีที่ 1 แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นคลื่นรูปไซน์บริสุทธิ์

กรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นคลื่นรูปไซน์บริสุทธิ์ หมายถึง กรณีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟส (v_{SA}, v_{SB}, v_{SC}) ไม่มีปริมาณฮาร์มอนิกปะปนโดยค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก ($\%THD_v$) จะมีค่าเท่ากับ 0 % ผลการจำลองสถานการณ์การตรวจจับฮาร์มอนิกของระบบรางไฟฟ้าทั้งสองเฟส (เฟส M และเฟส T) ในรูปที่ 4.8 ในกรณีของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่แหล่งจ่าย (v_{SA}, v_{SB}, v_{SC}) เป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ สำหรับกรณีที่ใช้วิธี PQ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 และสำหรับกรณีที่ใช้วิธี SRF แสดงได้ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 จากรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.14 สามารถวัดค่า $\%THD_i$ ของค่ากระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (i_{SM}, i_{ST}) และคำนวณค่าตัวประกอบกำลังก่อนและหลังการชดเชยแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งสังเกตได้ว่า ก่อนมีการฉีดกระแสชดเชยที่เวลา 0 วินาที ถึงเวลา 0.06 วินาที ค่า i_{SM}, i_{ST} และกระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_{LM}, i_{LT}) มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ คือ บิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์ ซึ่งเมื่อวัดค่า $\%THD_i$ ของรูปสัญญาณดังกล่าวได้เท่ากับ 22.16 % เท่ากันทั้งสองเฟส อย่างไรก็ตามภายหลังจากการชดเชยตั้งแต่เวลา 0.06 วินาที เป็นต้นไป เมื่อวงจรรอกำลังแอกทีฟที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติฉีดกระแสชดเชย (i_{CM}, i_{CT}) ตามค่ากระแสอ้างอิง (i_{CM}^*, i_{CT}^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SRF จะเห็นว่ารูปสัญญาณของ i_{SM}, i_{ST} กลับมาเป็นรูปไซน์มากขึ้น โดยวัดค่า $\%THD_i$ ภายหลังจากการชดเชยของเฟส M และเฟส T ได้เท่ากันเท่ากับ 0.263 % สำหรับกรณีที่ใช้วิธี PQ ต่อมาในส่วนกรณีที่ใช้วิธี SRF วัดค่า $\%THD_i$ ภายหลังจากการชดเชยของเฟส M และเฟส T ได้เท่ากันค่าเท่ากับ 0.018 % นอกจากนี้เมื่อพิจารณามุมเฟสของรูปสัญญาณ v_s และ i_s ก่อนการชดเชยกรณีของวิธี PQ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) และกรณีของวิธี SRF ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก) จะสังเกตได้ว่า รูปสัญญาณของ v_s และ i_s มีมุมเฟสไม่ตรงกันซึ่งเมื่อคำนวณค่าตัวประกอบกำลัง pf_{disp} มีค่าเท่ากับ 0.88 ค่า pf_{dist} มีค่าเท่ากับ 0.97 และ pf จะมีค่าเท่ากับ 0.85 ในขณะที่ภายหลัง

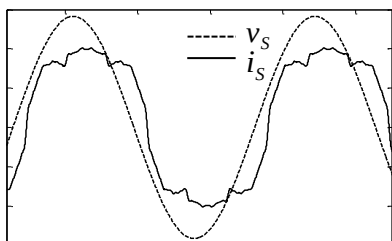
การชดเชยกรณีของวิธี PQ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ข) และกรณีของวิธี SRF ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ข) จะเห็นว่ามูเมเฟสของ v_s และ i_s กลับมาทับกันพอดี โดยคำนวณค่าตัวประกอบกำลัง pf_{disp} , pf_{dist} และ pf ได้เท่ากับ 1 เท่ากันทั้งสองเฟส



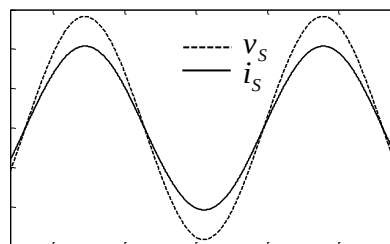
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ เฟส M สำหรับกรณีที่ 1



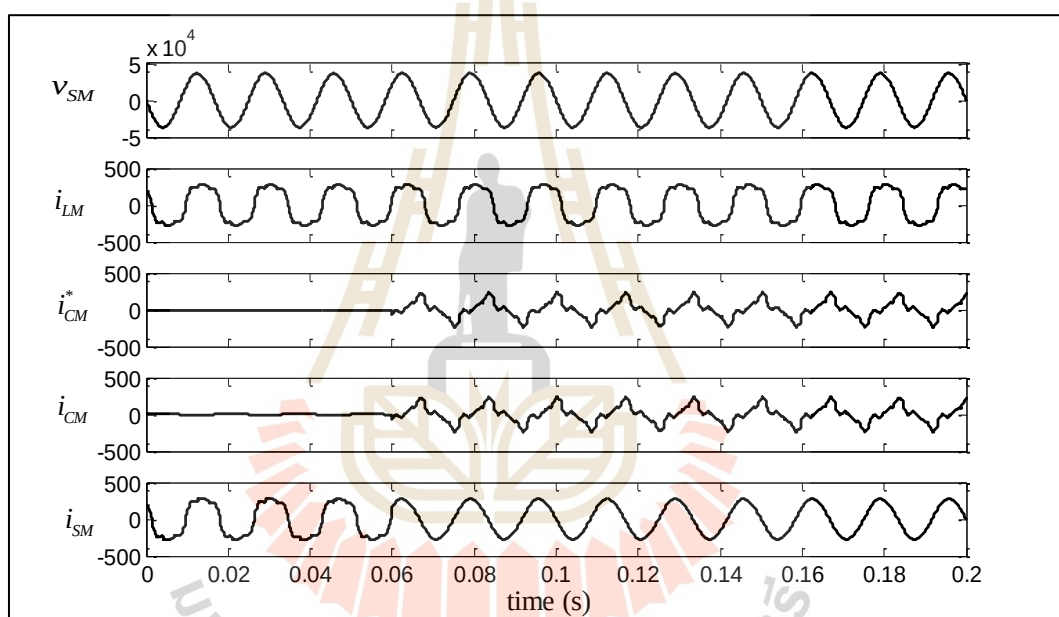
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ เฟส T สำหรับกรณีที่ 1



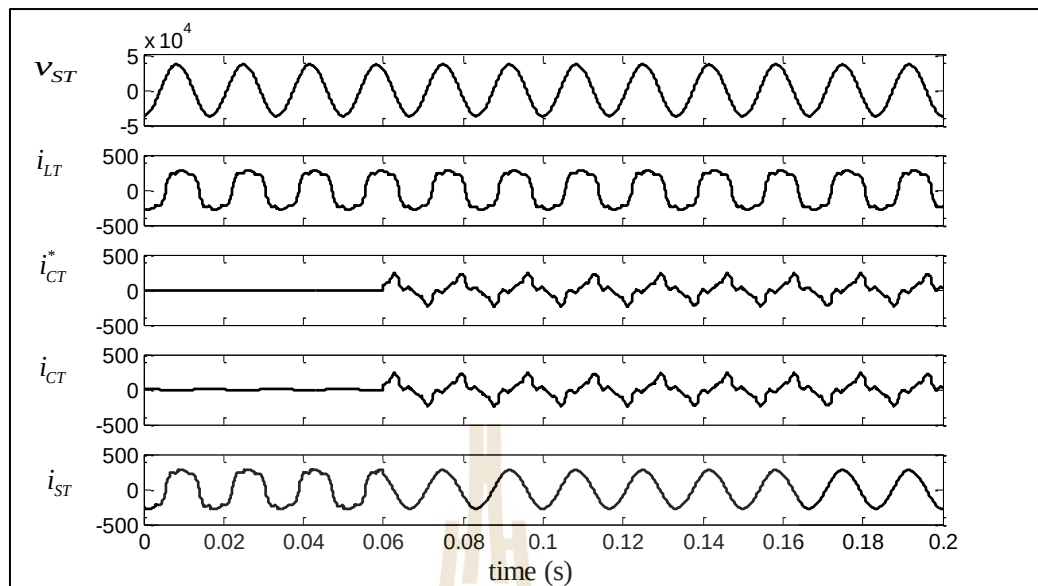
(ก) ก่อนการชดเชย



(ข) หลังการชดเชย

รูปที่ 4.13 มุมเฟสระหว่าง v_s และ i_s ของวิธี PQ สำหรับกรณีที่ 1

รูปที่ 4.14 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกด้วยวิธี SRF เฟส M สำหรับกรณีที่ 1



รูปที่ 4.15 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF เฟส T สำหรับกรณีที่ 1



(ก) ก่อนการชดเชย

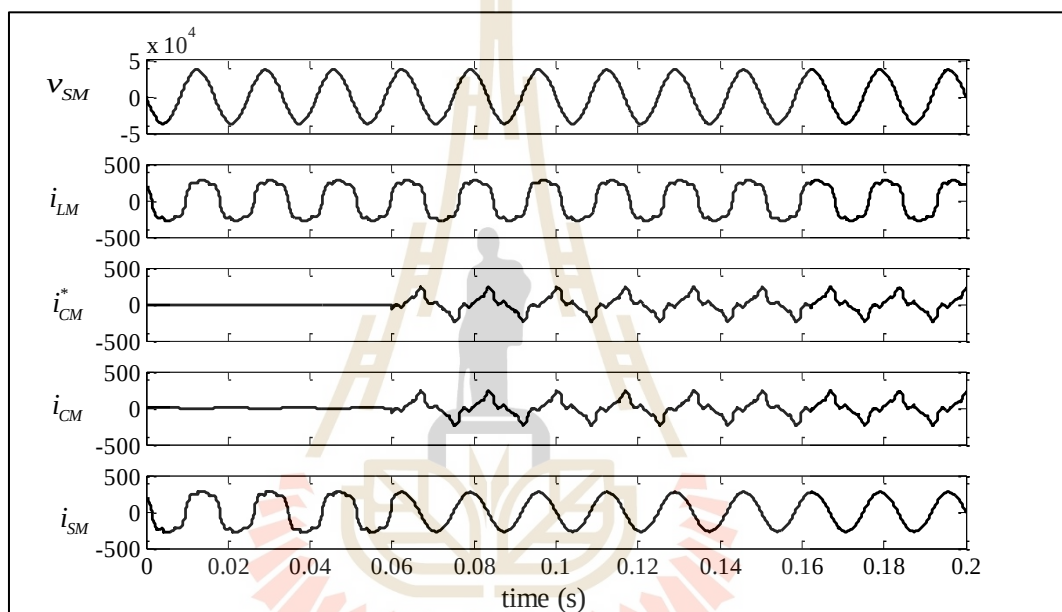
(ข) หลังการชดเชย

รูปที่ 4.16 มุมเฟสระหว่าง v_s และ i_s ของวิธี SRF สำหรับกรณีที่ 1

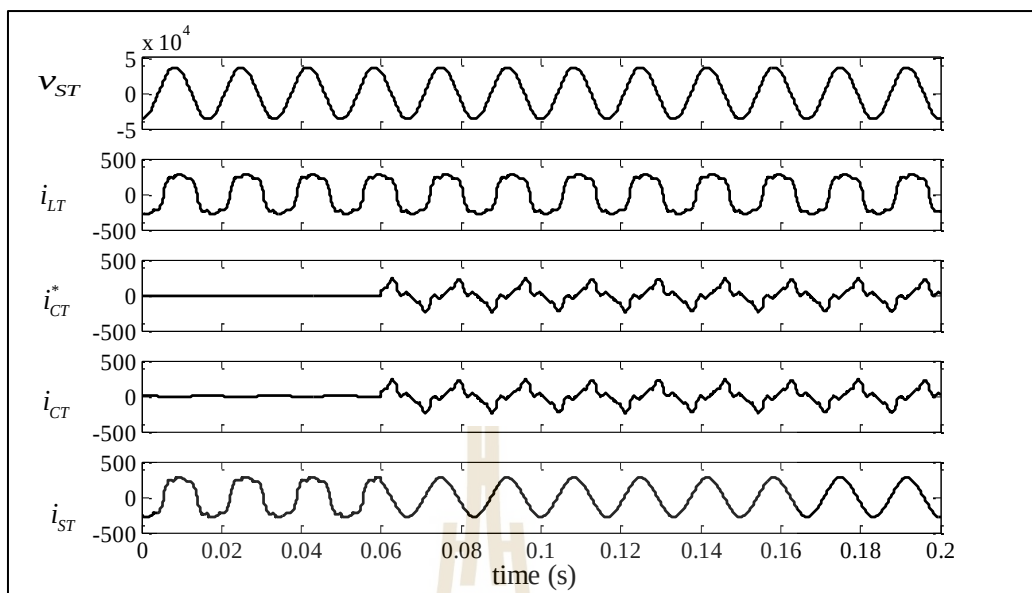
กรณีที่ 2 แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีความเพี้ยนฮาร์มอนิกปะปน

การจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้จะกำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่แหล่งจ่าย (v_{SA}, v_{SB}, v_{SC}) ของระบบในรูปที่ 4.8 มีความเพี้ยนฮาร์มอนิกปะปนซึ่งจะกำหนดให้ค่า (%THD_v) มีค่าเท่ากับ 3.26 % (Tan P-C. and et al., 2003) โดยผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกทั้งสองเฟสรวมกับการใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SRF สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.20 จากรูปดังกล่าว สามารถวัดค่า %THD_i ของค่า i_{SM}, i_{ST} รวมถึงค่าคำนวณค่าตัวประกอบกำลัง (pf_{disp}, pf_{dist}, pf) ก่อนและหลังการชดเชยแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 โดยจะสังเกตได้ว่า ในช่วงเริ่มต้นก่อนการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.06 วินาที รูปสัญญาณของ i_{SM}, i_{ST} มีลักษณะบิด

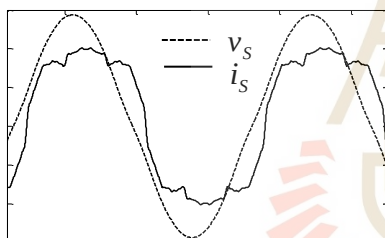
เบี้ยวไม่เป็นไซน์เหมือนกับ i_{LM}, i_{LT} อย่างไรก็ตามภายหลังจากชดเชยที่เวลา 0.06 วินาทีเป็นต้นไป จะเห็นว่า รูปสัญญาณของ i_{SM}, i_{ST} กลับเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยวัดค่า %THD_i ของ i_{SM} และ i_{ST} ในกรณีที่ใช้วิธี PQ ได้เท่ากับ 1.724 % และ 1.698 % ตามลำดับเฟส ส่วนกรณีที่ใช้วิธี SRF วัดค่า %THD_i ของ i_{SM} และ i_{ST} ได้เท่ากับ 0.025 % เท่ากันทั้งสองเฟส นอกจากนี้ ทั้งสองวิธียังสามารถ ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังภายหลังการชดเชยให้กับระบบวางไฟฟ้าที่พิจารณามีค่าเท่ากับ 1 ได้ เช่นเดียวกัน ซึ่งสังเกตได้จากมุมเฟสก่อนและหลังการชดเชยของรูปสัญญาณ i_s และ v_s ที่ทับกันพอดีดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.20



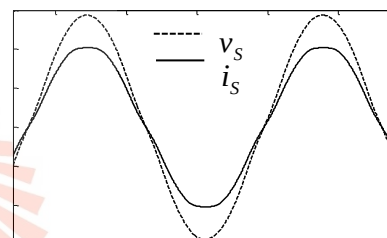
รูปที่ 4.17 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ เฟส M สำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 4.18 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ เฟส T สำหรับกรณีที่ 2

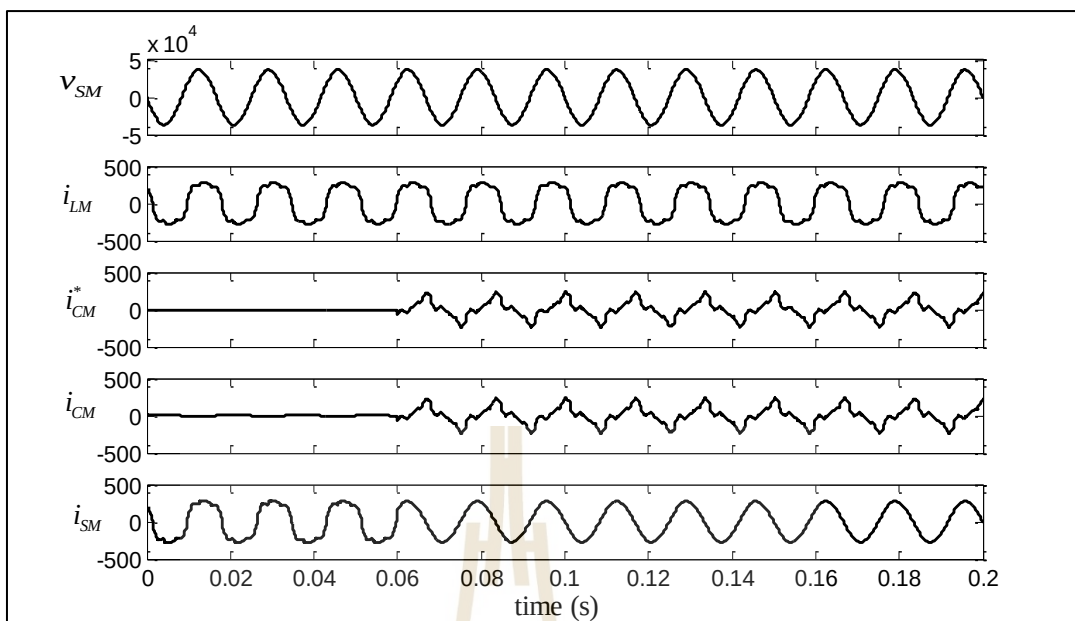


(ก) ก่อนการชดเชย

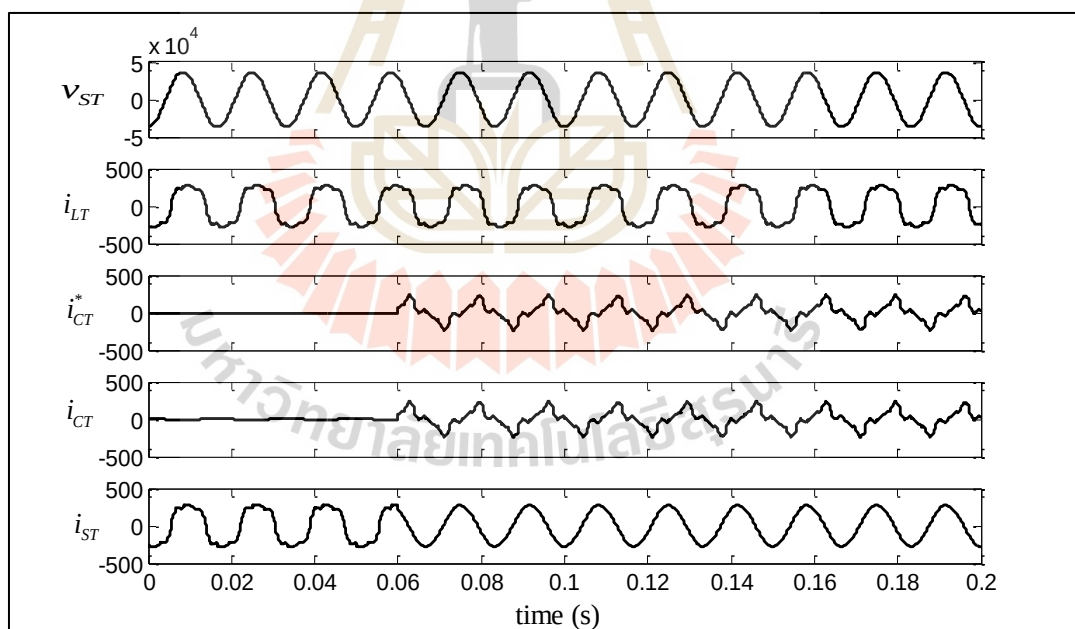


(ข) หลังการชดเชย

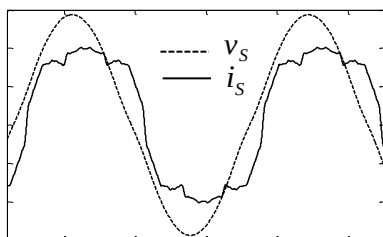
รูปที่ 4.19 มุมเฟสระหว่าง v_s และ i_s ของวิธี PQ กรณีที่ 2



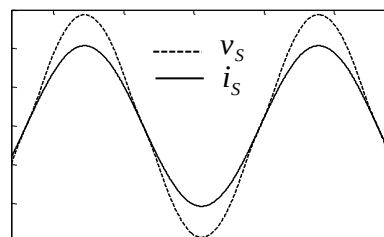
รูปที่ 4.20 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกด้วยวิธี SRF เฟส M สำหรับกรณีที่ 2



รูปที่ 4.21 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกด้วยวิธี SRF เฟส T สำหรับกรณีที่ 2



(ก) ก่อนการชดเชย



(ข) หลังการชดเชย

รูปที่ 4.22 มุมเฟสระหว่าง v_s และ i_s ของวิธี SRF กรณีที่ 2

จากผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกทั้งสองกรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายในข้างต้น เมื่อทำการเปรียบเทียบผลสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างการใช้วิธี PQ และวิธี SRF ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่แหล่งจ่ายเป็นคลื่นรูปไซน์บริสุทธิ์ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจากตารางดังกล่าวพบว่า ทั้งสองวิธีสามารถให้ ค่า %THD_i ภายหลังการชดเชยน้อยลงทั้งเฟส M และเฟส T โดยค่า %THD_i ที่ได้จากวิธี PQ มีค่าเท่ากับ 0.263 % ส่วนวิธี SRF มีค่าน้อยกว่าเท่ากับ 0.025 % และนอกจากนี้ทั้งสองวิธีสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับ 1 ได้ภายหลังการชดเชย ส่วนในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่แหล่งจ่ายมีความเพี้ยนฮาร์มอนิกปะปน ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า ภายหลังการชดเชยค่า %THD_i ของเฟส M และเฟส T ที่ได้จากวิธี PQ มีค่าสูงเท่ากับ 1.724 % และ 1.698 % ตามลำดับ ในขณะที่วิธี SRF ให้ค่า %THD_i น้อยกว่าทั้งสองเฟสที่ค่าเท่ากับ 0.025 % และในกรณีนี้ทั้งสองวิธียังคงสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าเท่ากับ 1 ได้เช่นเดิม

จากผลดังกล่าวหมายความว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF มีสมรรถนะการตรวจจับที่ดีกว่าการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ทั้งในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่แหล่งจ่ายของระบบแรงไฟฟ้าเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์ และกรณีที่แรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่แหล่งจ่ายของระบบแรงไฟฟ้ามีความเพี้ยนฮาร์มอนิกปะปน

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และ วิธี SRF ในกรณี 1

วิธีการ ตรวจจับ ฮาร์มอนิก	ค่า % THD ของกระแสไฟฟ้าที่ แหล่งจ่าย			ค่าตัวประกอบกำลัง					
	เฟส	ก่อนการ ชดเชย	หลังการ ชดเชย	ก่อนการชดเชย			หลังการชดเชย		
				pf _{disp}	pf _{dist}	pf	pf _{disp}	pf _{dist}	pf
วิธี PQ	M	22.16	0.263	0.88	0.97	0.85	1	1	1
	T	22.16	0.263	0.88	0.97	0.85	1	1	1
วิธี SRF	M	22.16	0.025	0.88	0.97	0.85	1	1	1
	T	22.16	0.025	0.88	0.97	0.85	1	1	1

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และ วิธี SRF ในกรณี 2

วิธีการ ตรวจจับ ฮาร์มอนิก	ค่า % THD ของกระแสไฟฟ้าที่ แหล่งจ่าย			ค่าตัวประกอบกำลัง					
	เฟส	ก่อนการ ชดเชย	หลังการ ชดเชย	ก่อนการชดเชย			หลังการชดเชย		
				pf _{disp}	pf _{dist}	pf	pf _{disp}	pf _{dist}	pf
วิธี PQ	M	22.16	1.724	0.88	0.97	0.85	1	1	1
	T	22.16	1.698	0.88	0.97	0.85	1	1	1
วิธี SRF	M	22.16	0.025	0.88	0.97	0.85	1	1	1
	T	22.16	0.025	0.88	0.97	0.85	1	1	1

4.5 สรุป

การตรวจจับฮาร์มอนิกถือเป็นส่วนที่สำคัญในการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า โดยในบทนี้ได้นำเสนอการตรวจจับฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังหนึ่งเฟส 2 วิธี คือ วิธี PQ และวิธี SRF ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิก พบว่า วิธี SRF สามารถให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี PQ ทั้งในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นคลื่นรูปไซน์บริสุทธิ์และกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าเท่ากับ 1 ได้ทั้งสองกรณีรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้วิธี SRF สำหรับคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟในบทต่อ ๆ ไป

บทที่ 5

การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า

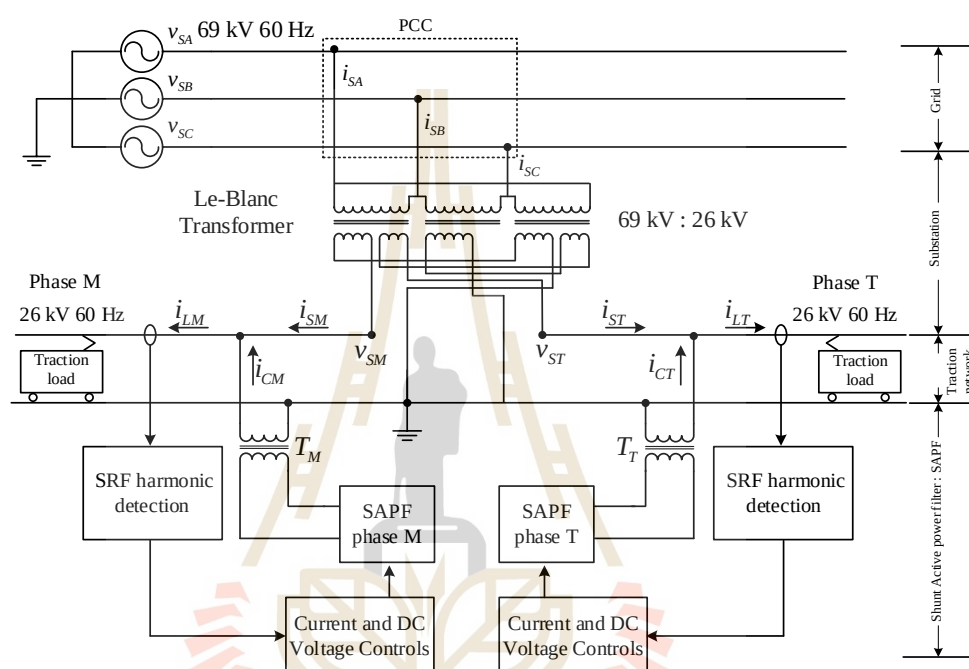
5.1 บทนำ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจะมีสมรรถนะการทำงานที่ดีสามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะของกระแสอ้างอิงที่มาจากทรานส์ฟอร์มเมอร์จำเป็นต้องมีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรให้เหมาะสมและต้องมีการออกแบบระบบควบคุมที่ดีด้วย ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสำหรับใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า โดยรายละเอียดเกี่ยวกับระบบกำจัดฮาร์มอนิกที่พิจารณาจะอธิบายในหัวข้อที่ 5.2 โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจะนำเสนอในหัวข้อที่ 5.3 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจะอธิบายในหัวข้อที่ 5.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ใช้สำหรับการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยและควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงจะอธิบายในหัวข้อที่ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ หัวข้อที่ 5.7 จะนำเสนอการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกและโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุรวม และสุดท้ายในหัวข้อที่ 5.8 จะนำเสนอการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the loop) เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคดังกล่าวได้ถูกนำเสนอไว้แล้วในอดีตที่ผ่านมา (ทศพร ณรงค์ฤทธิ์, 2557)

5.2 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า

ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt active power filter: SAPF) ในระบบรางไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ระบบดังกล่าวประกอบด้วย 3 ส่วน โดยส่วนแรก คือ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (บล็อก SAPF Phase M และ บล็อก SAPF Phase T) ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยให้กับระบบรางไฟฟ้าเพื่อกำจัดฮาร์มอนิก ส่วนที่สอง คือ การตรวจจับฮาร์มอนิก (บล็อก SRF harmonic detection) สำหรับคำนวณหากระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธี SRF เนื่องจากมีสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 และส่วนสุดท้ายที่มีอยู่ด้วยกันสองส่วน คือ การควบคุมการฉีด

กระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (บล็อก Current and DC Voltage controls) โดยสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวควบคุมพีโอ เนื่องจากเป็นตัวควบคุมพื้นฐานที่มีประสิทธิภาพการควบคุมที่ดีและง่ายต่อการออกแบบ (Han B., 2009) และสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีโอเช่นกัน (Bruno A. and et al., 2014) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ตัวควบคุมพีโอสามารถให้สมรรถนะที่ดีเพียงพอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง



รูปที่ 5.1 ระบบการกำจัดการรบกวนจากตัววงจรรบกวนกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบรางไฟฟ้า

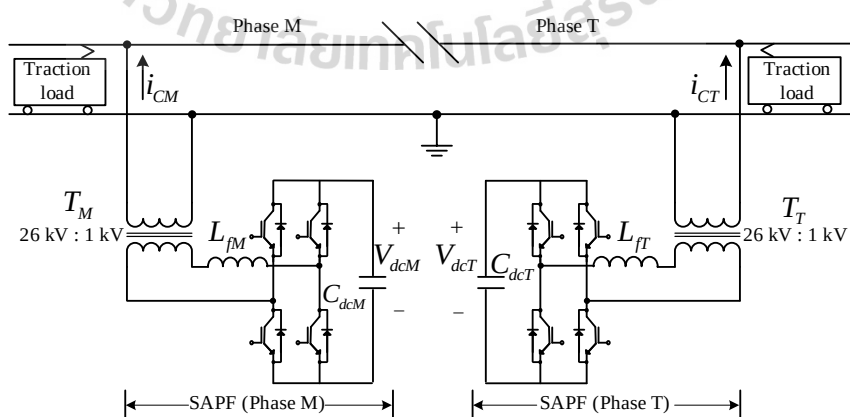
5.3 โครงสร้างของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า

การกำจัดการมอดิโนในระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวมที่มีปริมาณฮาร์โมนิกเกิดขึ้นที่เฟส M และเฟส T ของระบบรางไฟฟ้าจะต้องใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานหนึ่งเฟสสำหรับกำจัดการมอดิโนที่เฟส M จำนวน 1 ชุด และที่เฟส T จำนวน 1 ชุด โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ ตามลักษณะโครงสร้าง คือ โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุรวม โดยที่โครงสร้างทั้งสองจะแตกต่างกันที่ลักษณะการต่อใช้งานตัวเก็บประจุสำหรับใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ สำหรับเนื้อหาในหัวข้อนี้จะนำเสนอลักษณะโครงสร้างและรายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทั้งสองโครงสร้าง ซึ่งวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้างนี้จะถูกนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดการมอดิโนในระบบรางไฟฟ้าในหัวข้อที่ 5.7 ต่อไป รายละเอียดของแต่ละโครงสร้างสามารถแสดงได้ดังนี้

5.3.1 วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งจะใช้วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Single phase voltage source inverter) จำนวน 2 ชุด โดยแต่ละชุดประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที (IGBT) จำนวน 4 ตัว ต่อกันเป็นลักษณะวงจรถัด และใช้ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองจำนวน 2 ตัว (L_{PM}, L_{PT}) และตัวเก็บประจุดีซีจำนวน 2 ตัว (C_{dcM}, C_{dcT}) สำหรับหลักการทำงานของวงจรนี้จะเริ่มจากตัวเก็บประจุที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานของอินเวอร์เตอร์แต่ละชุดทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ ในขณะที่อุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีทีจะทำหน้าที่นำกระแสและหยุดนำกระแสตามสัญญาณพัลส์การสวิตช์ที่ได้จากส่วนของระบบควบคุมกระแสชดเชยที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation: PWM) เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการ หลังจากนั้นตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองจะทำหน้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสชดเชยฉีดเข้าที่จุดที่พิจารณาการจัดฮาร์โมนิกซึ่งอยู่ทางฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลอนด์ เพื่อกำจัดกระแสฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าต่อไป

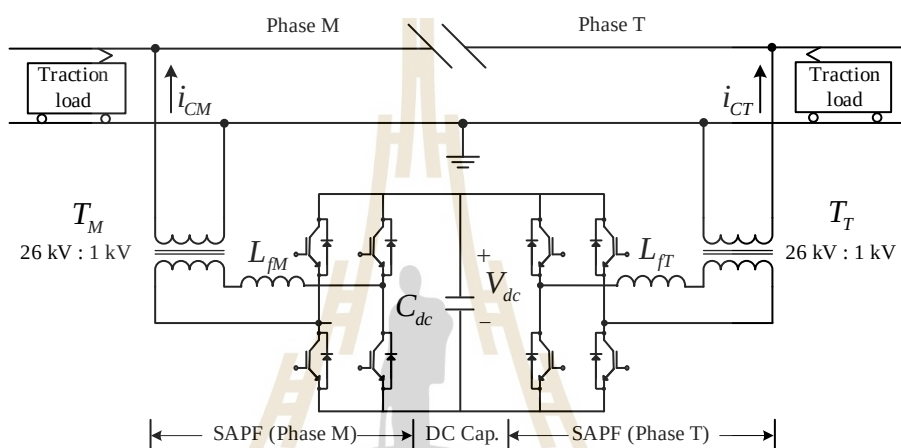
อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระบบรางไฟฟ้ามีพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลอนด์เท่ากับ 26 kV ส่งผลให้การใช้อุปกรณ์ของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานที่มีพิกัดแรงดันสูงนั้นจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น การออกแบบวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานในระบบรางไฟฟ้าโดยทั่วไปจึงนิยมออกแบบให้มีพิกัดแรงดันต่ำลงมาอยู่ในช่วง 600 V ถึง 3300 V ซึ่งการใช้วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานที่ออกแบบให้มีพิกัดแรงดันต่ำลงนี้จะมีการใช้งานร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้า (T_M, T_T) ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานให้สามารถฉีดกระแสเข้าที่จุดที่พิจารณาการจัดฮาร์โมนิก ของระบบรางไฟฟ้าได้ ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส (Single-Phase Transformer) ซึ่งมีพิกัด 26 kV : 1 kV ดังปรากฏในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

5.3.2 วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 โดยโครงสร้างหลักของวงจรจะมีส่วนประกอบที่เหมือนกับโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกทุกประการ ยกเว้นตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ที่มีการใช้เพียง 1 ตัว ร่วมกันทั้งสองชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ อย่างไรก็ตาม หลักการทำงานของวงจรมีดังต่อไปนี้ยังสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับกรณีของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก



รูปที่ 5.3 วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

5.4 การออกแบบวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า

5.4.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_{fM}, L_{fT}) ของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟทั้งสองโครงสร้างจะใช้วิธีการของ Ingram, D.M.E. and Round, S.D. ที่ได้นำเสนอไว้ในปี ค.ศ. 1997 ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีนี้จะขึ้นกับขอบเขตสูงสุดของค่าความเหนี่ยวนำ ($L_{f(max)}$) และเนื่องจากโหลดของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาทั้งสองเฟสมีขนาดเท่ากัน ดังนั้น ค่า $L_{f(max)}$ ของทั้งสองเฟสที่ได้จากการออกแบบจึงมีขนาดเท่ากันด้วย การออกแบบตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองด้วยวิธีการของ Ingram, D.M.E. and Round, S.D. มีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาอัตราค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงในการชดเชยสูงสุดเทียบกับเวลา ($\max(di_c^* / dt)$) ซึ่งจะประมาณค่าโดยใช้องค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิก ($i_h(t)$) ดังสมการที่ (5.1) ที่ทำให้เกิดค่า $\max(di_c^* / dt)$ โดยค่า $\max(di_c^* / dt)$ นี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.2)

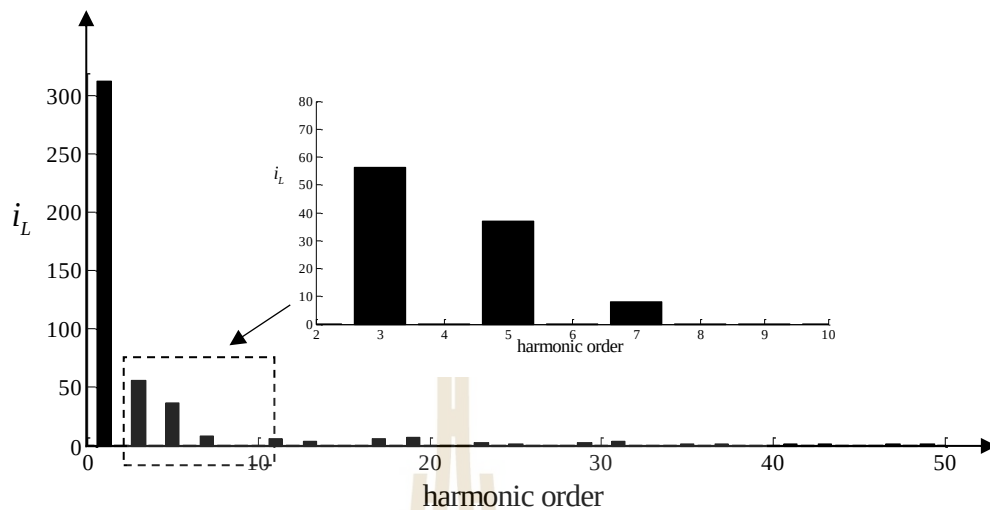
$$i_h(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (5.1)$$

$$\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right) = A2\pi f \quad (5.2)$$

โดยที่ A คือ แอมพลิจูดของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ทำให้ค่า $\max(di_c^* / dt)$ มีค่าสูงสุด (A)
 f คือ ความถี่ของอันดับฮาร์มอนิกที่มีทำให้ค่า $\max(di_c^* / dt)$ มีค่าสูงสุด (Hz)

การพิจารณาค่าองค์ประกอบที่ทำให้ค่า $\max(di_c^* / dt)$ มีค่าสูงสุดแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 จากรูปดังกล่าว เมื่อพิจารณาผลกราฟสเปกตรัมขนาดของกระแสฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา พบว่า กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ($f = 180$ Hz) มีขนาดแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ 56.42 A สามารถคำนวณค่า $\max(di_c^* / dt)$ ได้เท่ากับ 63810 A/s ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ($f = 300$ Hz) มีขนาดแอมพลิจูดสูงเป็นอันดับสองเท่ากับ 36.93 A แต่สามารถคำนวณค่า $\max(di_c^* / dt)$ ได้มากกว่าที่ค่าเท่ากับ 69611 A/s ดังนั้นการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองในขั้นตอนนี้จะจึงเลือกใช้ค่า $\max(di_c^* / dt)$ ที่คำนวณได้จากผลของกระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่ 5 ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 69611 A/s อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ามีการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส (26 kV: 1 kV) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกลงมาดังปรากฏในรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 ซึ่งการใช้งานหม้อแปลงดังกล่าวจะส่งผลให้ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่อยู่ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดกระแสสูงขึ้น 26 เท่า ของค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกตามอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้น เมื่อคิดผลของหม้อแปลงไฟฟ้าจะสามารถคำนวณค่า $\max(di_c^* / dt)$ ใหม่ได้ค่าเท่ากับ 1809896 A/s แสดงได้ดังนี้

$$\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right) = (36.93 \times 26) \times 2\pi \times 300 = 1809896 \text{ A/s}$$



รูปที่ 5.4 สเปกตรัมกระแสไหลในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าความเหนี่ยวนำ $L_{f(max)}$ โดยใช้สมการที่ (5.3)

$$L_{f(max)} = \frac{V_{dc} - V_{PCC}}{\max(\frac{di_c^*}{dt})} \quad (5.3)$$

โดยที่ V_{PCC} คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุดที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1414 V (พิจารณาจากฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงที่ต่อเข้ากับจุดที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก)

V_{dc} คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรง

จากสมการที่ (5.3) กำหนดออกแบบให้ V_{dc} มีค่าเท่ากับ 1700 V (แรงดัน V_{dc} ควรออกแบบให้มีความมากกว่าค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (ในที่นี้คือจุดที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก) (Thomas T. and et al., 1998)) ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 1414 V ดังนั้น จะสามารถคำนวณค่า $L_{f(max)}$ ได้เท่ากับ 0.157 mH แสดงได้ดังนี้

$$L_{f(max)} = \frac{1700 - 1414}{1809896} = 0.158 \text{ mH}$$

ขั้นตอนที่ 3 ทำการเลือกใช้ค่า L_f ที่มีขนาดไม่เกินค่า $L_{f(max)}$ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของ L_{PM} และ L_{PT} เท่ากันเท่ากับ 0.15 mH

5.4.2 การออกแบบตัวเก็บประจุดีซี

การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก (C_{dcM}, C_{dcT}) และที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจรร่วม (C_{dc}) จะใช้วิธีการของ T. Thomas, et al. ที่ได้นำเสนอไว้ในปี ค.ศ. 1998 โดยผลการคำนวณที่ได้จะเป็นค่าขอบเขตต่ำสุดของขนาดตัวเก็บประจุ ($C_{dc(min)}$) สำหรับเลือกใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานเพื่อจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ โดยทั้งสองโครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะกำหนดเลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุที่มีขนาดเท่ากัน การหาค่า $C_{dc(min)}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.4) ซึ่งแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน อธิบายได้ดังนี้

$$C_{dc(min)} = \frac{\Delta \int \tilde{p}_L dt}{\Delta V_{dc} \times V_{dc}^*} \quad (5.4)$$

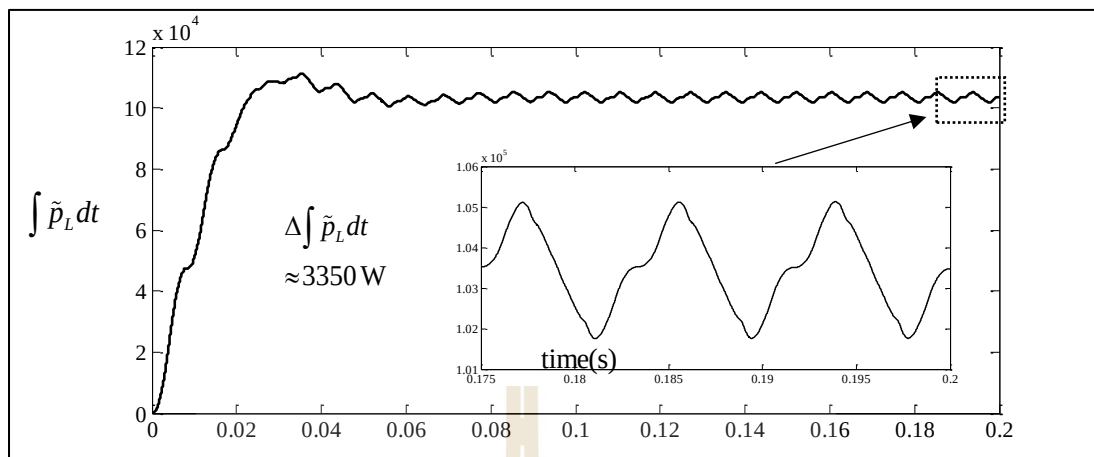
โดยที่ $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ คือ ค่าการกระเพื่อมของผลรวมกำลังแอกทีฟที่โหลด

V_{dc}^* คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง

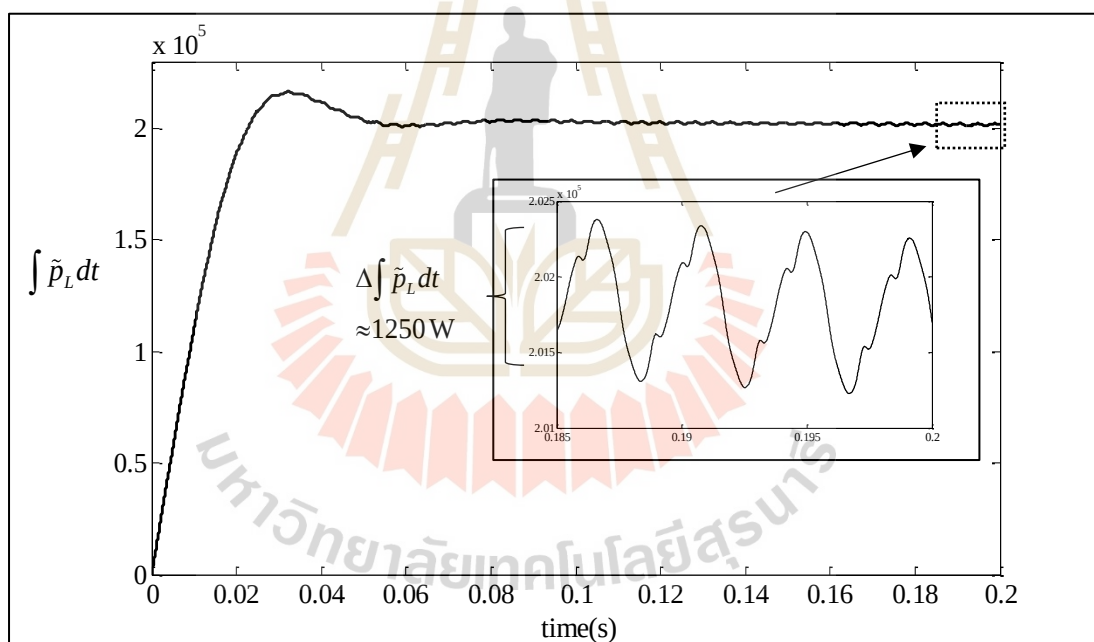
ΔV_{dc} คือ ค่าแรงดันกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่าการกระเพื่อมของผลรวมกำลังแอกทีฟที่โหลด ($\Delta \int \tilde{p}_L dt$) ของระบบรางไฟฟ้าดังแสดงผลในรูปที่ 5.5 จากรูปดังกล่าวค่า $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ จะพิจารณาจากขนาดการกระเพื่อมของเทอมปริพันธ์ผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ($v_{PCC,j}$) กับกระแสฮาร์มอนิกหรือกระแสอ้างอิง ($i_{c,j}^*$) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกทั้งสองเฟส ($j = M, T$) ตามสมการที่ 5.5 โดยเมื่อพิจารณาค่า $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ จากรูปที่ 5.5 ในกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกที่มีตัวเก็บประจุ 2 ตัว จะต้องพิจารณาแยกกันระหว่างเฟส M และ เฟส T ซึ่งจะมีค่าประมาณ 3350 W เท่ากันทั้งสองเฟส และจากรูปที่ 5.6 กรณีโครงสร้างแบบเก็บประจรร่วมที่มีตัวเก็บประจุตัวเดียวจะต้องพิจารณาค่า $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ ร่วมกันทั้งสองเฟส ซึ่งจะมีประมาณ 1250 W

$$\Delta \int \tilde{p}_L dt = \Delta \left[\int \sum_{j=M,T} \{v_{PCC,j} \cdot i_{c,j}^*\} dt \right] \quad (5.5)$$



รูปที่ 5.5 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่โหลดกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก



รูปที่ 5.6 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่โหลดกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจรร่วม

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่า $C_{dc(min)}$ โดยใช้สมการที่ (5.4) โดยที่ค่าแรงดันกระเพื่อม ΔV_{dc} จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 34 V เพื่อให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ไม่เกิน 2 % ของแรงดัน V_{dc} (1700 V) จากการกำหนดค่าดังกล่าวจะสามารถคำนวณค่า $C_{dc(min)}$ แสดงได้ดังนี้

กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกจะได้

$$C_{dc(min)} = \frac{3350}{34 \times 1700} = 58 \text{ mF}$$

กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจรรวมจะได้

$$C_{dc(min)} = \frac{1200}{34 \times 1700} = 20.76 \text{ mF}$$

จากค่า $C_{dc(min)}$ ในการคำนวณของทั้งสองโครงสร้างข้างต้นเพื่อให้วงจรกรองกำลัง แยกที่ฟมีสมรรถนะที่ดีในการฉีดกระแสชดเชย จะต้องเลือกค่า C_{dc} ให้มีขนาดมากกว่าค่า $C_{dc(min)}$ ดังนั้น การเลือกใช้ตัวเก็บประจุควรเลือกตัวเก็บประจุที่มีขนาดมากกว่า 58 mF ขึ้นไปสำหรับกรณี โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก และควรเลือกมากกว่า 21.76 mF ขึ้นไปสำหรับกรณีโครงสร้างแบบ ตัวเก็บประจุรวมเพื่อให้ค่าแรงดันกระแสฟของแรงดันบัสไฟตรงที่ต้องมีค่าน้อยอยู่ในขอบเขตไม่เกิน 34 V ตามที่ออกแบบไว้ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลัง แยกที่ฟทั้งสองโครงสร้างมีขนาดเท่ากันเท่ากับ 60 mF ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ขอบเขตของค่า $C_{dc(min)}$ ของ วงจรกรองกำลังแยกที่ฟทั้งสองโครงสร้าง

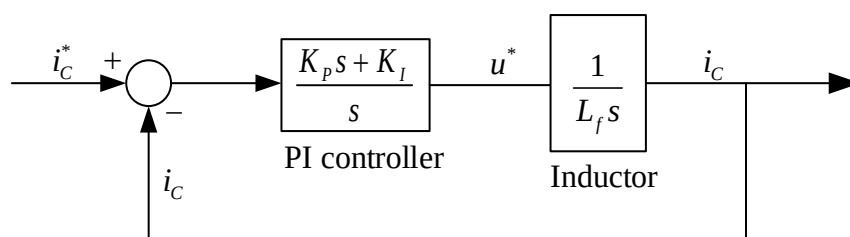
5.5 การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแยกที่ฟ

แบบขนาน

การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรกรองกำลังแยกที่ฟ แบบขนานทั้งสองโครงสร้างในที่นี้จะเลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดัง รูปที่ 5.7 จากรูปดังกล่าว ค่าผลต่างระหว่างกระแสอ้างอิง (i_C^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วย วิธี SRF และค่ากระแสชดเชย (i_C) จะถูกป้อนเป็นอินพุตให้ตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) และ พลานต์ (Plant) ของระบบควบคุม โดยค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ กำหนดให้เป็นค่าแรงดันอ้างอิง (u^*) สำหรับการสวิตช์ไอจีบีทีด้วยเทคนิค PWM ต่อไป

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมการฉีด กระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแยกที่ฟจะใช้วิธีการประมาณโดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์พจน์ พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดของระบบควบคุมในรูปที่ 5.7 ซึ่งสามารถแสดง ได้ดังสมการที่ (5.6) กับสัมประสิทธิ์พจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสอง

มาตรฐานดังสมการที่ (5.7) ซึ่งผลการเปรียบเทียบจะได้สมการสำหรับใช้ออกแบบค่า K_p และ K_I ของตัวควบคุมพีไอในการควบคุมกระแสตรงแสดงดังสมการที่ (5.8) และ (5.9) ตามลำดับ



รูปที่ 5.7 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

$$\frac{i_C}{i_C^*} = \frac{\left(\frac{K_p s + K_I}{L_f} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_p}{L_f} \right) s + \frac{K_I}{L_f}} \quad (5.6)$$

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta s \omega_n + \omega_n^2} \quad (5.7)$$

$$K_p = 2\zeta \omega_{ni} L_f \quad (5.8)$$

$$K_I = \omega_{ni}^2 L_f \quad (5.9)$$

โดยที่ ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio)

ω_{ni} คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) สำหรับการควบคุมกระแส

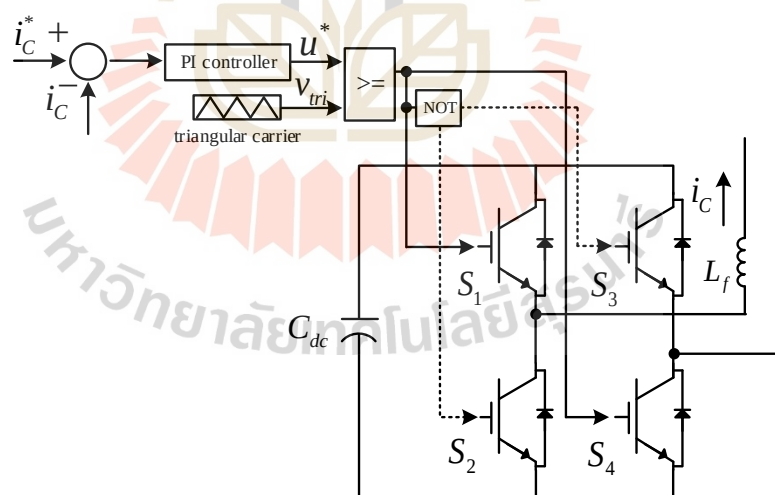
การกำหนดค่า ζ จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\sqrt{2}/2$ เนื่องจากต้องการให้ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤต (underdamped response) ซึ่งมีช่วงเวลาขึ้น (rise time) และช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) ที่ดีสำหรับระบบควบคุม และสำหรับการออกแบบค่า ω_{ni} จะพิจารณาจากอันดับฮาร์มอนิกสูงสุดในระบบแรงไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณากำจัดฮาร์มอนิกสูงสุดที่อันดับ 50 ที่มีความถี่เท่ากับ 3000 Hz ดังนั้นค่า ω_{ni} จะมีค่าเท่ากับ $2\pi \times 3000$

rad/s จากค่าดังกล่าว จะสามารถคำนวณออกแบบค่า K_p และ K_i ได้เท่ากับ 4 และ 53300 ตามลำดับ แสดงได้ดังนี้

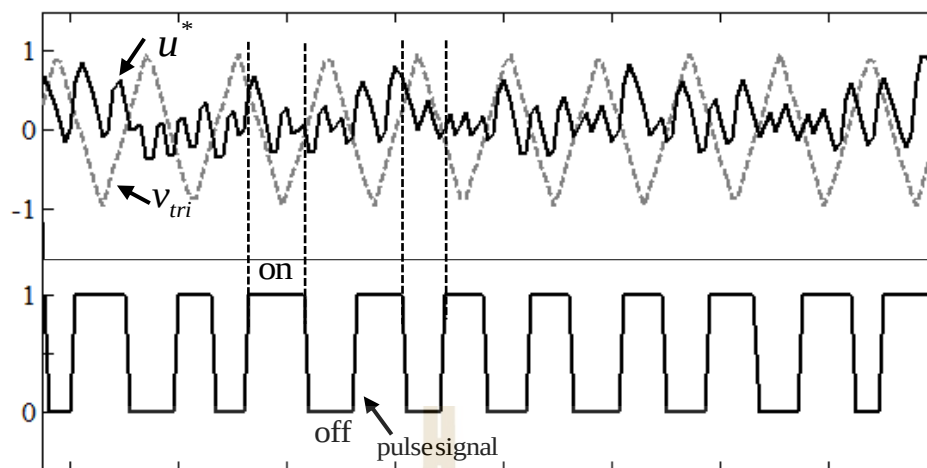
$$K_p = 2 \times 0.707 \times (2\pi \times 3000) \times (0.00015) = 4$$

$$K_i = (2\pi \times 3000)^2 \times (0.00015) = 53300$$

การควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอจำเป็นต้องใช้งานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ในการควบคุมอุปกรณ์ไอจีบีทีของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้เทคนิคการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวให้ผลการสร้างพัลส์ควบคุมที่ดีและมีความถี่ในการสวิตช์ที่คงที่ เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มสำหรับสร้างสัญญาณพัลส์ให้กับอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีทีที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 จากรูปดังกล่าว ค่าแรงดันอ้างอิง (u^*) ซึ่งเป็นค่าเอาต์พุตที่ได้จากส่วนของการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม (v_{tri}) ที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ 1 และมีความถี่คงที่เท่ากับ 6000 Hz ซึ่งโดยทั่วไปค่าความถี่ของสัญญาณสามเหลี่ยมจะออกแบบให้มีค่าน้อยเป็นสองเท่าของความถี่ฮาร์มอนิกอันดับสูงสุด (Thomas, 1998)



รูปที่ 5.8 ระบบควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ด้วยเทคนิค PWM



รูปที่ 5.9 การสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยเทคนิค PWM

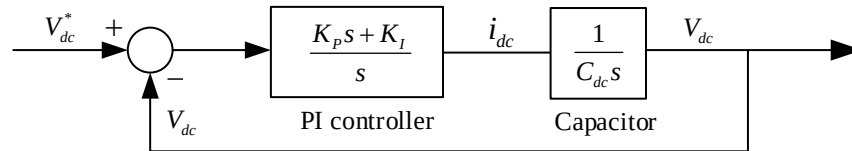
จากการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง u^* และ v_{tri} ดังแสดงในรูปที่ 5.9 จะสังเกตได้ว่า เมื่อสัญญาณ u^* มีค่ามากกว่าสัญญาณ v_{tri} จะทำให้สวิตช์ S_1 และ S_4 นำกระแส (สวิตช์ on) และทำให้สวิตช์ S_2 และ S_3 หยุดนำกระแส (สวิตช์ off) ในทางตรงกันข้ามถ้าสัญญาณ u^* มีค่าน้อยกว่าสัญญาณ v_{tri} จะทำให้สวิตช์ S_1 และ S_4 หยุดนำกระแส และทำให้สวิตช์ S_2 และ S_3 นำกระแสแทน จากผลการเปรียบเทียบสัญญาณดังกล่าวจะได้สัญญาณพัลส์สำหรับนำไปใช้ควบคุมการสวิตช์ไอจีบีทีของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานเพื่อฉีดกระแสชดเชยกำลังฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้า

5.6 การออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนาน

การออกแบบระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้างสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.10 โดยอินพุตของตัวควบคุมพีไอ คือ ผลต่างระหว่างแรงดันบัสไฟตรงอ้างอิง (V_{dc}^*) และค่าแรงดันบัสไฟตรงที่วัดตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{dc}) ส่วนค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมถูกกำหนดให้เป็นค่ากระแส i_{dc} ซึ่งจะถูกนำไปรวมแบบหักลบกับค่ากระแสอ้างอิงบนแกนดี (i_{Ld}) ที่อยู่ในส่วนของการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF (Tan P-H. and et al., 2003) เพื่อควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการไว้

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะใช้วิธีเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดในรูปที่ 5.10 ซึ่งได้ดังสมการที่ (5.10) และพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานตามสมการที่

(5.7) ซึ่งผลการเปรียบเทียบจะได้สมการสำหรับออกแบบค่า K_p และ K_I ของตัวควบคุมพีไอดังสมการที่ (5.11) และ (5.12) ตามลำดับ



รูปที่ 5.10 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{\left(s + \frac{K_p}{K_I}\right)}{s^2 + \left(\frac{K_p}{C_{dc}}\right)s + \frac{K_I}{C_{dc}}} \quad (5.10)$$

$$K_p = 2\zeta\omega_{nv} C_{dc} \quad (5.11)$$

$$K_I = \omega_{nv}^2 C_{dc} \quad (5.12)$$

โดยที่ ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio)

ω_{nv} คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

การกำหนดค่า ζ ของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\sqrt{2}/2$ เพื่อให้การตอบสนองเป็นแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤต เช่นเดียวกับระบบควบคุมกระแสชดเชย และค่า ω_{nv} ของลูการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงควรออกแบบให้มีค่าน้อยกว่าค่า ω_{ni} ของลูการควบคุมกระแสชดเชยอย่างน้อย 10 เท่า (Mendalek N. and et al, 2003) ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงกำหนดค่า ω_{nv} เท่ากับ π rad/s ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าคงที่ตามค่าแรงดันอ้างอิงที่ออกแบบไว้ โดยที่ตัวควบคุมไม่จำเป็นต้องมีความรวดเร็วสูงเมื่อเทียบกับลูการควบคุมกระแสชดเชย จากค่า ω_{nv} ดังกล่าวจะสามารถคำนวณค่า K_p ได้เท่ากับ 0.267 และ K_I ได้เท่ากับ 0.592 ตามลำดับแสดงได้ดังนี้

$$K_p = 2 \times 0.707 \times \pi \times 0.06 = 0.267$$

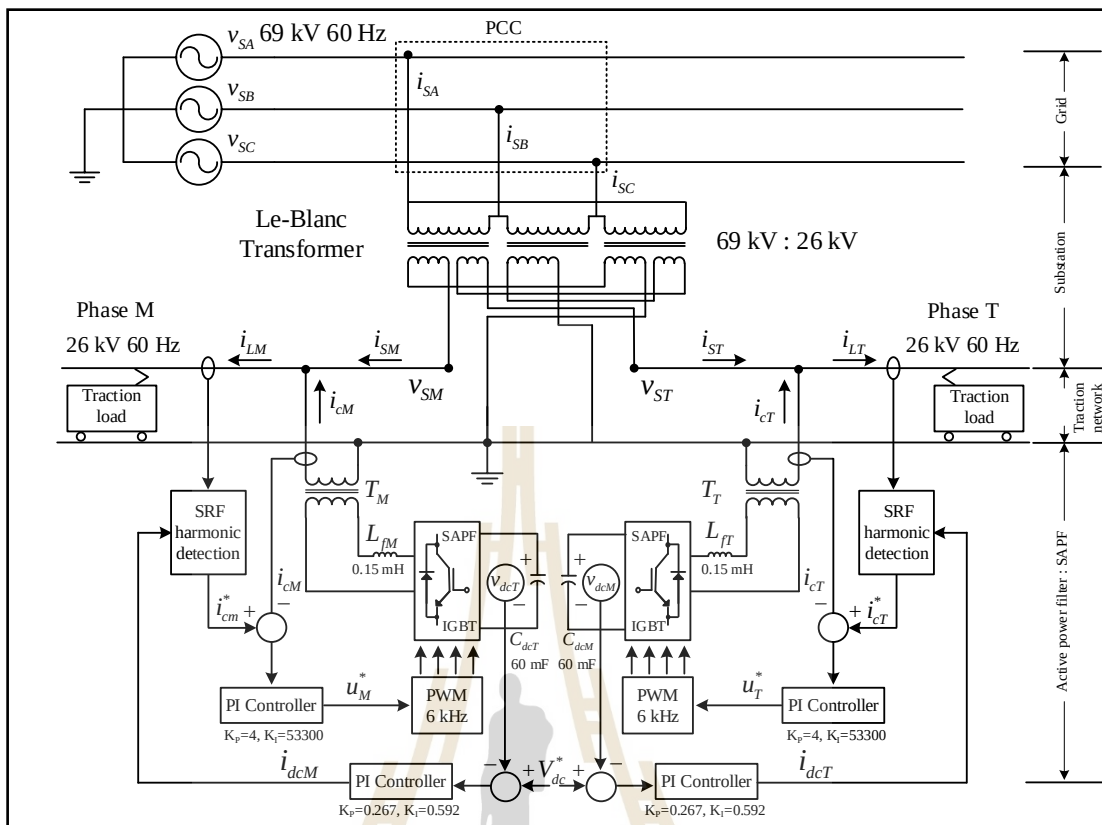
$$K_I = (\pi)^2 \times 0.06 = 0.592$$

5.7 การจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองสถานการณ์ระบบการจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อตรวจสอบผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน และตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอในการควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัลไฟตรงที่ได้ ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา และจะทำการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าระหว่างกรณีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกและกรณีการใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจรร่วม โดยระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก คือ ระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสร่วม (เฟส M และเฟส T) ที่มีพิกัดแรงดัน 26 kV 60 Hz โดยในแต่ละเฟสจะต่อเข้ากับโวลตรางไฟฟ้า จำนวน 1 ชุด ซึ่งโวลตรางไฟฟ้างกล่าวจะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติที่เป็นองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกตามข้อมูลการตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกจริงในระบบรางไฟฟ้าของประเทศไต้หวัน (Sy-Ruen and Bing-Nan, 2002) ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกดังกล่าวสามารถดูได้จากหัวข้อต่อไป

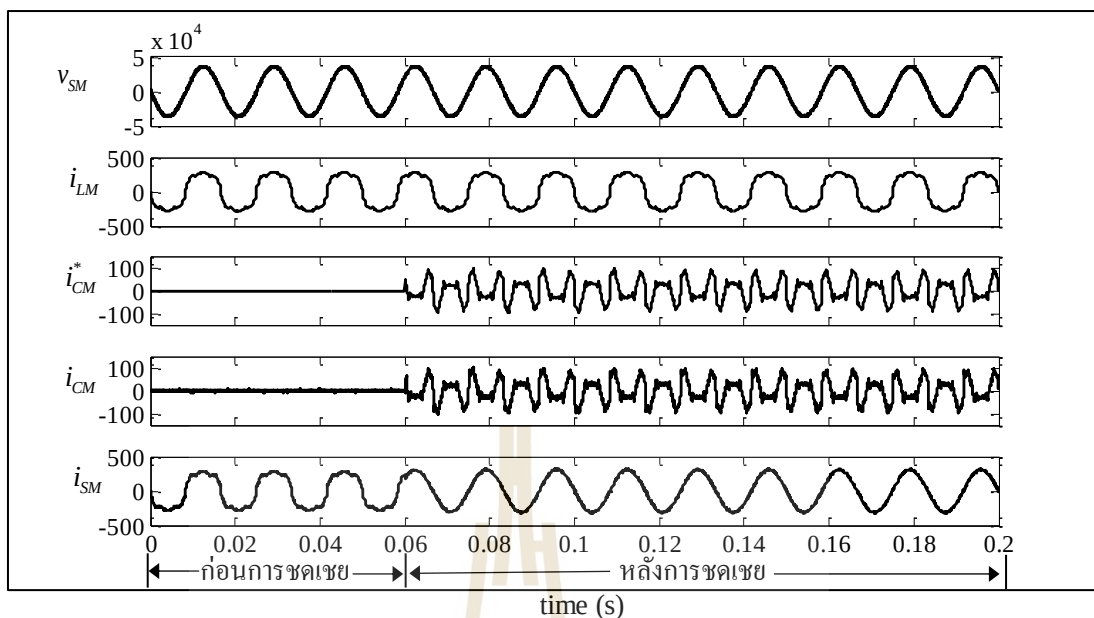
5.7.1 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกกรณีที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

ระบบการจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรและระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 5.4 ถึง 5.6 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11 จากระบบดังกล่าวผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกของเฟส M และเฟส T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 ตามลำดับ

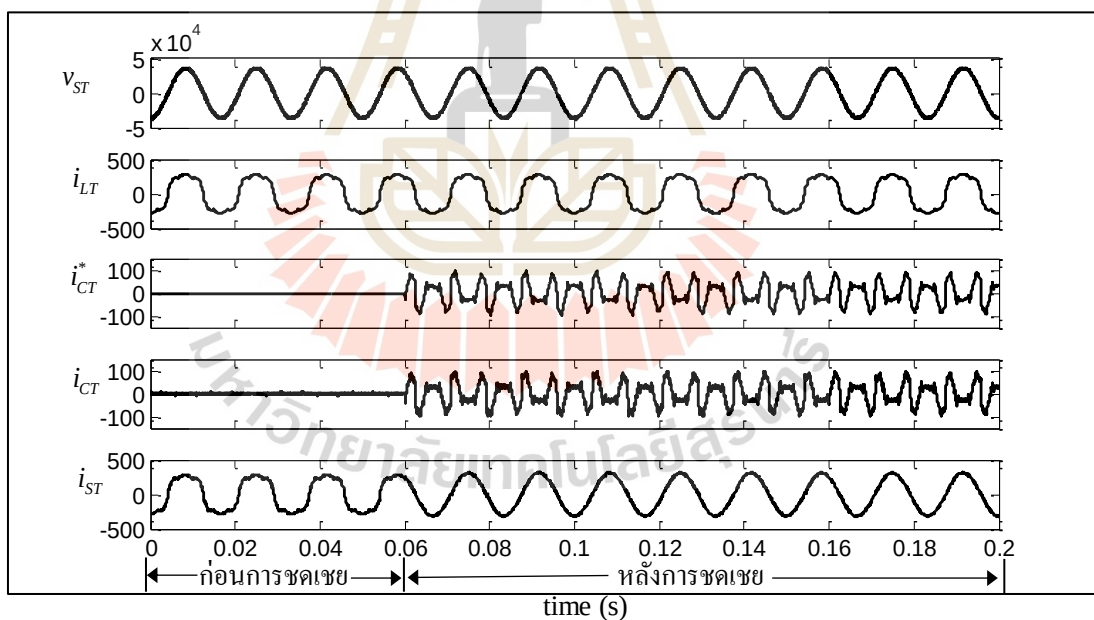


รูปที่ 5.11 ระบบกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

จากรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 ก่อนมีการฉีดกระแสชดเชยตั้งแต่วันที่ 0 ถึง 0.06 วินาที สังเกตได้ว่า ลักษณะรูปสัญญาณของกระแสที่แหล่งจ่าย (i_{SM}, i_{ST}) เหมือนกับกระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_{LM}, i_{LT}) ทุกประการ ซึ่งผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ โดยวัดค่า $\%THD_i$ ได้เท่ากับ 22.16 % จากนั้นตั้งแต่วันที่ 0.06 วินาที เป็นต้นไป เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกทำงานร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้ทำการฉีดกระแสชดเชย (i_{CM}, i_{CT}) ตามค่ากระแสอ้างอิง (i_{CM}^*, i_{CT}^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี SRF พบว่า รูปสัญญาณของ i_{SM} และ i_{ST} มีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยค่า $\%THD_i$ ภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเหลือเท่ากับ 1.78 % และ 1.80 % สำหรับ M และ เฟส T ตามลำดับ ซึ่งค่า $\%THD_i$ ดังกล่าวสามารถดูได้จากตารางที่ 5.3



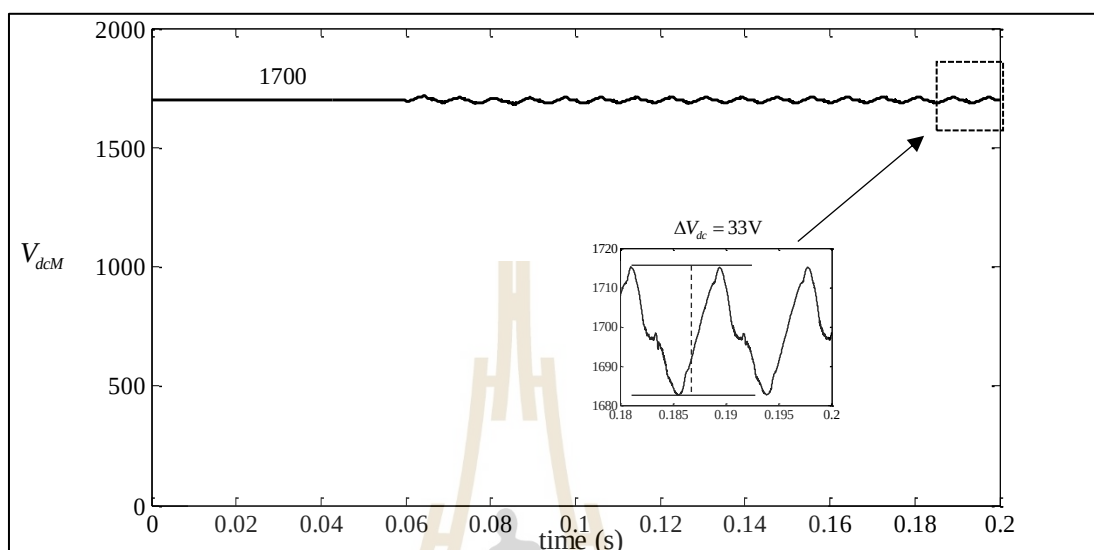
รูปที่ 5.12 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส M กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก



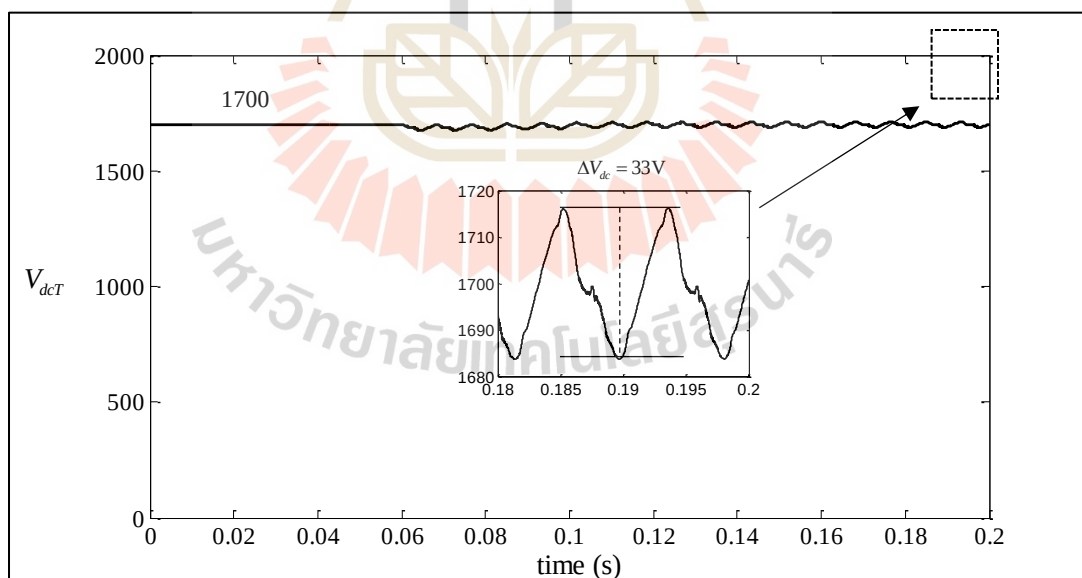
รูปที่ 5.13 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส T กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

นอกจากนี้ในส่วนของการจำลองสถานการณ์ทดสอบสมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ของเฟส M และเฟส T ดังแสดงในรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 สังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบสามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเฟส M (C_{dcM}) และเฟส T (C_{dcT})

ให้มีค่าเท่า 1700 V ตามที่ได้ออกแบบไว้ได้ โดยเมื่อพิจารณาค่าแรงดันกระแสเพื่อพบว่ามีค่าประมาณ 33 V เท่ากันทั้งสองเฟส ซึ่งค่าดังกล่าวอยู่ในขอบเขตแรงดันกระแสเพื่อที่ได้ออกแบบไว้ (34 V)



รูปที่ 5.14 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของเฟส M กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก



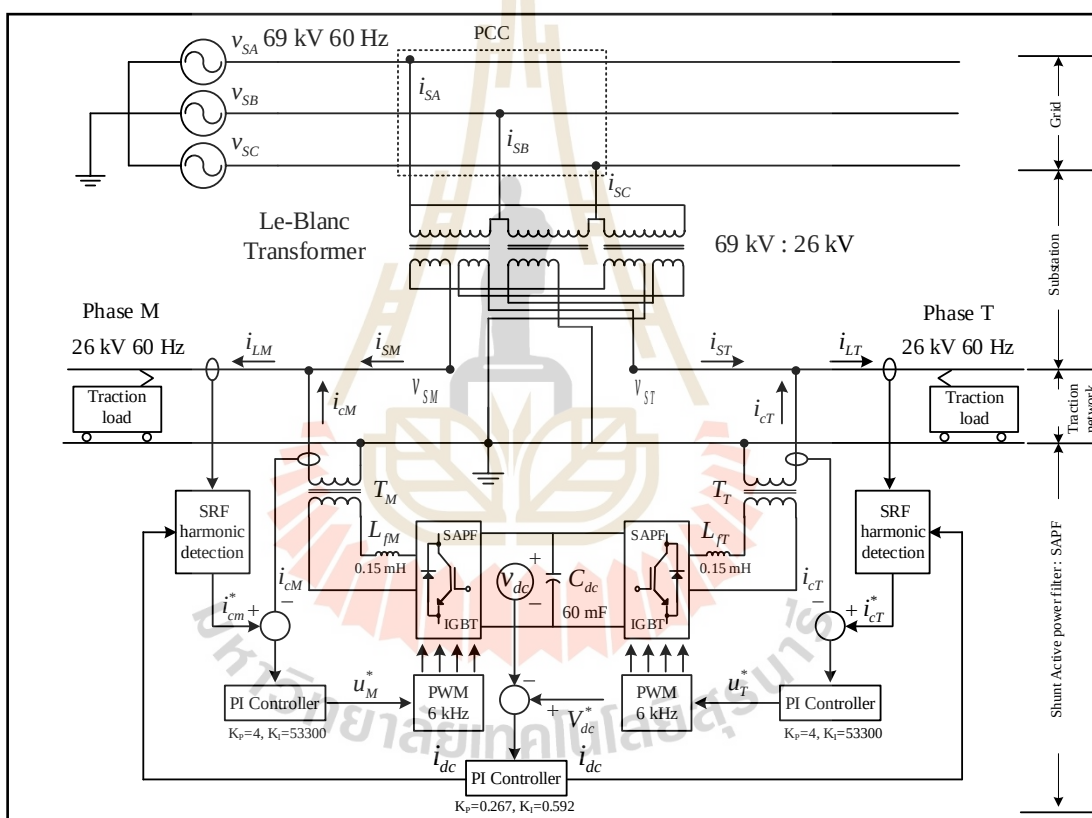
รูปที่ 5.15 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของเฟส T กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

จากผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้าในข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการ

ออกแบบสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงมีประสิทธิภาพที่ดี ส่งผลให้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าทั้งสองเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.7.2 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกกรณีที่ใช้งานจกรองกำลังแอทฟิแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

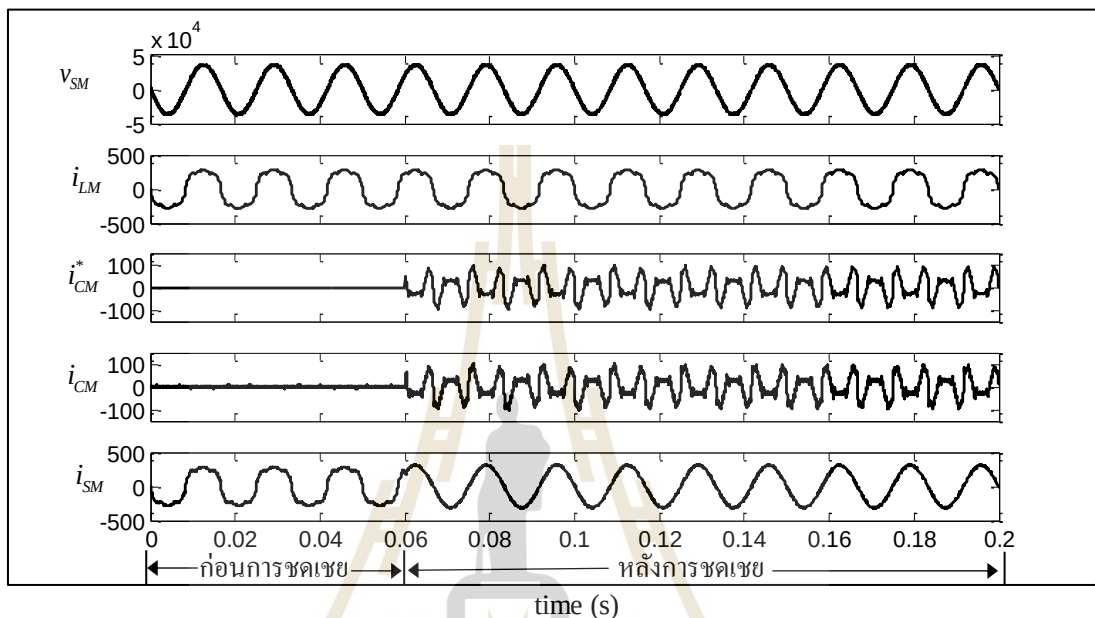
การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่ใช้งานจกรองกำลังแอทฟิแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรจกรองกำลังแอทฟิแบบขนาน และค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมตามที่ออกแบบไว้เหมือนกับกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกทุกประการ ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.16 แต่ในส่วนของการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงจะใช้ตัวควบคุมพีไอเพียง 1 ชุด เท่านั้น



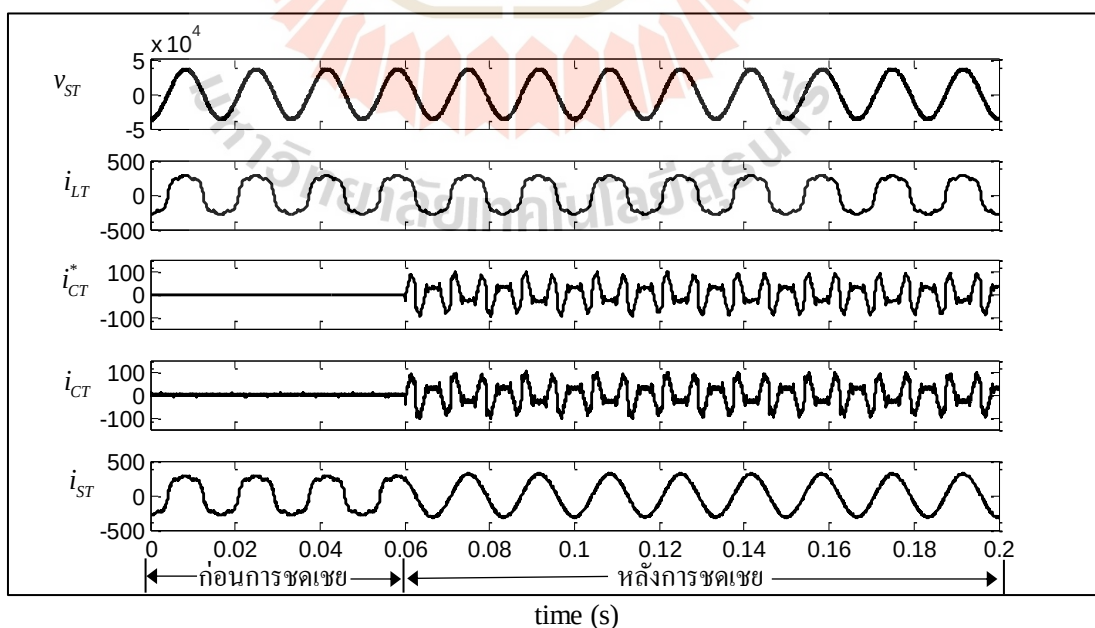
รูปที่ 5.16 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรจกรองกำลังแอทฟิแบบขนานกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในเฟส M และเฟส T ของระบบรางไฟฟ้าในรูปที่ 5.16 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.17 และ รูปที่ 5.18 ตามลำดับ โดยจากรูปดังกล่าวจะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 0 ถึง 0.06 วินาที ขณะที่ยังไม่มีกระแสชดเชย รูปสัญญาณของกระแส i_{SM} , i_{ST} และ i_{LM} , i_{LT} มีลักษณะผิดเพี้ยนจากรูปไซน์เหมือนกัน ซึ่งวัดค่า %THD_i ได้เท่ากับ 22.16 %

จากนั้นเมื่อพิจารณารูปสัญญาณของ i_{SM}, i_{ST} ภายหลังจากชดเชยโดยใช้วงจรรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจรรวมตั้งแต่เวลา 0.06 วินาที เป็นต้นไป พบว่า มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยวัดค่า %THD_i ของเฟส M ได้เท่ากับ 1.56 % และของเฟส T เท่ากับ 1.58 % ซึ่งค่า %THD_i ดังกล่าวสามารถดูได้จากตารางที่ 5.3 เช่นเดียวกัน

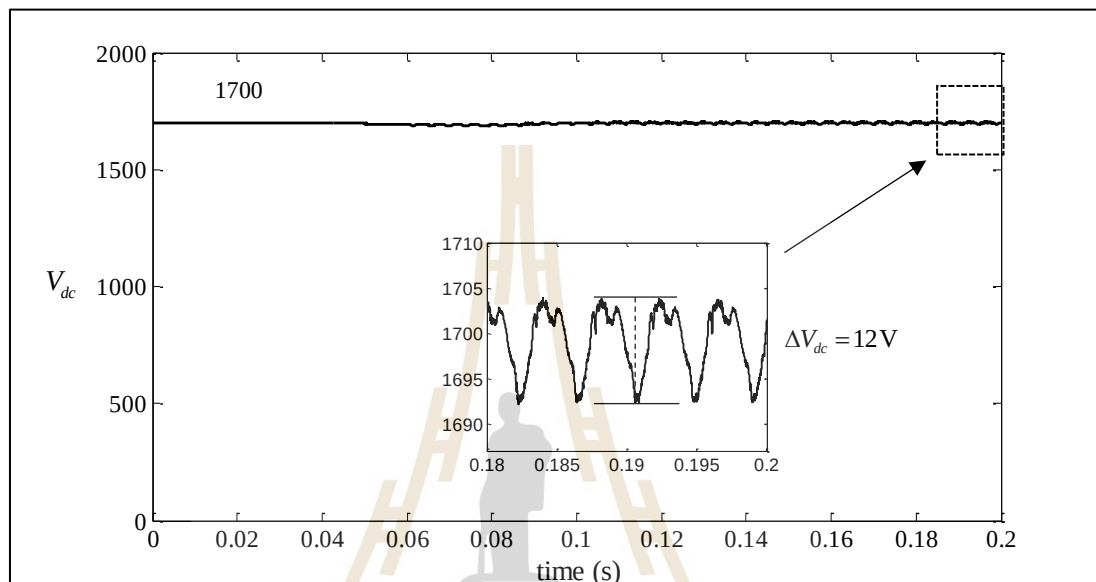


รูปที่ 5.17 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส M กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจรรวม



รูปที่ 5.18 ผลการจำลองสถานการณ์ของเฟส T กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจรรวม

สำหรับผลการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (C_{dc}) ในกรณีนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.19 โดยจะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบสามารถควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงให้มีค่าเท่ากับ 1700 V ตามค่าแรงดันอ้างอิงได้ โดยมีค่าแรงดันกระเพื่อมเท่ากับ 12 V ซึ่งอยู่ในขอบเขตของแรงดันกระเพื่อม 34 V ตามที่ได้ออกแบบไว้เช่นกัน



รูปที่ 5.19 ผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัลไฟตรงกรณีโครงสร้างตัวเก็บประจุร่วม

จากผลการจำลองสถานการณ์ในข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอในส่วนของ การควบคุมกระแสขาเข้าและการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่ได้จากการออกแบบมีประสิทธิภาพที่ดี สามารถควบคุมให้วงจรกรองกำลังแอกที่ฟีดกระแสขาเข้าเพื่อจำกัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าให้มี ปริมาณลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการจำกัดฮาร์มอนิกทั้งสองกรณีโครงสร้างของวงจร กรองกำลังแอกที่ฟแบบขนาน สามารถสรุปผลค่า %THD_i แสดงได้ดังตารางที่ 5.1 จากตารางดังกล่าว พบว่า กรณีที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกที่ฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถให้ค่า %THD_i ที่ดีกว่าที่ค่าเท่ากับ 1.56 % และ 1.58 % สำหรับเฟส M และเฟส T ในขณะที่กรณีที่ใช้วงจร กรองกำลังแอกที่ฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก ให้ค่า %THD_i ของเฟส M เท่ากับ 1.78 % และของเฟส T เท่ากับ 1.80 % และเมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันกระเพื่อมของแรงดัน บัลไฟตรง (% ΔV_{dc}) โดยอาศัยการคำนวณตามสมการที่ (5.13) พบว่า กรณีที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บ ประจุร่วมมีค่า % ΔV_{dc} น้อยกว่า โดยมีค่าเท่ากับ 0.71 % ในขณะที่กรณีที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บ ประจุแยกมีค่า % ΔV_{dc} เท่ากับ 1.94 % ทั้งสองเฟส จากผลดังกล่าว หมายความว่า วงจรกรองกำลัง

แอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถให้สมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยและประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีกว่ากรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

$$\% \Delta V_{dc} = \frac{\Delta V_{dc}}{V_{dc}^*} \times 100 \quad (5.13)$$

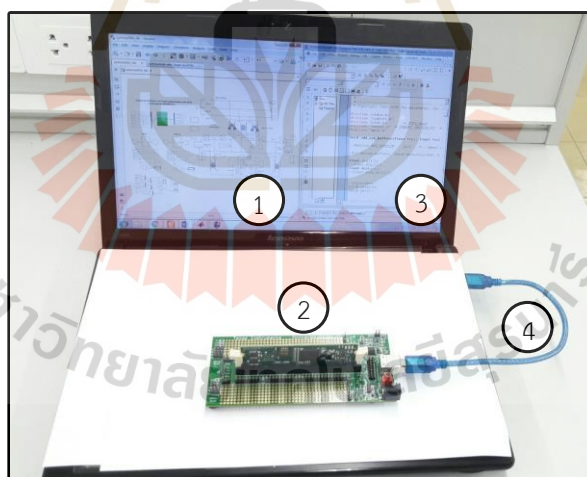
ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกระหว่างการใช้งานกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกและโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน	ค่า %THD _i ของ i_{ST} เฟส M		ค่า %THD _i ของ i_{SM} เฟส T		ค่า % ΔV_{dc}	
	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย	ก่อนการชดเชย	หลังการชดเชย	กรณีเฟส T	กรณีเฟส M
แบบตัวเก็บประจุแยก	22.16 %	1.78 %	22.16 %	1.80 %	1.94 %	1.94 %
แบบตัวเก็บประจุร่วม	22.16 %	1.56 %	22.16 %	1.58 %	0.71 %	

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบด้านจำนวนอุปกรณ์และจำนวนตัวควบคุมที่ใช้สำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกดังแสดงในระบบรูปที่ 5.11 และกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมดังแสดงในระบบรูปที่ 5.16 พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้างมีการใช้งานวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง หม้อแปลงไฟฟ้าลดระดับแรงดัน ชุดตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก และตัวควบคุมกระแสชดเชย ในจำนวนที่เท่ากันอย่างละ 2 ชุด แต่วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมมีการใช้ตัวเก็บประจุดีซี และตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเพียง 1 ชุด ซึ่งมีจำนวนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกที่ต้องใช้ตัวเก็บประจุดีซี และตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจำนวน 2 ชุด ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงเลือกใช้งานวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสำหรับกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าต่อไป โดยการทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรดังกล่าวเพิ่มเติมในกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงร่วมกับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปสามารถดูได้จากหัวข้อที่ 5.8

5.8 การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในหัวข้อนี้จะใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the Loop: HIL) ซึ่งการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคดังกล่าวมีข้อดี คือ สามารถตรวจสอบสมรรถนะและความถูกต้องของระบบควบคุมที่ได้ทำการออกแบบและสร้างโดยใช้บอร์ด DSP ซึ่งจะช่วยป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์หรืออุปกรณ์ของระบบไฟฟ้าอื่น ๆ ในระบบที่พิจารณา ก่อนจะสร้างจริงได้ นอกจากนี้การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปยังให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับผลฮาร์ดแวร์จริงมากกว่าการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียว โดยเครื่องมือที่ใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ประกอบด้วย ซอฟต์แวร์ (Software) โปรแกรม Simulink/MATLAB และอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ (Hardware) บอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experiment Kit ที่ใช้ในการโปรแกรมสร้างระบบควบคุมผ่านโปรแกรม CCStudio V3.3 โดยการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink และบอร์ด DSP จะเชื่อมต่อผ่านคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB JTAG emulator ดังแสดงในรูป 5.20

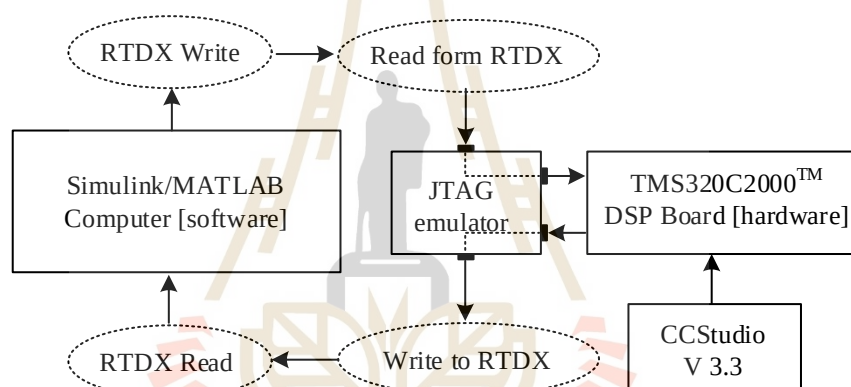


- | | |
|--------------------------------|------------------|
| 1. Simulink/MATLAB | 3. CCStudio v3.3 |
| 2. TMS320C2000™ Experiment Kit | 4. JTAG emulator |

รูปที่ 5.20 การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink และบอร์ด TMS320C2000™ Experiment Kit

หลักการรับส่งข้อมูลของการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 5.21 โดยจะเริ่มต้นจากการใช้บล็อก RTDX Write ที่อยู่บนโปรแกรม Simulink ส่งข้อมูล

อินพุตไปยังบอร์ด DSP ผ่านทางพอร์ต USB JTAG emulator ในขณะที่บอร์ด DSP จะรับข้อมูลดังกล่าวด้วยการใช้คำสั่ง Read From RTDX ซึ่งจะต้องเขียนคำสั่งที่โปรแกรม CCStudio V3.3 (โปรแกรมควบคุมการทำงานของบอร์ด DSP) จากนั้นเมื่อบอร์ด DSP ดำเนินการคำนวณหรือประมวลผลตามการโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลเอาต์พุตจากบอร์ด DSP จะถูกส่งกลับไปยังโปรแกรม Simulink ด้วยคำสั่ง Write to RTDX ก่อนที่บล็อก RTDX Read บนโปรแกรม Simulink จะทำหน้าที่รับข้อมูลเอาต์พุตที่ได้ไปใช้งานต่อไป การอธิบายหลักการส่งและรับข้อมูลดังกล่าวเป็นเพียงการจำลองสถานการณ์ในหนึ่งรอบช่วงเวลาการชักตัวอย่าง (sampling time) เท่านั้น สำหรับในรอบถัด ๆ ไป จะดำเนินการซ้ำเดิมเพียงแต่ค่าอินพุตที่ใช้ในการคำนวณจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของระบบการจำลองสถานการณ์



รูปที่ 5.21 ไดอะแกรมการรับส่งข้อมูลของการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

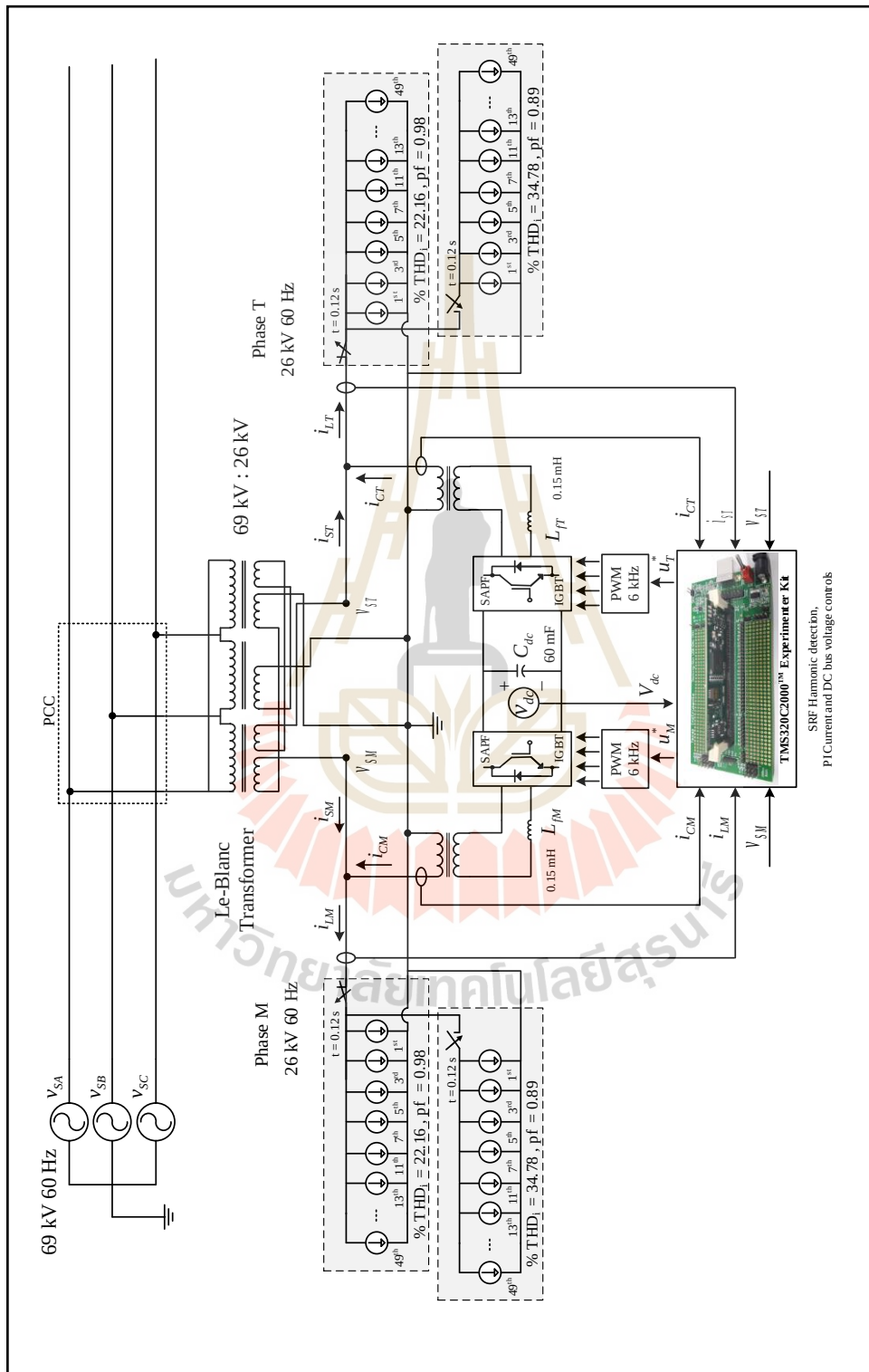
สำหรับระบบรางไฟฟ้าที่ใช้พิจารณาจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปในหัวข้อนี้ จะกำหนดโหลดของเฟส M และเฟส T แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติที่มีทั้งขนาดและมุมเฟส โดยแบ่งเป็น 2 ช่วงเวลาทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 จากตารางดังกล่าว ประกอบด้วย ในช่วงเวลาที่ 1 โหลดปกติ คือ โหลดที่มีค่า %THD_i เท่ากับ 22.16 % และมีค่าตัวประกอบกำลัง pf เท่ากับ 0.98 และในช่วงเวลาที่ 2 (0.12 ถึง 0.2 วินาที) จะกำหนดให้กระแสที่โหลดมีการเปลี่ยนอย่างฉับพลันที่เวลา 0.12 วินาที โดยค่ากระแสโหลดจะมีค่า %THD_i เท่ากับ 34.78 % และมี pf เท่ากับ 0.89

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลกระแสโหนดของระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณา

ลำดับ ฮาร์มอนิก (h)	กระแสไฟฟ้าที่โหนด (i_{LM}, i_{LT})							
	ช่วงเวลาที่ 1 (0 ถึง 0.12 วินาที)				ช่วงเวลาที่ 2 (0.12 ถึง 0.2 วินาที)			
	เฟส M		เฟส T		เฟส M		เฟส T	
	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
1	221	180	221	-90	177	160	177	-110
3	39.9	180	221	90	50	120	50	30
5	26.1	180	39.9	-90	32.5	80	32.5	170
7	5.8	180	26.1	90	7.5	40	7.5	50
11	4.2	180	5.8	90	5	-40	5	-130
13	2.9	180	4.2	-90	3.8	-80	3.75	10
17	4.2	180	2.9	-90	5	-160	5	-70
19	5	180	4.2	90	6.3	160	6.25	70
23	2.3	180	5	90	2.9	160	2.9	170
25	1.3	180	2.3	-90	1.6	40	1.6	130
29	1.6	180	1.3	-90	2	-40	2	50
31	2.5	180	1.6	90	3.1	-80	3.1	190
35	1.2	180	2.5	90	1.5	-160	1.5	110
37	1.2	180	1.2	-90	1.5	160	1.5	-110
41	1.1	180	1.2	-90	1.4	80	1.4	170
43	0.9	180	1.1	90	1.1	-40	1.1	-50
47	1.1	180	0.9	90	1.4	-40	1.4	-130
49	1.3	180	1.1	-90	1.6	-80	1.6	10
%THD _i	22.16		22.16		34.78		34.78	
pf _{disp}	0.98		0.98		0.95		0.95	
pf _{dist}	1		1		0.94		0.94	
pf	0.98		0.98		0.89		0.89	

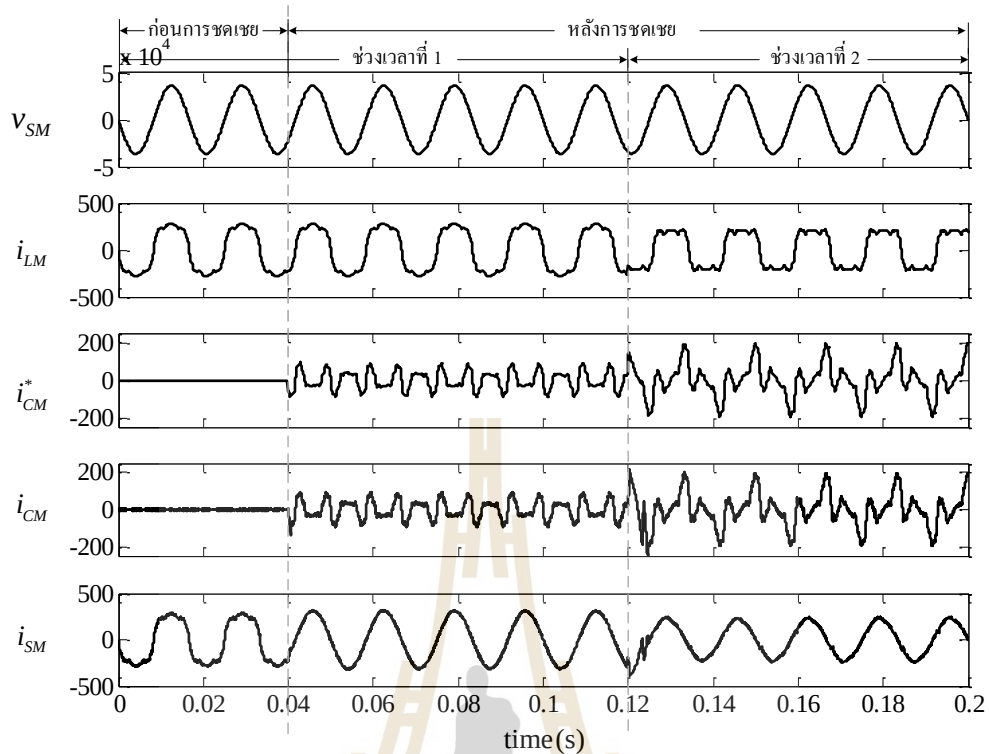
จากระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในรูปที่ 5.15 และข้อมูลค่ากระแสไหลในตารางที่ 5.2 สามารถสร้างเป็นระบบการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงได้ดังรูปที่ 5.22 จากรูปดังกล่าว ส่วนของระบบรางไฟฟ้าและวงจรรองกำลังแอกทีฟจะถูกสร้างขึ้นที่โปรแกรม Simulink ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Simscape/Power System) ในขณะที่ส่วนของการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF และระบบควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอจะถูกโปรแกรมที่บอร์ด DSP โดยข้อมูลอินพุตที่ส่งให้กับบอร์ด DSP ประกอบด้วย ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก (v_{SM}, v_{ST}) ค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ค่ากระแสไหล (i_{LM}, i_{LT}) และค่ากระแสชดเชยของวงจรรองกำลังแอกทีฟ (i_{CM}, i_{CT}) ส่วนข้อมูลเอาต์พุตจากบอร์ด DSP ที่ส่งกลับให้โปรแกรม Simulink คือ ค่าแรงดันอ้างอิง (u_M^*, u_T^*) สำหรับนำไปใช้เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ตามเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM และนำไปใช้ควบคุมสวิตช์ไอจีบีทีของวงจรรองกำลังแอกทีฟในการฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่สร้างอยู่บนโปรแกรม Simulink ต่อไป



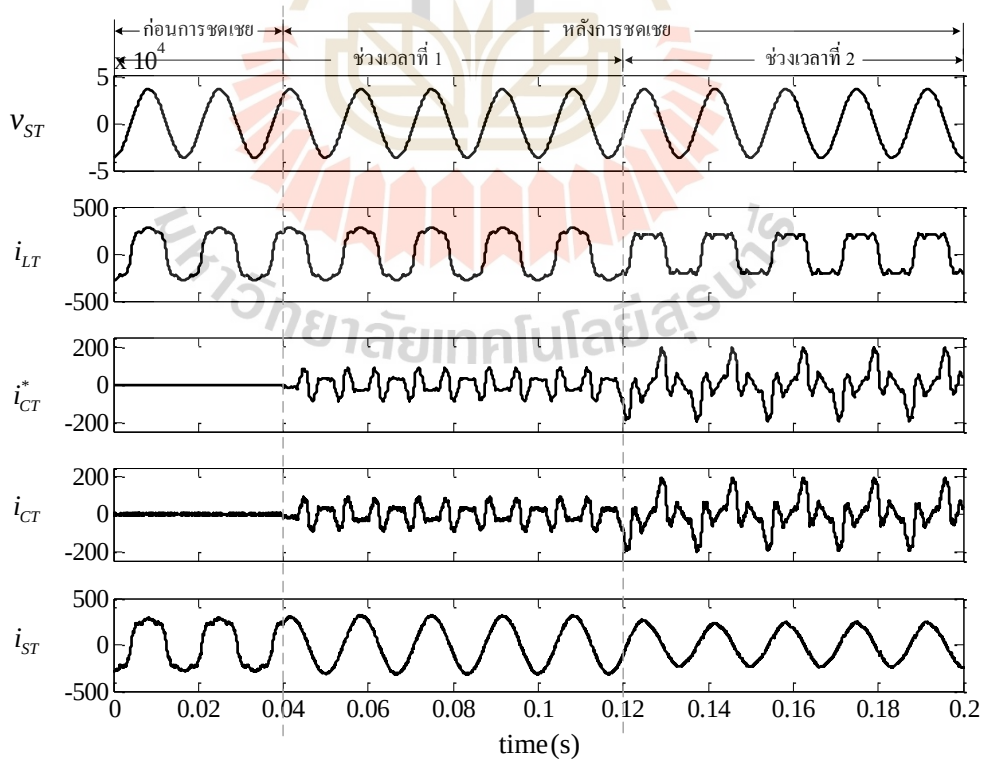


ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงสำหรับเฟส M และเฟส T สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.23 และ 5.24 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว ในช่วงเริ่มต้นของช่วงเวลาที่ 1 ก่อนมีการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.04 วินาที สังเกตได้ว่า ลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (i_{SM}, i_{ST}) และกระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_{LM}, i_{LT}) มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์มีค่า %THD_i เท่ากับ 22.16 % ทั้งสองเฟส อย่างไรก็ตาม ตั้งแต่เวลา 0.04 เป็นต้นไป เมื่อวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่สร้างบนบอร์ด DSP ทำการฉีดกระแสชดเชย (i_{CM}, i_{CT}) ตามค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิง (i_{CM}^*, i_{CT}^*) จะเห็นได้ว่า ลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสองเฟสกลับมาลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยวัดค่า %THD_i ภายหลังการชดเชยได้เท่ากับ 1.58 % ทั้งสองเฟส

หลังจากนั้นในช่วงเวลาที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.12 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อกระแสไฟฟ้าที่โหลดเฟส M และเฟส T มีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน (กระแสที่โหลดมีปริมาณฮาร์มอนิกเพิ่มมากขึ้นมีค่า %THD_i เท่ากับ 34.78 % และมีค่าตัวประกอบกำลัง pf ลดลงเท่ากับ 0.89) จะพบว่า รูปสัญญาณกระแสอ้างอิงหรือค่า i_{CM}^*, i_{CT}^* ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF มีการเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสโหลดที่เพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ในขณะเดียวกันวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบในหัวข้อที่ผ่านมา ยังคงสามารถฉีดกระแสชดเชยตามค่ากระแสชดเชยอ้างอิงได้อย่างถูกต้องด้วยเช่นกัน จากผลการฉีดกระแสดังกล่าว ส่งผลให้กระแสที่แหล่งจ่ายของทั้งสองเฟสมีลักษณะเป็นรูปไซน์เช่นเดิม ซึ่งวัดค่า %THD_i ได้เท่ากับ 4.53 % และ 4.62 % สำหรับเฟส M และเฟส T ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังพบว่า ภายหลังการชดเชยสามารถคำนวณค่า pf ได้เท่ากับ 1 เท่ากันทั้งสองเฟส

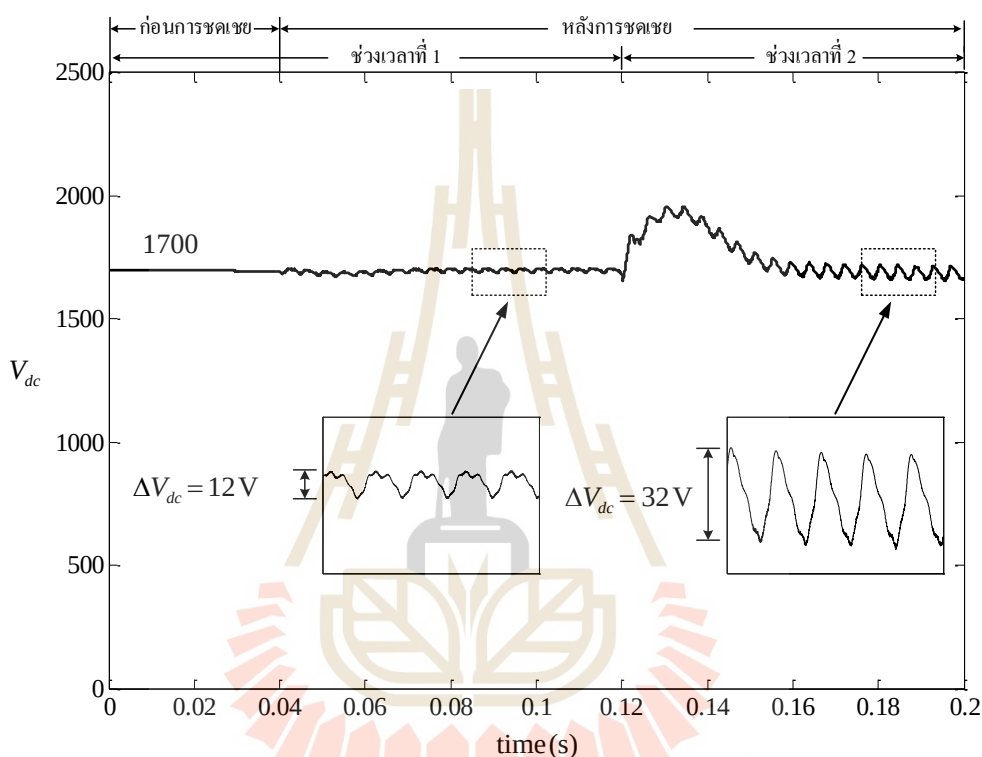


รูปที่ 5.23 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส M



รูปที่ 5.24 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูปของเฟส T

นอกจากนี้ในส่วนของผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.25 โดยจะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมพีไอที่สร้างบนบอร์ด DSP สามารถควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าเท่า 1700 V ตามค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงได้ โดยในช่วงเวลาที่ 1 มีค่าแรงดันกระเพื่อม (ΔV_{dc}) เท่ากับ 12 V และช่วงเวลาที่ 2 มีค่า ΔV_{dc} เท่ากับ 32 V ซึ่งค่า ΔV_{dc} ทั้งสองช่วงเวลายังคงอยู่ในขอบเขตของแรงดันกระเพื่อม 34 V ตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 5.25 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

ตารางที่ 5.3 ค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายและค่าตัวประกอบกำลังก่อนและหลังการชดเชย

ผลการทดสอบ	ก่อนการชดเชย				หลังการชดเชย			
	ช่วงเวลาที่ 1		ช่วงเวลาที่ 2		ช่วงเวลาที่ 1		ช่วงเวลาที่ 2	
	เฟส M	เฟส T	เฟส M	เฟส T	เฟส M	เฟส T	เฟส M	เฟส T
%THD _i	22.16	22.16	34.78	34.78	1.58	1.58	4.53	4.62
pf _{disp}	0.98	0.98	0.95	0.95	1	1	1	1
pf _{dist}	1	1	0.94	0.94	1	1	1	1
pf	0.98	0.98	0.89	0.89	1	1	1	1

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานแบบฮาร์ดแวร์ในรูป สามารถสรุปผลค่า %THD_i และค่าตัวประกอบกำลังก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยได้ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งจากตารางดังกล่าวพบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมสามารถกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าได้ดีทั้งสองช่วงเวลาการทดสอบ โดยในช่วงเวลาที่ 1 สามารถให้ผลค่า %THD_i ภายหลังการชดเชยเท่ากับ 1.58 % ทั้งเฟส M และเฟส T และในช่วงเวลาที่ 2 สามารถให้ค่า %THD_i ของเฟส M เท่ากับ 4.53 % และเฟส T เท่ากับ 4.62 % นอกจากนี้ภายหลังการชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกยังสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าเท่ากับ 1 ได้ทั้งสองช่วงเวลา

5.9 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมการฉีดกระแสชดเชย รวมถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าระหว่างกรณีที่ใช่วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกและกรณีที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาโดยใช้โปรแกรม Simulink/MATBAL พบว่ากรณีที่ใช่วงจรกรองกำลังแอกทีฟโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีกว่ากรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก อีกทั้งยังสามารถลดการใช้ตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเหลือเพียง 1 ชุด นอกจากนี้ ผลจากการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกแบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้บอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000TM Experiment ร่วมกับโปรแกรม Simulink/MATBAL แสดงให้เห็นว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมและระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบยังคงมีสมรรถนะที่ดีสามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกทำให้ค่ากระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่า %THD_i ลดลงในกรณีโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่ได้นำเสนอในบทนี้ได้พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบเฟสร่วมของระบบแรงไฟฟ้าเท่านั้น อย่างไรก็ตามการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าสามารถพิจารณาเลือกกำจัดฮาร์มอนิกที่ระบบสามเฟสของระบบแรงไฟฟ้าได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้ในบทที่ 6 ต่อไป

บทที่ 6

การจัดหาร่มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส

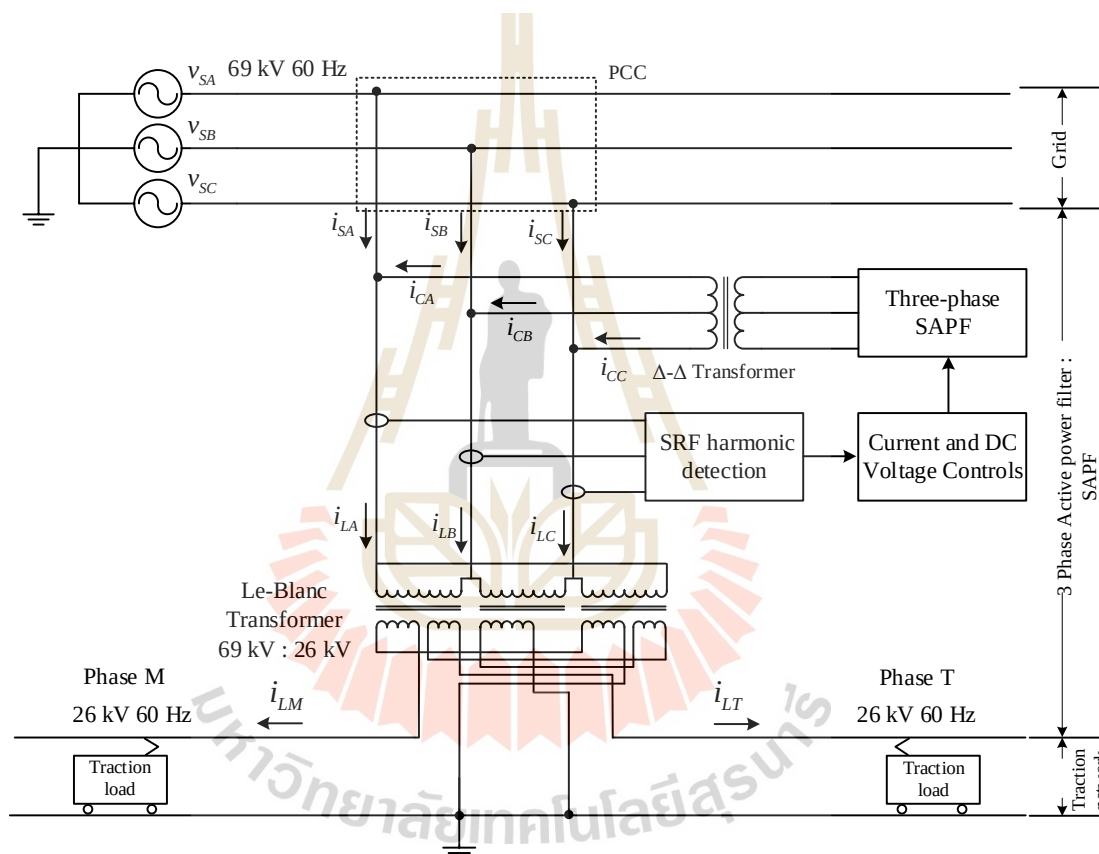
6.1 บทนำ

การจัดหาร่มอนิกในระบบรางไฟฟ้าจากการพิจารณาเลือกใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานการจัดที่ระบบเฟสร่วมตามที่ได้นำเสนอในบทที่ผ่านมาแล้ว ยังสามารถพิจารณาเลือกการจัดหาร่มอนิกที่ระบบสามเฟสได้เช่นกันโดยใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส (Alexander B. and et al., 2013) ซึ่งการใช้วงจรดังกล่าวมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ การตรวจจับหาร่มอนิกในระบบสามเฟสของระบบรางไฟฟ้า การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส และการออกแบบตัวควบคุมกระแสขดเคยและตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ในบทนี้จึงนำเสนอการใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสำหรับการจัดหาร่มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่ตำแหน่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอรบลองค์ (ระบบสามเฟส) โดยเนื้อหาประกอบด้วย หัวข้อที่ 6.2 อธิบายรายละเอียดระบบการจัดหาร่มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส หัวข้อที่ 6.3 อธิบายการตรวจจับหาร่มอนิกด้วยวิธีการบออ้างอิงซึ่งโครนัสสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส หัวข้อที่ 6.4 อธิบายการออกแบบวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสำหรับระบบรางไฟฟ้า หัวข้อที่ 6.5 อธิบายเกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุมของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส หัวข้อที่ 6.6 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การจัดหาร่มอนิก และในหัวข้อที่ 6.7 นำเสนอการเปรียบเทียบการจัดหาร่มอนิกในระบบรางไฟฟ้าระหว่างกรณีที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส และกรณีที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม (วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมตามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 5) โดยจะทำการเปรียบเทียบ 3 ประเด็น คือ ประสิทธิภาพการจัดหาร่มอนิก กำลังงานสูญเสียที่หม้อแปลงไฟฟ้าเลอรบลองค์ และจำนวนและพิกัดอุปกรณ์สำหรับการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟทั้งกรณีวงจร

6.2 ระบบการจัดหาร่มอนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสำหรับระบบรางไฟฟ้า

การจัดหาร่มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 จากรูประบบดังกล่าวประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ โดยส่วนแรก คือ การ

ตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัสหรือวิธี (SRF) สำหรับคำนวณหากระแสอ้างอิงให้กับ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส (บล็อก SRF harmonic detection) ส่วนที่สอง คือ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่เป็นอินเวอร์เตอร์สามเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดันสำหรับทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า (บล็อก Three-phase SAPF) และส่วนสุดท้าย คือ การควบคุมกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (บล็อก Current and DC Voltage controls) ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอเช่นเดียวกับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมที่ได้นำเสนอในบทที่ 5

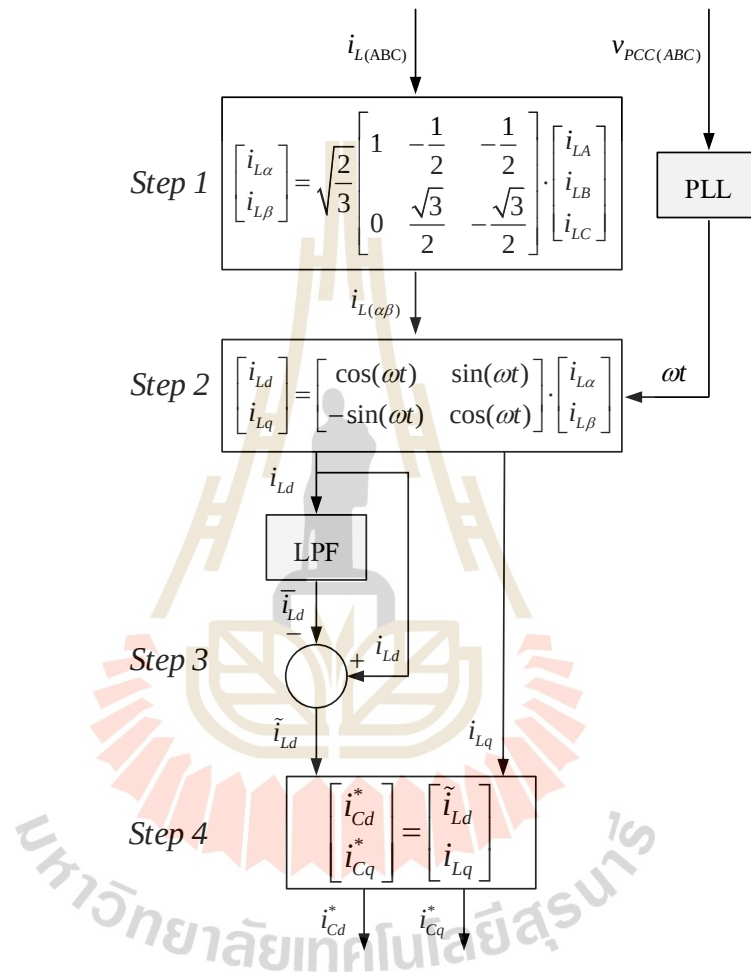


รูปที่ 6.1 ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสำหรับระบบรางไฟฟ้า

6.3 การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส

การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (SRF) สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส (Tekeda and et al., 1988) จะทำหน้าที่คำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงที่อยู่บนแกนดีคิว (i_{cd}^* , i_{cq}^*) เพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงในการควบคุมให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถ

ฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้อง สำหรับขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF สามารถแสดงแผนภาพการคำนวณได้ดังรูป 6.2 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณทั้งหมด 4 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 6.2 แผนภาพการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF สำหรับระบบสามเฟส

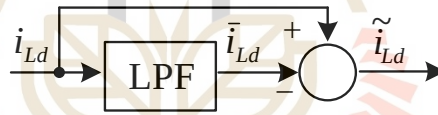
ขั้นตอนที่ 1 ทำการแปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลดสามเฟส (i_{LA}, i_{LB}, i_{LC}) ไปเป็นค่ากระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ โดยใช้สมการที่ (6.1)

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{LA} \\ i_{LB} \\ i_{LC} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

ขั้นตอนที่ 2 ทำการแปลงค่ากระแสโวลต์บนแกน $\alpha\beta$ ไปอยู่บนแกนหมุนดีคิว (i_{Ld}, i_{Lq}) โดยใช้สมการที่ (6.2) โดยที่ค่า $\sin(\theta)$ และ $\cos(\theta)$ ได้จากการคำนวณโดยใช้เทคนิคเฟสล็อกคูลูป (Phase-locked loop: PLL) (Kaura et al, 1997) ที่กำหนดให้หมุนด้วยมุมของแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (v_{PCC})

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

ขั้นตอนที่ 3 ทำการแยกปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่อยู่บนแกนดี ($\tilde{i}_{Ld}$) โดยใช้วิธีการกรองค่ากระแสบนแกนดี (i_{Ld}) ด้วยวงจรกรองผ่านต่ำ (Low Pass filter: LPF) เพื่อหาค่ากระแสที่เป็นปริมาณมูลฐาน ($\bar{i}_{Ld}$) ก่อน และหลังจากนั้นจะนำค่าดังกล่าวไปหักลบกับค่ากระแสบนแกนดีอีกครั้ง เพื่อให้เหลือเฉพาะปริมาณกระแสฮาร์มอนิกตามที่ต้องการ ดังแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 6.3



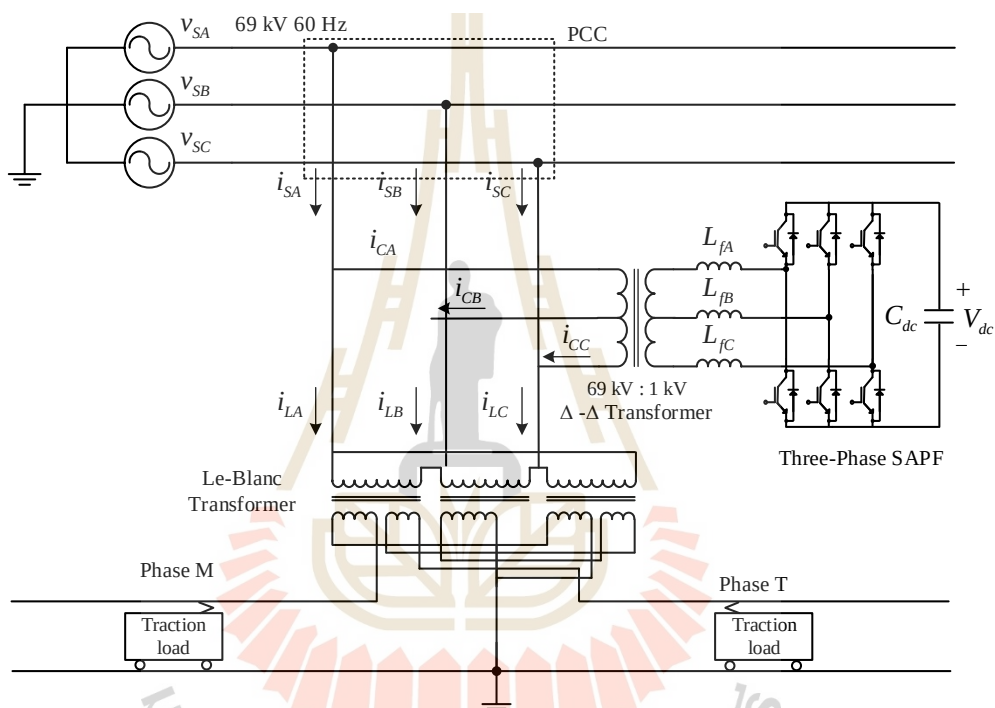
รูปที่ 6.3 การใช้ LPF แยกปริมาณ $\tilde{i}_{Ld}$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่ากระแสอ้างอิงบนแกนดีและคิว (i_{Cd}^* และ i_{Cq}^*) โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับค่ากระแสฮาร์มอนิกบนแกนดี ($\tilde{i}_{Ld}$) และค่ากระแสบนแกนคิว (i_{Lq}) ตามลำดับ ดังสมการที่ (6.3) โดยค่า i_{Cd}^* และ i_{Cq}^* จะถูกนำไปใช้เป็นกระแสอ้างอิงในการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสต่อไป

$$\begin{bmatrix} i_{Cd}^* \\ i_{Cq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

6.4 การออกแบบวงจรกรองกำลังแอททีฟแบบขนานสามเฟสสำหรับระบบรางไฟฟ้า

วงจรกรองกำลังแอททีฟแบบขนานสามเฟสสำหรับใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 6.4 จำเป็นต้องมีการออกแบบค่าพารามิเตอร์ให้มีค่าที่เหมาะสมซึ่งประกอบไปด้วยค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_{fA}, L_{fB}, L_{fC}) ค่าตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) และค่าแรงดันบัลไฟตรง (V_{dc}) โดยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าวสามารถดูได้จากหัวข้อต่อไปนี้



รูปที่ 6.4 วงจรกรองกำลังแอททีฟแบบขนานสามเฟสในระบบรางไฟฟ้า

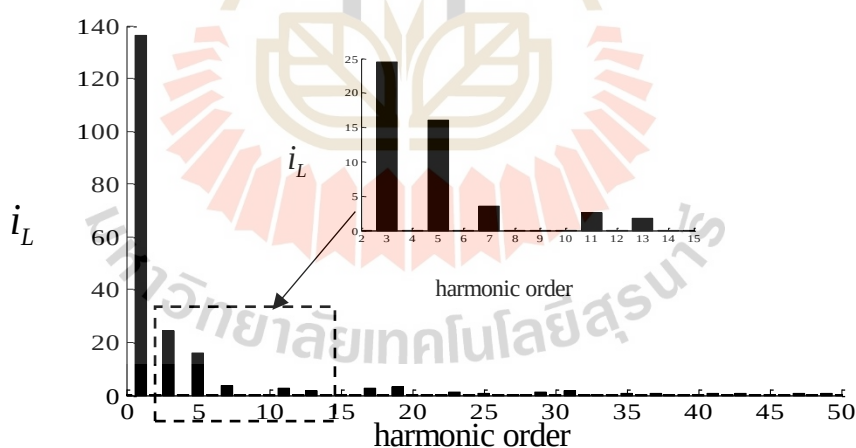
6.4.1 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง

การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_{fA}, L_{fB}, L_{fC}) ของวงจรกรองกำลังแอททีฟแบบขนานสามเฟสจะกำหนดให้ใช้ค่าเท่ากันทั้งสามเฟส โดยยังคงใช้วิธีการออกแบบของ Ingram, D.M.E. and Round, S.D. เช่นเดียวกับการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองสำหรับวงจรกรองกำลังแอททีฟแบบขนานเฟสร่วมในบทที่ผ่านมา ซึ่งจะอาศัยการพิจารณาเลือกค่า L_{fA}, L_{fB}, L_{fC} จากค่าขอบเขตความเหนี่ยวนำสูงสุดของ $L_{f(max)}$ ที่คำนวณได้จาก 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงในการชดเชยสูงสุด หรือค่า $\max(di_c^* / dt)$ ที่มีขนาดสูงสุดโดยอาศัยสมการที่ (5.2) ในบทที่ 5 ซึ่งจากผลกราฟสเปกตรัม

กระแสไหลดสามเฟส (กรณีเฟส A) ที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาดังรูปที่ 6.5 จะพบว่า กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ($f = 180$ Hz) มีขนาดแอมพลิจูดเท่ากับ 24.55 A ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่า $\max(di_c^* / dt)$ ได้เท่ากับ 27765 A/s ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ($f = 300$ Hz) ที่มีขนาดแอมพลิจูดสูงเป็นอันดับสองเท่ากับ 16.07 A สามารถคำนวณค่า $\max(di_c^* / dt)$ ได้มากกว่าเท่ากับ 30291 A/s ดังนั้นการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองในขั้นตอนนี้จะเลือกใช้ค่า $\max(di_c^* / dt)$ ที่เท่ากับ 30291 A/s และเนื่องจากโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานสำหรับกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ามีการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสที่ต่อแบบเดลต้า ($\Delta - \Delta$ transformer) พิกัด (69 kV: 1 kV) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ดังปรากฏในรูปที่ 6.4 ซึ่งการใช้งานหม้อแปลงดังกล่าวจะส่งผลให้ค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่อยู่ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีขนาดกระแสสูงขึ้น 69 เท่า ตามอัตราส่วนแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้น เมื่อคิดผลของหม้อแปลงไฟฟ้าจะสามารถคำนวณค่า $\max(di_c^* / dt)$ ใหม่ได้ค่าเท่ากับ 2090095 A/s ซึ่งสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\max\left(\frac{di_c^*}{dt}\right) = (16.07 \times 69) \times 2\pi \times 300 = 2090095 \text{ A/s}$$



รูปที่ 6.5 สเปกตรัมกระแสไหลดสามเฟส (กรณีเฟส A) ในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิก

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าความเหนี่ยวนำสูงสุด ($L_{f(\max)}$) จากสมการที่ (5.3) ในบทที่ 5 โดยที่ค่าแรงดัน V_{dc} ของวงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานสามเฟสควรออกแบบให้มีค่ามากกว่า 1.5 เท่า ของค่ายอดแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ที่มีค่าเท่ากับ 2121 V (Benchaita, Saadate, and Nai,

1999) ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดใช้ค่า V_{dc} เท่ากับ 2300 V ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณค่า $L_{f(max)}$ ได้เท่ากับ 0.42 mH แสดงได้ดังนี้

$$L_{f(max)} = \frac{2300 - 1414}{2090095} = 0.42 \text{ mH}$$

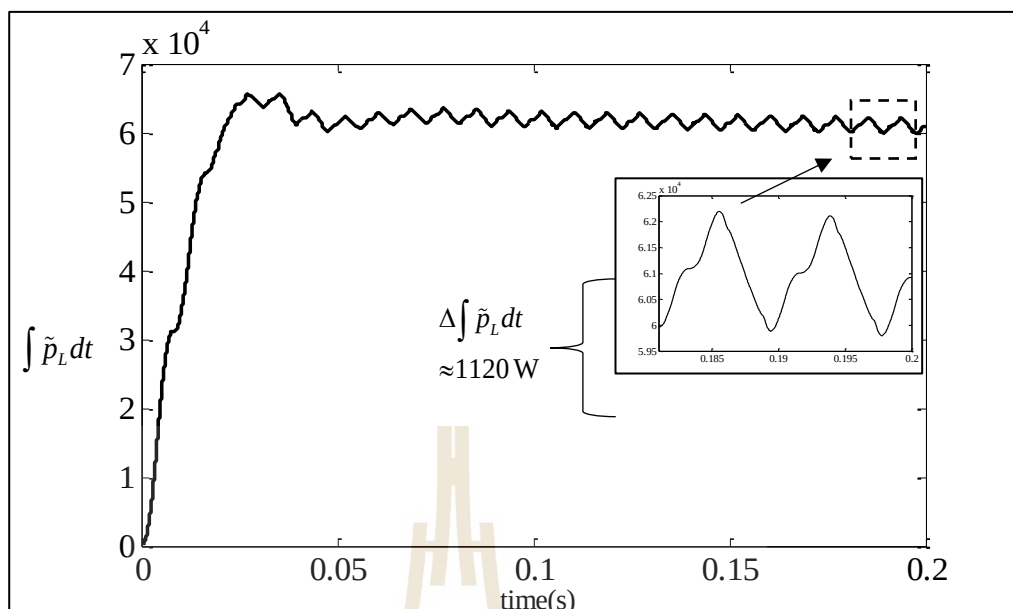
ขั้นตอนที่ 3 เลือกใช้ค่า L_f ที่ไม่เกินค่า $L_{f(max)}$ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของ L_{fA} , L_{fB} และ L_{fC} เท่ากันเท่ากับ 0.05 mH

6.4.2 การออกแบบตัวเก็บประจุดีซี

การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสจะใช้การคำนวณหาค่าขอบเขตต่ำสุดของขนาดตัวเก็บประจุ ($C_{dc(min)}$) ตามวิธีการของ T. Thomas, et al. เช่นเดียวกับการออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.4.2 ของบทที่ 5 โดยสามารถคำนวณหาค่า $C_{dc(min)}$ โดยอาศัย 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่าการกระเพื่อมของผลรวมกำลังแอกทีฟที่โหลด ($\Delta \int \tilde{p}_L dt$) ของระบบรางไฟฟ้าดังแสดงผลในรูปที่ 6.6 จากรูปดังกล่าวค่า $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ จะพิจารณาจากขนาดการกระเพื่อมของเทอมปริพันธ์ผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ($v_{PCC,j}$) กับกระแสฮาร์มอนิกหรือกระแสอ้างอิง ($i_{c,j}^*$) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกทั้งสามเฟส ($j = A, B, C$) ตามสมการที่ 6.4 โดยเมื่อพิจารณาค่า $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ จากรูปที่ 6.6 จะมีค่าประมาณ 1120 W

$$\Delta \int \tilde{p}_L dt = \Delta \left[\int \sum_{j=A,B,C} \{v_{PCC,j} \cdot i_{c,j}^*\} dt \right] \quad (6.4)$$



รูปที่ 6.6 ผลรวมกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่โหลด

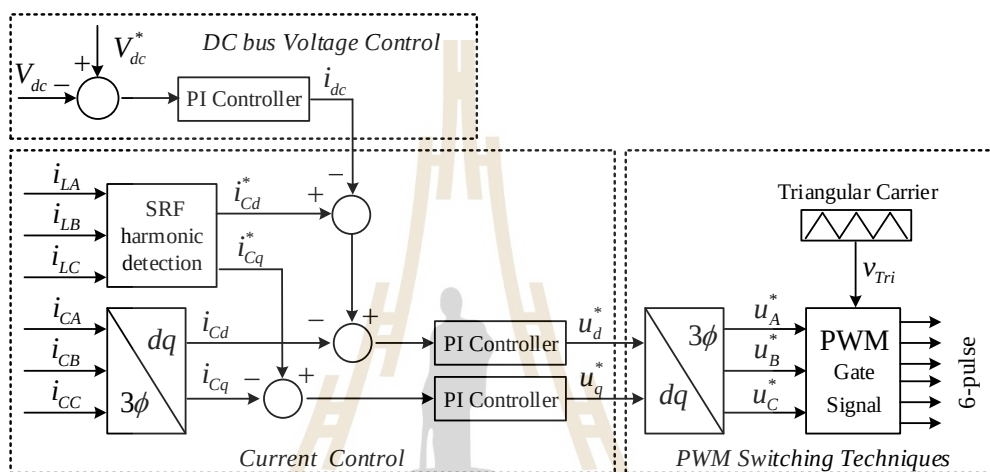
ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่า $C_{dc(min)}$ โดยที่ค่าแรงดันกระเพื่อม ΔV_{dc} ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 46 V เพื่อให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ไม่เกิน 2 % ของแรงดัน V_{dc} (2300 V) จากการกำหนดค่าดังกล่าวจะสามารถคำนวณค่า $C_{dc(min)}$ ตามสมการที่ (5.4) ได้เท่ากับ 10.58 mF แสดงได้ดังนี้

$$C_{dc(min)} = \frac{1120}{46 \times 2300} = 10.58 \text{ mF}$$

ขั้นตอนที่ 3 จากค่า $C_{dc(min)}$ เท่ากับ 10.58 mF ในการคำนวณข้างต้นเพื่อให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟมีประสิทธิภาพที่ดีในการฉีดกระแสชดเชย การเลือกค่า C_{dc} จะต้องเลือกให้มีขนาดมากกว่าค่า $C_{dc(min)}$ ซึ่งขนาดของค่า C_{dc} มีผลต่อค่าแรงดันกระเพื่อมของค่าแรงดันบัสไฟตรง (ΔV_{dc}) โดยการใช้เลือกใช้งานตัวเก็บประจุที่มีขนาดสูงกว่า $C_{dc(min)}$ นั้นสามารถทำให้ค่า ΔV_{dc} มีค่าน้อยลง ในขณะที่ขนาดของเก็บประจุที่สูงขึ้นจะทำให้ราคาของตัวเก็บประจุมีราคาสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสที่มีค่าเท่ากับ 15 mF

6.5 การออกแบบระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานสามเฟส

ระบบควบคุมวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานสามเฟส (Zargari N-R. and Joos G., 1995) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.7 จากรูปดังกล่าวกลยุทธ์การควบคุมประกอบด้วย ระบบควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว (Current Control) ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) ร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบพีดีบีเลียม (PWM) และระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (DC Bus Voltage Control) ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอเช่นกัน โดยการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวสามารถดูได้จากหัวข้อต่อไปนี้



รูปที่ 6.7 ระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานสามเฟส

6.5.1 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีคิว

ระบบควบคุมกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอบนแกนดีคิวสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 6.8 จากรูปดังกล่าว ค่าผลต่างระหว่างกระแสอ้างอิงบนแกนดีคิว (i_{Cd}^* , i_{Cq}^*) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์โมนิกด้วยวิธี SRF และค่ากระแสชดเชยบนแกนดีคิว (i_{Cd} , i_{Cq}) จะถูกป้อนเป็นอินพุตให้กับตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) โดยค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอจะถูกรวบรวมให้เป็นค่าแรงดันอ้างอิง (u_d^* , u_q^*) สำหรับนำไปใช้ควบคุมสวิตช์ไอจีบีทีด้วยเทคนิค PWM ในส่วนต่อไป (ตามรูปที่ 6.7)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมกระแสชดเชยบนแกนดีและคิว จะกำหนดให้ตัวควบคุมเหมือนกัน ซึ่งการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_i ของตัวควบคุมจะใช้วิธีการประมาณโดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิด (Transfer function) ของระบบควบคุมในรูปที่ 6.8 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6.5) กับสัมประสิทธิ์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานดังสมการที่ (5.6)

ในบทที่ 5 ซึ่งผลการเปรียบเทียบจะได้สมการสำหรับใช้ออกแบบค่า K_p และ K_I แสดงดังสมการที่ (6.6) และ (6.7) ตามลำดับ

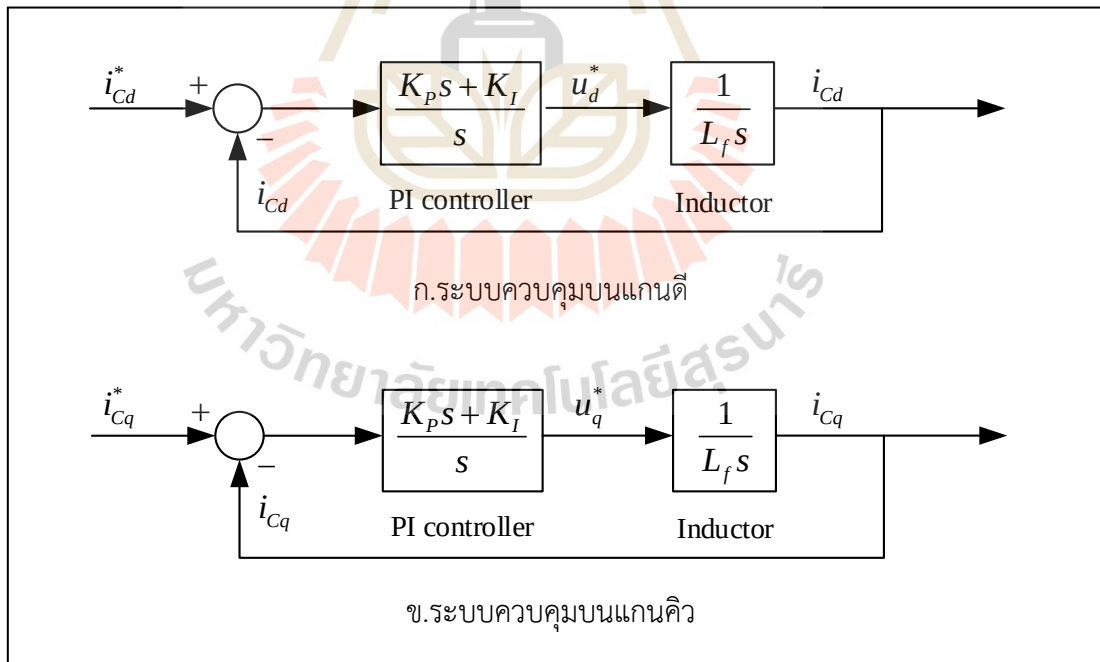
$$\frac{i_{Cd}}{i_{Cd}^*} = \frac{i_{Cq}}{i_{Cq}^*} = \frac{\left(\frac{K_p s + K_I}{L_f} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_p}{L_f} \right) s + \frac{K_I}{L_f}} \quad (6.5)$$

$$K_p = 2\zeta\omega_{ni}L_f \quad (6.6)$$

$$K_I = \omega_{ni}^2 L_f \quad (6.7)$$

โดยที่ ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio)

ω_{ni} คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) สำหรับการควบคุมกระแสบนแกนดีคิว



รูปที่ 6.8 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ

สำหรับค่า ζ จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\sqrt{2}/2$ เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤต (underdamped response) ซึ่งจะทำให้การลู่เข้าของกระแสขดเคียวมีช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) ที่รวดเร็ว และสำหรับการออกแบบค่า ω_{ni} ในที่นี้จะพิจารณาจากอันดับฮาร์มอนิกสูงสุดที่เกิดขึ้นนั่นคือ อันดับที่ 50 ซึ่งมีความถี่เท่ากับ 3000 Hz ดังนั้นค่า ω_{ni} จึงมีค่าเท่ากับ $2\pi \times 3000$ rad/s จากค่าดังกล่าว จะสามารถคำนวณออกแบบค่า K_p และ K_I ได้เท่ากับ 1.33 และ 17765 ตามลำดับ แสดงได้ดังนี้

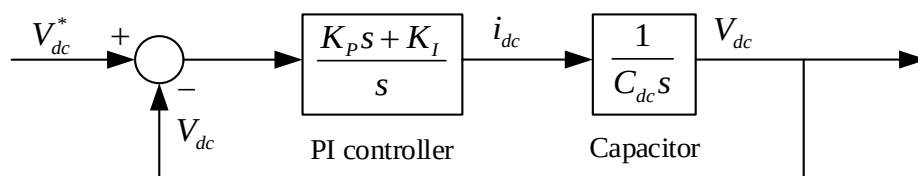
$$K_p = 2 \times 0.707 \times (2\pi \times 3000) \times (0.00005) = 1.33$$

$$K_I = (2\pi \times 3000)^2 \times (0.00005) = 17765$$

โครงสร้างระบบควบคุมกระแสขดเคียวด้วยตัวควบคุมพีไอบนแกนดีคิวได้ถูกออกแบบใช้งานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) ดังแสดงในรูปที่ 6.7 ซึ่งจากรูปดังกล่าว ค่าแรงดันอ้างอิง (u_d^* , u_q^*) ที่ได้จากส่วนของการควบคุมกระแสขดเคียวด้วยตัวควบคุมพีไอ จะถูกแปลงไปอยู่บนแกนสามเฟส (u_A^* , u_B^* , u_C^*) ก่อนนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม (v_{tri}) เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์สำหรับใช้ควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีทีของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส โดยที่ค่า v_{tri} จะทำการออกแบบให้มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 1 และค่าความถี่ที่เท่ากับ 6000 Hz (Thomas, 1998)

6.5.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงสำหรับวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสที่ใช้ตัวควบคุมพีไอสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 6.9 โดยค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) จะถูกนำมาหักลบกับค่าแรงดันอ้างอิง (V_{dc}^*) ที่ได้จากการออกแบบ ซึ่งค่าผลต่างที่ได้จะเป็นค่าอินพุตของตัวควบคุมพีไอ ส่วนค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะกำหนดให้เป็นค่ากระแส i_{dc} จากนั้นจะนำค่า i_{dc} ดังกล่าวไปหักลบกับค่ากระแสอ้างอิงบนแกนดี (i_{Ld}) ดังแสดงในรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.9 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_p และ K_I ของตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะใช้วิธีเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพจน์พหุนามของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดในรูปที่ 6.9 ดังสมการที่ (6.8) และพจน์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานตามสมการที่ (5.6) เช่นกัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบจะได้สมการสำหรับออกแบบค่า K_p และ K_I ของตัวควบคุมแสดงดังสมการที่ (6.9) และ (6.10) ตามลำดับ

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{\left(s + \frac{K_p}{K_I}\right)}{s^2 + \left(\frac{K_p}{C_{dc}}\right)s + \frac{K_I}{C_{dc}}} \quad (6.8)$$

$$K_p = 2\zeta\omega_{nv}C_{DC} \quad (6.9)$$

$$K_I = \omega_{nv}^2 C_{DC} \quad (6.10)$$

โดยที่ ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio)

ω_{nv} คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

สำหรับระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะกำหนด ζ เท่ากับ $\sqrt{2}/2$ เพื่อให้การตอบสนองเป็นแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤตเช่นเดียวกับระบบควบคุมกระแสชดเชย นอกจากนี้ การควบคุมแรงดันบัสไฟตรงไม่จำเป็นต้องมีความรวดเร็วสูงเมื่อเทียบกับรูปแบบการควบคุมกระแสชดเชย ($\omega_{nv} \leq 10\omega_{ni}$) ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดค่า ω_{nv} เท่ากับ 2π rad/s ซึ่งจากค่า ω_{nv} ดังกล่าวจะสามารถคำนวณค่า K_p และ K_I ของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานสามเฟสตามสมการที่ (6.9) และ (6.10) ได้เท่ากับ 0.133 และ 0.592 ตามลำดับแสดงดังต่อไปนี้

$$K_p = 2 \times 0.707 \times 2\pi \times 0.015 = 0.133$$

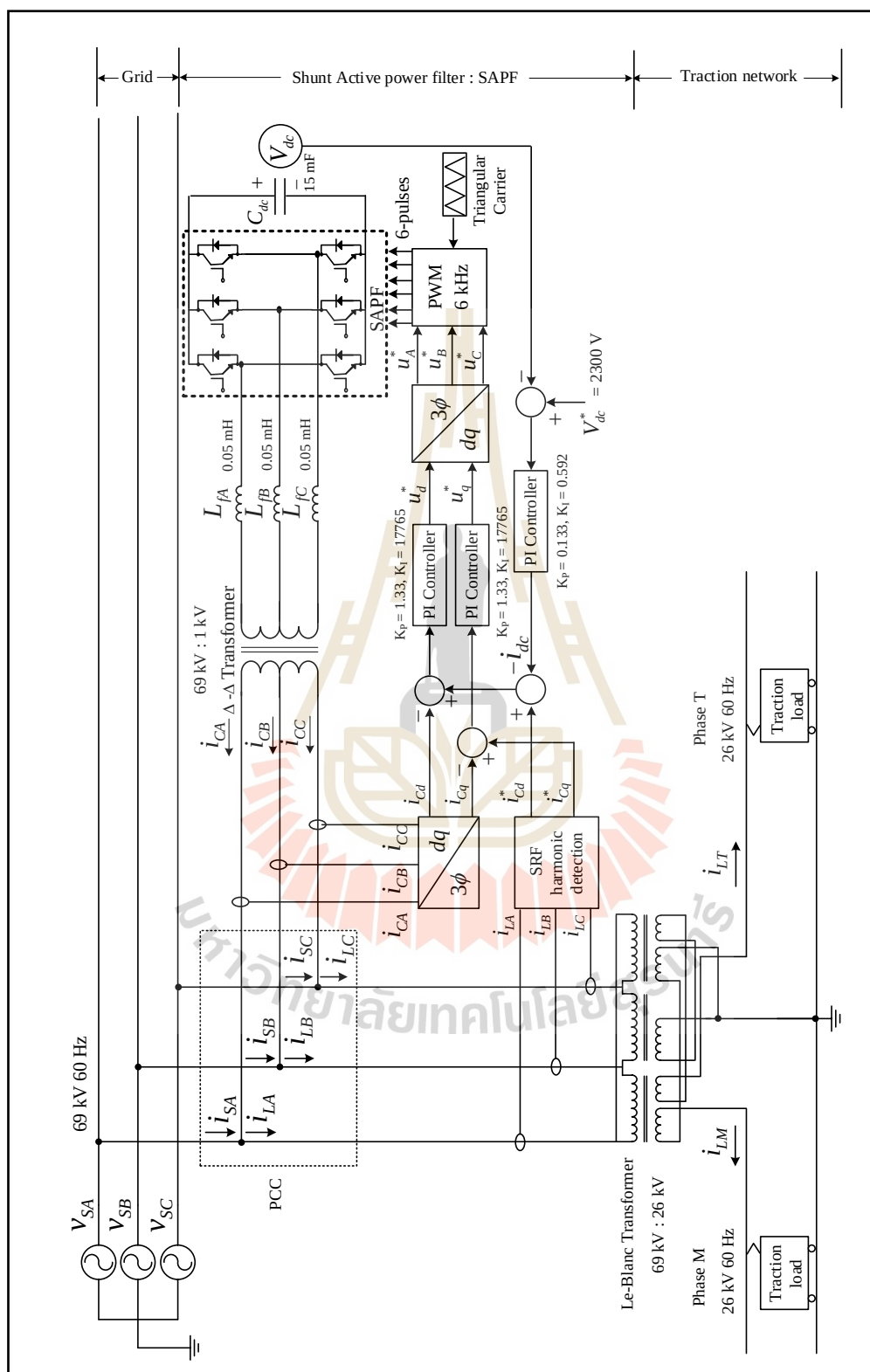
$$K_I = (2\pi)^2 \times 0.015 = 0.592$$

6.6 การจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสมรรถนะของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบ ขนานสามเฟส

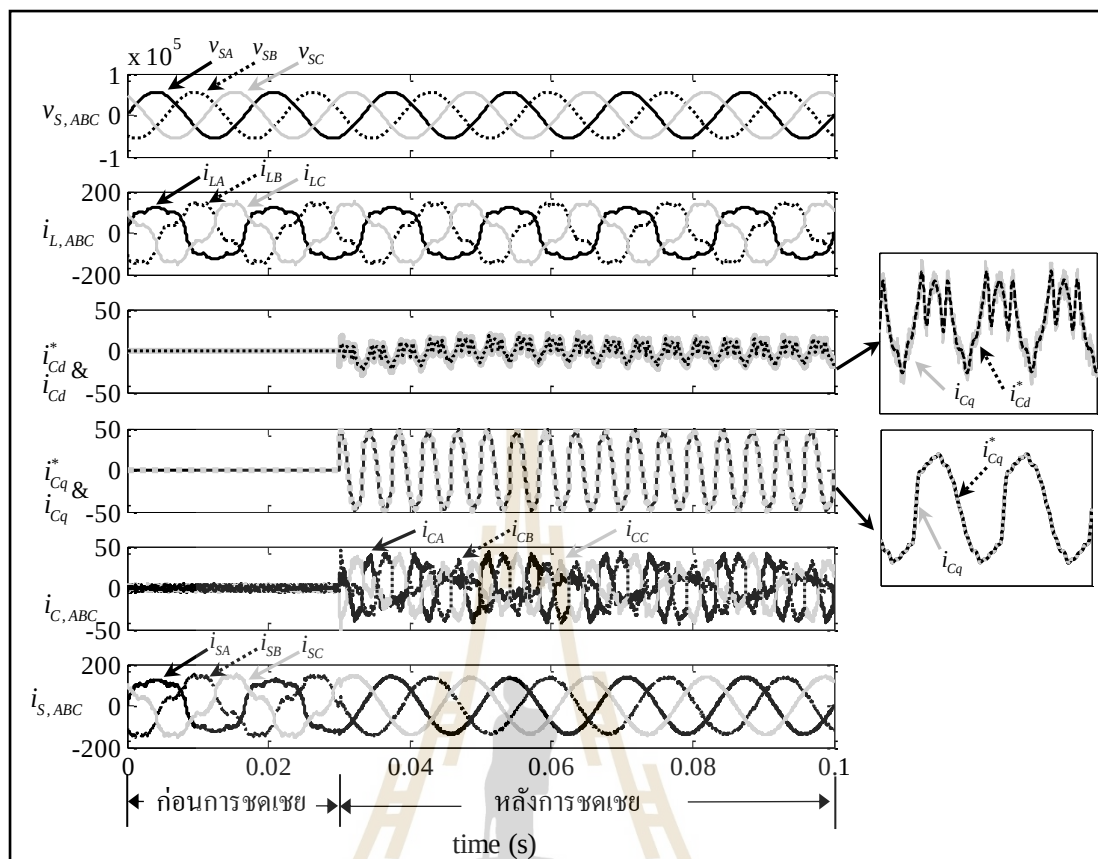
การจำลองสถานการณ์ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองสถานการณ์ทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสและระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบในหัวข้อที่ 6.4 และ 6.5 รวมถึงตรวจสอบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF ตามที่นำเสนอในหัวข้อที่ 6.3 ด้วยเช่นกัน ซึ่งระบบที่ใช้พิจารณาจำลองสถานการณ์ในหัวข้อนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.10 จากรูปดังกล่าว โหลดของระบบรางไฟฟ้าถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าตามข้อมูลตรวจวัดการใช้งานระบบรางไฟฟ้าของประเทศไต้หวัน (Sy-Ruen and Bing-Nan, 2002) เช่นเดียวกับการจำลองสถานการณ์ในบทที่ผ่านมา

ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.11 จากรูปดังกล่าว ในช่วงก่อนการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.03 วินาที เมื่อระบบรางไฟฟ้าได้จ่ายโหลดกระแสไฟฟ้า (i_{LT}, i_{LM}) ที่ฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ จะสังเกตได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่โหลดฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงเลอว์บลองค์ (i_{LA}, i_{LB}, i_{LC}) และกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (i_{SA}, i_{SB}, i_{SC}) มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์เหมือนกัน ซึ่งวัดค่า % THD_i ได้เท่ากับ 22.16 % เท่ากันทั้งสามเฟส และหลังจากนั้นตั้งแต่เวลา 0.03 วินาที เป็นต้นไป เมื่อวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสร่วมกับตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้ทำการฉีดกระแสชดเชยฮาร์มอนิก ($i_{C,ABC}$) ตามการควบคุมให้มีค่าตามกระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF บนแกนดีคิว ($i_{C,d}^*, i_{C,q}^*$) จะพบว่า รูปสัญญาณ i_{SA}, i_{SB} และ i_{SC} มีลักษณะกลับมาเป็นรูปไซน์มากขึ้น โดยวัดค่า % THD_i ภายหลังการชดเชยได้เท่ากับ 2.21 % 2.24 % และ 2.18 % ตามลำดับเฟส นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในส่วนของผลการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ของวงจรรอกกำลังแอกทีฟดังแสดงในรูปที่ 6.12 จะพบว่า ตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบสามารถควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงให้มีเท่ากับ 2300 V ตามค่าอ้างอิงที่กำหนดไว้ได้ โดยมีค่าแรงดันกระแสเพิ่ม (ΔV_{dc}) เท่ากับ 34 V ซึ่งน้อยกว่า 2% ของค่า V_{dc} หรือน้อยกว่า 46 V ตามที่ต้องการ

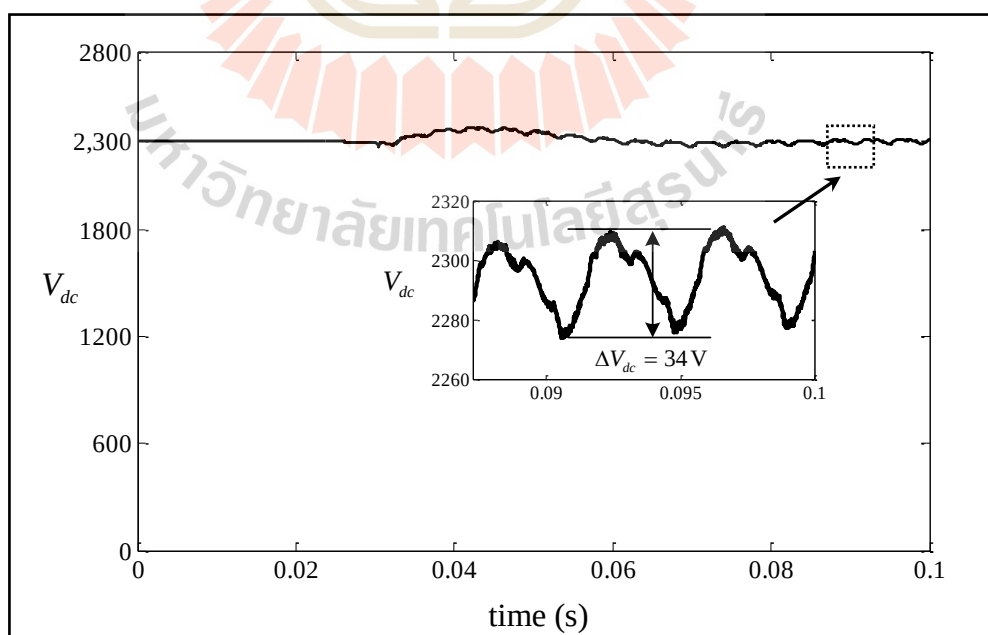
จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวหมายความว่า ระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสร่วมกับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF และระบบควบคุมกระแสชดเชยและแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 6.3 ถึง 6.5 มีสมรรถนะการทำงานที่ดีส่งผลให้การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 6.10 ระบบการจัดหาร่มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยวงจรรอกกำลังแยกที่แบบขนานเฟส



รูปที่ 6.11 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้า



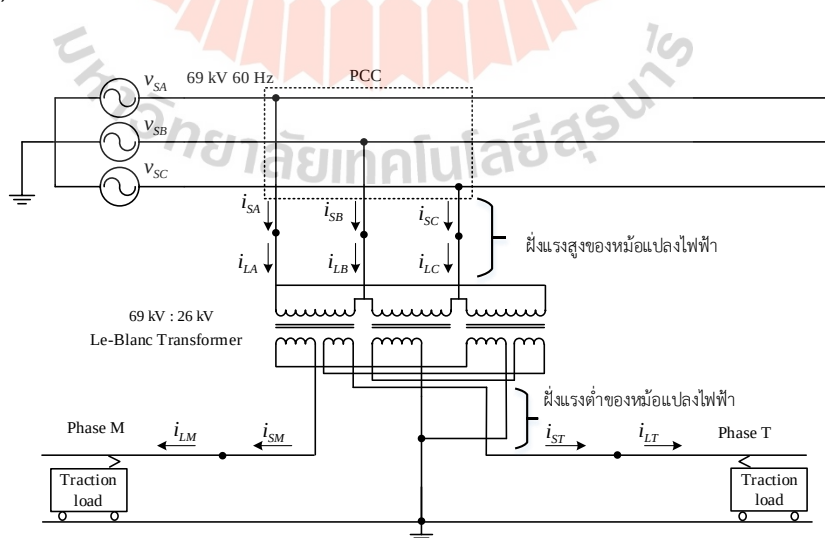
รูปที่ 6.12 ผลการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงของวงจรกรองกำลังแยกทีฟแบบขนานสามเฟส

6.7 การเปรียบเทียบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าระหว่างการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสและการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าระหว่างการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส และกรณีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม โดยการเปรียบเทียบดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 3 ประเด็น คือ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า การเปรียบเทียบค่ากำลังงานสูญเสียที่หม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์หลังทำการฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า และการเปรียบเทียบจำนวนและพิกัดอุปกรณ์สำหรับการสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองรูปแบบ ซึ่งสามารถดูรายละเอียดการเปรียบเทียบในแต่ละประเด็นได้ในหัวข้อต่อไป

6.7.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกจะพิจารณาผลค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายทั้งทางฝั่งแรงสูงและฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ของระบบรางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 6.13 ซึ่งระบบที่พิจารณาในกรณีที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส คือ ระบบในรูปที่ 6.10 ส่วนกรณีที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม คือ ระบบดังรูปที่ 5.15 ในบทที่ 5 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของทั้งสองระบบได้สรุปแสดงไว้ในตารางที่ 6.1 (ค่าพารามิเตอร์ของระบบกรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสได้จากการออกแบบตามที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.3 ถึง 6.5 ส่วนกรณีระบบที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมได้จากการออกแบบในหัวข้อที่ 5.4 ถึง 5.6 ของบทที่ 5)



รูปที่ 6.13 แสดงฝั่งแรงสูงและฝั่งแรงต่ำของระบบรางไฟฟ้า

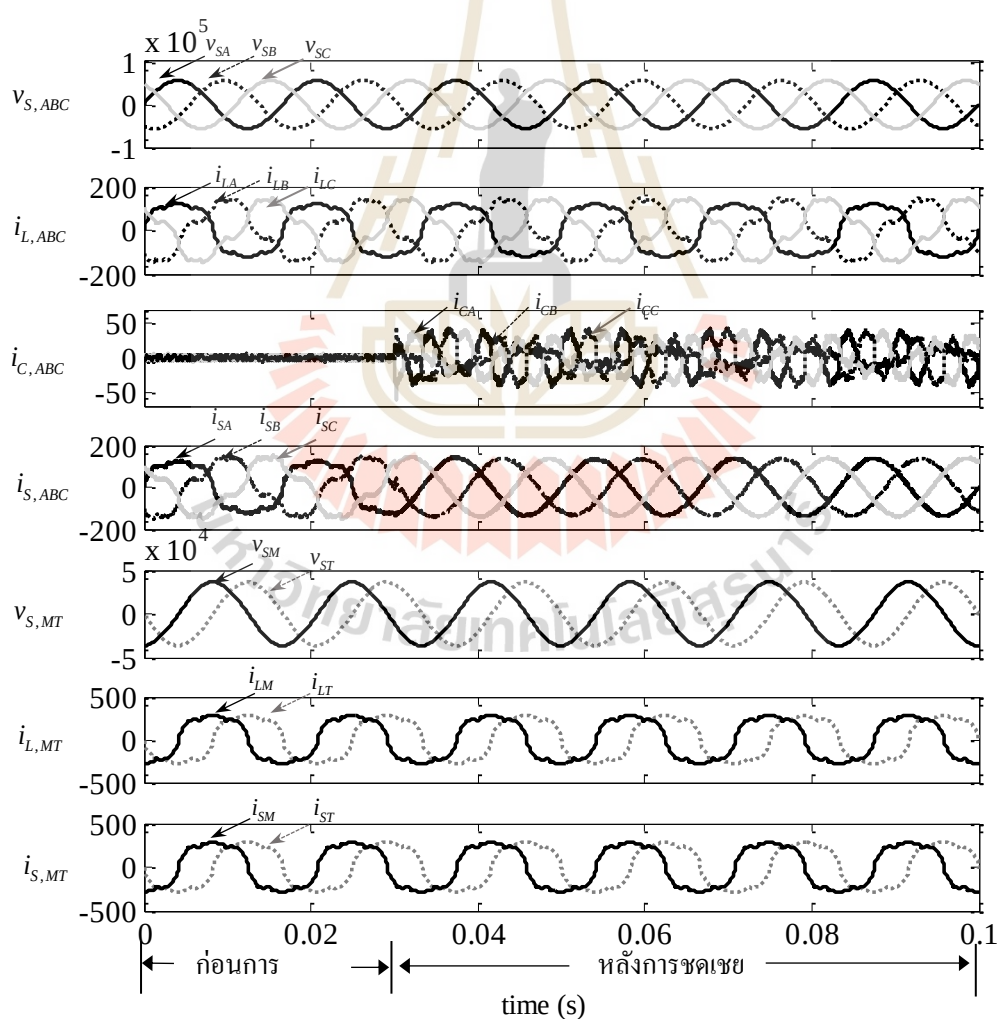
ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบสำหรับทดสอบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้า

ค่าพารามิเตอร์	วงจรรอกกำลังแยกทีฟแบบ ขนานสามเฟส	วงจรรอกกำลังแยกทีฟแบบ ขนานเฟสร่วม
แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก	พิกัด 69 kV 60 Hz	พิกัด 69 kV 60 Hz
หม้อแปลงไฟฟ้า	หม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ พิกัด 69 kV to 26 kV	หม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ พิกัด 69 kV to 26 kV
ระบบแรงไฟฟ้า	โหลดระบบแรงไฟฟ้า 2 เฟส พิกัด 2 x 26 kV 60 Hz (Sy-Ruen and Bing-Nan, 2002) (THD _i = 22.16 %)	โหลดระบบแรงไฟฟ้า 2 เฟส พิกัด 2 x 26 kV 60 Hz (Sy-Ruen and Bing-Nan, 2002) (THD _i = 22.16 %)
การตรวจจับฮาร์มอนิก	วิธี SRF ใช้ LPF ความถี่ตัด 30 Hz	วิธี SRF ใช้ LPF ความถี่ตัด 30 Hz
วงจรรอกกำลังแยกทีฟ แบบขนาน	$V_{dc} = 2300 \text{ V}$, $C_{dc} = 15 \text{ mF}$ $L_{fA} = L_{fB} = L_{fC} = 0.05 \text{ mH}$	$V_{dc} = 1700 \text{ V}$, $C_{dc} = 60 \text{ mF}$ $L_{fM} = L_{fT} = 0.15 \text{ mH}$
หม้อแปลงลดระดับ แรงดัน	หม้อแปลงสามเฟส 1 ตัว พิกัด 69 kV to 1 kV	หม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส 2 ตัว พิกัด 26 kV to 1 kV
การควบคุมการสวิตช์ด้วย เทคนิค PWM	ความถี่สวิตช์ 6000 Hz	ความถี่สวิตช์ 6000 Hz
ตัวควบคุมกระแสชดเชย	ตัวควบคุมพีไอ $K_p = 1.33$, $K_i = 17765$	ตัวควบคุมพีไอ $K_p = 4$, $K_i = 53300$
ตัวควบคุมแรงดัน บัสไฟตรง	ตัวควบคุมพีไอ $K_p = 0.133$, $K_i = 0.592$	ตัวควบคุมพีไอ $K_p = 0.267$, $K_i = 0.592$

กรณีศึกษาที่ 1 การใช้วงจรรอกกำลังแยกทีฟแบบขนานสามเฟส

จากระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยวงจรรอกกำลังแยกทีฟแบบขนานสามเฟสดังรูปที่ 6.10 ที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรและระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ตามตารางที่ 6.1 สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 6.14 จากรูปดังกล่าวในช่วงเวลา 0 ถึง 0.03 วินาที เมื่อพิจารณาทางฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ จะสังเกตได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC}) และค่ากระแสไฟฟ้าโหลดที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์

(i_{LA}, i_{LB}, i_{LC}) มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์เหมือนกัน ซึ่งวัดค่า %THD_i ได้เท่ากับ 22.16 % และเมื่อพิจารณาทางฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ที่ต่อเข้ากับโวลตรางไฟฟ้าทั้งสองเฟส (เฟส M และเฟส T) จะเห็นว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกจากหม้อแปลงเลอว์บลองค์ (i_{SM}, i_{ST}) และค่ากระแสไฟฟ้าที่โวลตรางไฟฟ้า (i_{LM}, i_{LT}) นั้นมีลักษณะรูปสัญญาณบิดเบี้ยวเหมือนกัน โดยวัดค่า %THD_i ได้เท่ากับ 22.16 % จากนั้นตั้งแต่เวลา 0.03 วินาที เป็นต้นไป เมื่อวงจรรอกำลังแยกที่ฟแบบขนานสามเฟสฉีดกระแสชดเชย (i_{CA}, i_{CB}, i_{CC}) เข้าที่จุด PCC ทางฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ พบว่า รูปสัญญาณของ i_{SA}, i_{SB}, i_{SC} มีลักษณะกลับมาเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้นโดยค่า %THD_i ภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเหลือเท่ากับ 2.03 % 1.96 % และ 1.97 % สำหรับเฟส A เฟส B และเฟส C ตามลำดับ ในขณะที่ทางฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้ารูปสัญญาณของ i_{SM}, i_{ST} ภายหลังการชดเชยยังคงมีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นไซน์เช่นเดิมที่ค่า %THD_i เท่ากับ 22.16 % ทั้งเฟส M และเฟส T



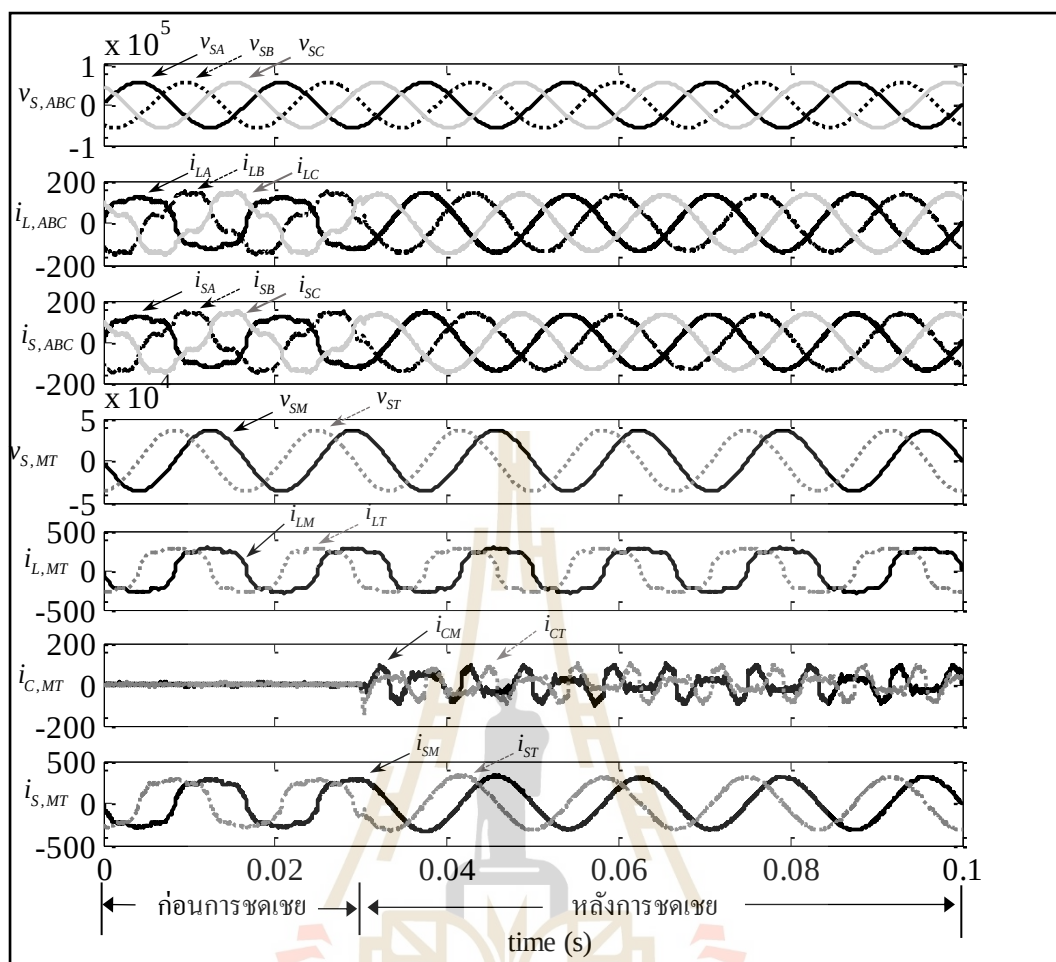
รูปที่ 6.14 ผลการกำจัดฮาร์โมนิกกรณีใช้วงจรรอกำลังแยกที่ฟแบบขนานสามเฟส

จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสามารถกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าทางฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอ์บลองค์ให้มีปริมาณลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสจะไม่ส่งผลให้ปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทางฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอ์บลองค์ลดลงได้

กรณีศึกษา 2 การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม

จากระบบกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมดังรูปที่ 5.15 ร่วมกับการใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรและระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 6.3 สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกทั้งทางฝั่งแรงสูงและทางฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอ์บลองค์ในระบบได้ดังรูปที่ 6.15 จากรูปดังกล่าว เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมฉีดกระแสชดเชย (i_{CM} , i_{CT}) เข้าที่จุดที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกทางฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอ์บลองค์ตั้งแต่เวลา 0.03 วินาที เป็นต้นไป สังเกตได้ว่า รูปสัญญาณของ i_{SM} , i_{ST} ทางฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอ์บลองค์กลับมามีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยวัดค่า %THD_i ภายหลังการชดเชยได้ค่าเท่ากับ 1.78 % เท่ากันทั้งเฟส M และ เฟส T และเมื่อเมื่อพิจารณาทางฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอ์บลองค์จะเห็นได้ว่ารูปสัญญาณของ i_{SA} i_{SB} และ i_{SC} สามารถมีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยวัด %THD_i ภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงเหลือเท่ากับ 1.79 % 1.80 % และ 1.78 % ตามลำดับ





รูปที่ 6.15 ผลการจำลองสถานการณ์กรณีการใช่วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม

จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว พบว่า การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม สามารถกำจัดฮาร์มอนิกทั้งทางฝั่งแรงสูงและทางฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลอนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการจำลองสถานการณ์ในช่วงต้นเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกพบว่า กรณีการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟขนานเฟสร่วมที่ฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลอนด์สามารถกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งทางฝั่งแรงสูงและทางฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลอนด์ ในขณะที่กรณีการใช่วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสที่ฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลอนด์นั้นสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้เฉพาะทางฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลอนด์เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่า ผลการกำจัดฮาร์มอนิกทางฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลอนด์ในกรณีการใช่วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก (%)

THD) ที่ดีกว่ากรณีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสด้วยเช่นกัน (แสดงผลการเปรียบเทียบค่า % THD_i ไว้ในตารางที่ 6.13)

6.7.2 การเปรียบเทียบค่ากำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์

กำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า (P_{Loss}) สามารถพิจารณาได้จาก 2 ส่วน โดยส่วนที่หนึ่ง คือ กำลังงานสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No-Load loss: P_{NL}) การสูญเสียนี้จะเกิดขึ้นที่แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าหรือเรียกว่า กำลังงานสูญเสียที่แกนเหล็ก (Core Loss) ซึ่งจะมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่จะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กบนแกนเหล็ก ความถี่ และลักษณะรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้า (IEEE Std C57.12.91 2011) ส่วนที่สอง คือ กำลังงานสูญเสียขณะมีโหลด (Load Loss: P_{LL}) โดยค่ากำลังงานสูญเสียในส่วนนี้จะเกิดขึ้นเมื่อหม้อแปลงมีการจ่ายโหลดซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (6.11)

$$P_{LL} = P_C + P_{EC} + P_{OSL} \quad (6.11)$$

โดยที่ P_C คือ กำลังงานสูญเสียในขดลวดทองแดงของหม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่ในรูปการคำนวณ I^2R

P_{EC} คือ กำลังงานสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy-current loss)

P_{OSL} คือ กำลังงานสูญเสียทางกลอื่น ๆ (other stray loss)

อย่างไรก็ตามเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีการจ่ายโหลดที่มีค่ากระแสฮาร์มอนิกปะปนจะส่งผลให้การคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วยตามมาตรฐาน IEEE Std C57.11-2018 โดยค่ากำลังงานสูญเสียขณะมีโหลดกรณีที่มีปริมาณกระแสฮาร์มอนิก (P_{LL-H}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.12)

$$P_{LL-H} = P_{C-H} + (P_{EC} \times F_{HL}) + (P_{OSL} \times F_{HL-STR}) \quad (6.12)$$

โดยที่ P_{C-H} คือ กำลังงานสูญเสียในขดลวดทองแดงของหม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่ในรูปการคำนวณ I^2R กรณีมีปริมาณฮาร์มอนิก

F_{HL} คือ ตัวประกอบการสูญเสียทางฮาร์มอนิก (harmonic loss factor) สำหรับการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน

F_{HL-STR} คือ ตัวประกอบการสูญเสียทางฮาร์มอนิกสำหรับการสูญเสียทางกลอื่น ๆ

จากสมการที่ (6.12) การคำนวณหาค่า P_{C-H} และค่าตัวประกอบกำลังการสูญเสีย F_{HL} และ F_{HL-STR} สามารถหาได้จากสมการที่ (6.13) ถึง (6.15) ตามลำดับ (IEEE Std C57.12.91 2011)

$$P_{C-H} = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_{h,HV}^2 R_{HV}) + \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_{h,LV}^2 R_{LV}) \quad (6.13)$$

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (6.14)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (6.15)$$

โดยที่ h	คือ	อันดับฮาร์โมนิก
$h_{\max}$	คือ	อันดับฮาร์โมนิกสูงสุดที่พิจารณา
I_h	คือ	ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่อันดับฮาร์โมนิกใด ๆ
I_1	คือ	ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ความถี่มูลฐาน
R_{HV}	คือ	ความต้านทานรวมของขดลวดทางฝั่งแรงสูง
R_{LV}	คือ	ความต้านทานรวมของขดลวดทางฝั่งแรงต่ำ

และสำหรับการคำนวณหาค่า P_{EC} และค่า P_{OSL} สามารถหาได้จากสัดส่วนการกระจายตัวของค่ากำลังงานสูญเสียทางกลทั้งหมด (Total Stray Loss: P_{TSL-R}) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า (IEEE Std C57.11-2018) โดยสำหรับหม้อแปลงชนิดแห้ง (Dry-Type Transformer) แสดงได้ดังตารางที่ 6.2 และสำหรับหม้อแปลงชนิดของเหลว (Liquid-Immersed Transformer) แสดงได้ดังตารางที่ 6.3 โดยการหาค่า P_{TSL-R} จะได้จากคำนวณโดยใช้สมการที่ (6.16) และความสัมพันธ์ระหว่าง P_{TSL-R} , P_{EC} และ P_{OSL} จะเป็นไปตามสมการที่ (6.17)

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - K \left[(I_{HV-R})^2 \times R_{DC-HV} + (I_{LV-R})^2 \times R_{DC-LV} \right] \quad (6.16)$$

$$P_{TSL-R} = P_{EC} + P_{OSL} \quad (6.17)$$

โดยที่ P_{LL-R} คือ กำลังงานสูญเสียที่โหลดตามค่าพิกัด

K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้า: ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสและเท่ากับ 1.5 สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส

I_{HV-R} คือ กระแสไฟฟ้ามูลฐานที่ค่าพิกัดทางฝั่งแรงสูงของหม้อแปลง

I_{LV-R} คือ กระแสไฟฟ้ามูลฐานที่ค่าพิกัดทางฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลง

R_{DC-HV} คือ ความต้านทานกระแสตรงที่วัดจากขดลวดทางฝั่งแรงสูง

R_{DC-LV} คือ ความต้านทานกระแสตรงที่วัดจากขดลวดทางฝั่งแรงต่ำ

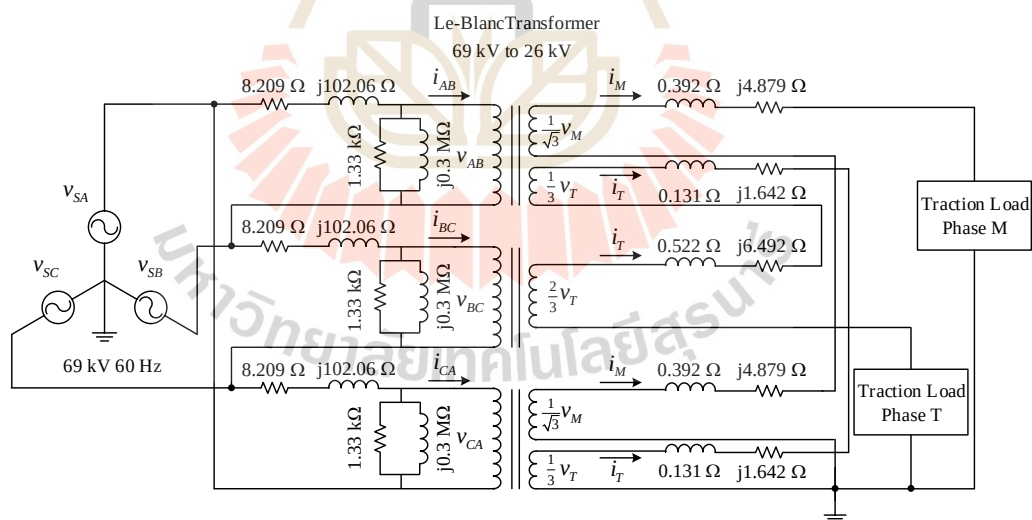
ตารางที่ 6.2 สัดส่วนการกระจายตัวของค่า P_{TSL-R} สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดแห้ง

อัตราส่วนหม้อแปลง [HV:LV]	P_{EC}		P_{OSL}
	ฝั่งแรงต่ำ	ฝั่งแรงสูง	
$\leq 4:1$	20 %	15 %	65 %
$> 4:1$	25 %	10 %	65 %

ตารางที่ 6.3 สัดส่วนการกระจายตัวของค่า P_{TSL-R} สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดของเหลว

พิกัดกำลังของหม้อ แปลงไฟฟ้า [kVA]	P_{EC}		P_{OSL}
	ฝั่งแรงต่ำ	ฝั่งแรงสูง	
< 300	55 %	5 %	40 %
> 300 ≤ 1000	40 %	10 %	50 %
> 1000 ≤ 3000	20 %	10 %	70 %
> 3000	25 %	15 %	60 %

สำหรับการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสและกรณีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมกำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้า จะเริ่มต้นพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงเลอว์บลองค์ (Ruen Huang and et. al, 2001) ดังแสดงในรูป 6.16 จากรูปดังกล่าว จะเห็นว่าโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์มาจากการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเชิงเส้นหนึ่งเฟส จำนวน 3 ตัวเชื่อมต่อกัน โดยทางฝั่งแรงสูง (ฝั่งสามเฟส ABC) จะทำการต่อขดลวดแบบเดลต้า ส่วนทางฝั่งแรงต่ำ (ฝั่งสองเฟส MT) จะทำการต่อขดลวดเพื่อทำให้อัตราส่วนการใช้กระแสไฟฟ้าทางฝั่งสามเฟสนั้นมีลักษณะสมดุลตามที่อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งเมื่อพิจารณาระบบแรงไฟฟ้าในที่นี้มีโหนดกระแสของเฟส M (i_M) และ เฟส T (i_T) เท่ากัน จะส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า i_{AB} i_{BC} และ i_{CA} มีค่าเท่ากันด้วยตามคุณสมบัติของหม้อแปลงเลอว์บลองค์ ดังนั้นในการคำนวณจะกำหนดให้ค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งสามเฟส i_{AB} i_{BC} และ i_{CA} มีค่าเท่ากัน แทนด้วยกระแสไฟฟ้าฝั่งแรงสูง ($I_{h,HV}$) และค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งแรงต่ำ (i_T) และ (i_M) มีค่าเท่ากัน แทนด้วย ($I_{h,LV}$) จากการกำหนดค่าดังกล่าว การคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียที่หม้อแปลงเลอว์บลองค์กรณีที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสและกรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.16 วงจรสมมูลแสดงค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์
(Ruen Huang and et. al, 2001)

กรณีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส

ภายหลังการชดเชยกำลังฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส สามารถแสดงผลการตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหม้อแปลงเลอว์บลองค์ทางฝั่งแรงสูง ($I_{h,HV}$) และฝั่งแรงต่ำ ($I_{h,LV}$) ในแต่ระดับแสดงได้ดังตารางที่ 6.6 จากค่ากระแสในตารางดังกล่าวสามารถอธิบายและแสดงการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ต่อจากนี้

การคำนวณหาค่า P_{TSL-R}

การคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์จะเริ่มต้นจากการคำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียทางกลทั้งหมดหรือค่า P_{TSL-R} ตามสมการ (6.16) โดยค่ากำลังงานสูญเสียที่โหลดตามค่าพิกัด (P_{LL-R}) ได้จากผลการทดสอบลัดวงจร (Short circuit test) ของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 57510 W (Ruen Huang and et. al, 2001) แสดงได้ดังตารางที่ 6.5 ส่วนค่าคงที่ K สำหรับกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์มีค่าเท่ากับ 1.5 (พิจารณาเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส) สำหรับค่าความต้านทานกระแสตรง (R_{DC-HV} , R_{DC-LV}) จะมีค่าเท่ากับ 2/9 เท่าของความต้านทานฝั่งสามเฟสสำหรับกรณีหม้อแปลงที่ต่อแบบเดลต้า และมีค่าเท่ากับ 2/3 เท่าของความต้านทานฝั่งสามเฟสสำหรับกรณีหม้อแปลงที่ต่อแบบวาย (IEEE Std C57.11-2018) ดังนั้นในกรณีหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์จะได้ R_{DC-HV} เท่ากับ $(2/9) \times 8.209 = 1.82 \Omega$ (ฝั่งแรงสูงต่อแบบเดลต้า) และ R_{DC-LV} เท่ากับ $(2/3) \times 0.522 = 0.348 \Omega$ (ประมาณว่าขดลวดฝั่งแรงต่ำต่อแบบวาย) และสำหรับค่า I_{HV-R} และค่า I_{LV-R} สามารถคำนวณจากพิกัดกำลังไฟฟ้า (S) และพิกัดแรงดัน (V_{HV-R} , V_{LV-R}) ของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ ซึ่งในที่นี้กำหนดพิกัดค่า S เท่ากับ 10 MVA ค่า V_{HV-R} เท่ากับ 69 kV ค่า V_{LV-R} เท่ากับ 26 kV (Sy-Ruen H. and Bing-Nan C., 2002) ดังนั้น จะสามารถคำนวณค่า I_{HV-R} ได้เท่ากับ 83.67 A และค่า I_{LV-R} ได้เท่ากับ 222.06 A แสดงได้ดังนี้

$$\text{จาก} \quad S = \sqrt{3} V_{HV-R} I_{HV-R}$$

$$\text{จะได้} \quad I_{HV-R} = \frac{10000}{\sqrt{3} \times 69} \frac{\text{kVA}}{\text{kV}}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad I_{HV-R} = 83.67 \text{ A}$$

$$\text{และจาก} \quad S = \sqrt{3} V_{LV-R} I_{LV-R}$$

$$\text{จะได้} \quad I_{LV-R} = \frac{10000}{\sqrt{3} \times 26} \frac{\text{kVA}}{\text{kV}}$$

ดังนั้น $I_{LV-R} = 222.06 \text{ A}$

จากค่า I_{HV-R} และ I_{LV-R} ในข้างต้นสามารถคำนวณค่า P_{TSL-R} โดยใช้สมการที่ (6.16) แสดงได้ดังนี้

จาก
$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - K \left[(I_{HV-R})^2 \times R_{DC-HV} + (I_{LV-R})^2 \times R_{DC-LV} \right]$$

จะได้
$$P_{TSL-R} = 57510 - 1.5 \left[(83.67)^2 \times 1.82 + (222.06)^2 \times 0.348 \right]$$

ดังนั้น $P_{TSL-R} = 12659 \text{ W}$

การคำนวณหาค่า P_{OSL} และค่า P_{EC}

การคำนวณค่า P_{OSL} จะพิจารณาจากสัดส่วนการกระจายตัวของกำลังงานสูญเสียทางกลทั้งหมด (P_{TSL-R}) ที่ปรากฏในตารางที่ 6.2 และ 6.3 โดยเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าเลอร็บลองค์เป็นหม้อแปลงชนิดของเหลวและมีพิกัดเท่ากับ 10 MVA (Huang S.-R., 2002) ดังนั้นค่า P_{OSL} จะมีสัดส่วนเป็น 60 % ของค่า P_{TSL-R} ดังแสดงในตารางที่ 6.3

จาก
$$P_{OSL} = P_{TSL-R} \times 0.6$$

จะได้
$$P_{OSL} = 12659 \times 0.6 = 7595 \text{ W}$$

จากค่า P_{TSL-R} และ P_{OSL} สามารถคำนวณหาค่า P_{EC} ได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (6.17) แสดงดังนี้

จาก
$$P_{EC} = P_{TSL-R} - P_{OSL}$$

จะได้
$$P_{EC} = 12659 - 7595 = 5064 \text{ W}$$

ตารางที่ 6.4 ผลการตรวจวัดกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์กรณีใช้วงจรกรองกำลัง
แอกทีฟแบบขนานสามเฟส

Harm onic order (h)	I_{h-HV} (A)	I_{h-LV} (A)	I_{h-HV}^2 (A)	I_{h-LV}^2 (A)	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$
1	18.52	73.77	342.9904	5442.0129	1	1	1
3	3.34	13.30	11.1556	176.8900	0.032513	0.292615	0.078298
5	2.19	8.70	4.7961	75.6900	0.013927	0.348179	0.050471
7	0.48	1.92	0.2304	3.6864	0.000678	0.033224	0.003216
11	0.35	1.41	0.1225	1.9881	0.000365	0.044110	0.002482
13	0.24	0.96	0.0576	0.9216	0.000169	0.028639	0.001319
17	0.35	1.41	0.1225	1.9881	0.000365	0.105353	0.003516
19	0.42	1.66	0.1764	2.7556	0.000509	0.183832	0.005369
23	0.19	0.74	0.0361	0.5476	0.000102	0.053741	0.001248
25	0.10	0.42	0.0100	0.1764	0.000032	0.019955	0.000419
29	0.14	0.54	0.0196	0.2916	0.000054	0.045714	0.000804
31	0.21	0.87	0.0441	0.7569	0.000127	0.122304	0.001985
35	0.10	0.38	0.0100	0.1444	0.000027	0.033224	0.000466
37	0.10	0.38	0.0100	0.1444	0.000027	0.037130	0.000487
41	0.09	0.35	0.0081	0.1225	0.000023	0.037854	0.000439
43	0.07	0.29	0.0049	0.0841	0.000015	0.027936	0.000306
47	0.09	0.35	0.0081	0.1225	0.000023	0.049743	0.000490
49	0.10	0.42	0.0100	0.1764	0.000032	0.076660	0.000718
Σ	27.08	107.87	359.92	5708.07	1.048984	2.540213	1.152036

ตารางที่ 6.5 การทดสอบเปิดวงจรและลัดวงจรของหม้อแปลงเลอว์บลองค์(Ruen Huang and et. al, 2001)

ประเภทการทดสอบ	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังงานสูญเสีย (W)
การทดสอบลัดวงจร	6060	83.70	57510
การทดสอบเปิดวงจร	69000	0.399	10720

การคำนวณหาค่า F_{HL} และค่า F_{HL-STR}

การคำนวณค่า F_{HL} และค่า F_{HL-STR} ตามสมการที่ (6.14) และ (6.15) จะใช้ผลการ

คำนวณค่า $\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2$ ค่า $\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2$ และค่า $\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^{0.8}$ ในตารางที่ 6.4 ซึ่งจากค่าดังกล่าวสามารถคำนวณค่า F_{HL} เท่ากับ 2.421594 และค่า F_{HL-STR} เท่ากับ 1.098240 แสดงได้ดังนี้

จาก

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2}$$

จะได้

$$F_{HL} = \frac{2.540213}{1.048984} = 2.421594$$

และจาก

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2}$$

จะได้

$$F_{HL-STR} = \frac{1.152036}{1.048984} = 1.098240$$

การคำนวณค่า P_{C-H}

จากผลการตรวจวัดกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ตามตารางที่ 6.4 และค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ในรูปที่ 6.16 ค่าความต้านทานรวมของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถหาได้จากผลรวมความต้านทานทั้งสามเฟสต่อแบบอนุกรม ซึ่งจะได้ความต้านทานรวมทางฝั่งแรงสูง (R_{HV}) เท่ากับ $8.209+8.209+8.209=24.63\ \Omega$ และค่าความต้านทานรวมฝั่งแรงต่ำ (R_{LV}) เท่ากับ $0.392+0.131+0.522+0.392+0.131=1.57\ \Omega$ จากค่าดังกล่าวจะสามารถคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในขดลวดทองแดงของหม้อแปลงไฟฟ้ากรณีมีปริมาณฮาร์มอนิก (P_{C-H}) ตามสมการที่ (6.13) ได้เท่ากับ 17826.5 W แสดงได้ดังนี้

$$\text{จาก} \quad P_{C-H} = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_{h,HV}^2 R_{HV}) + \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_{h,LV}^2 R_{LV})$$

$$\text{จะได้} \quad P_{C-H} = R_{HV} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_{h,HV}^2) + R_{LV} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_{h,LV}^2)$$

$$P_{C-H} = 24.63 \times 359.82 + 1.57 \times 5708.07$$

$$P_{C-H} = 17827\text{ W}$$

การคำนวณค่า P_{LL-H}

จากผลการคำนวณค่า P_{C-H} P_{OSL} P_{EC} F_{HL} และค่า F_{HL-STR} ในข้างต้นจะสามารถคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียขณะมีโหลดหรือค่า P_{LL-H} ของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ในกรณีใช้วงจรกรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานสามเฟสได้ โดยใช้สมการที่ (6.12) ได้เท่ากับ 38431 W แสดงได้ดังนี้

$$\text{จาก} \quad P_{LL-H} = P_{C-H} + (P_{EC} \times F_{HL}) + (P_{OSL} \times F_{HL-STR})$$

$$\text{จะได้} \quad P_{LL-H} = 17827 + (5064 \times 2.421594) + (7595 \times 1.098240)$$

$$P_{LL-H} = 38431\text{ W}$$

การคำนวณหาค่า $\sum P_{loss}$

การคำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมด ($\sum P_{loss}$) ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์ในกรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสามารถคำนวณได้จากผลรวมของค่ากำลังงานสูญเสียขณะไม่มีโหลด (P_{NL}) และค่ากำลังงานสูญเสียขณะมีโหลด (P_{LL-H}) กรณีมีกระแสฮาร์โมนิกปะปน โดยที่ค่า P_{NL} ได้จากผลการทดสอบเปิดวงจรในตารางที่ 6.7 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10720 W (Ruen Huang and et. al, 2001) จากค่าดังกล่าวจึงสามารถคำนวณค่า $\sum P_{loss}$ ได้เท่ากับ 49151 W ดังนี้

$$\text{จาก} \quad \sum P_{loss} = P_{NL} + P_{LL-H}$$

$$\text{จะได้} \quad \sum P_{loss} = 10720 + 38431 = 49151 \text{ W}$$

กรณีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม

การคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอรืบลองค์กรณีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมกำจัดฮาร์โมนิกในระบบแรงไฟฟ้า สามารถแสดงผลการตรวจวัดค่ากระแส $I_{h,HV}$ และค่ากระแส $I_{h,LV}$ ในแต่ละอันดับได้ดังตารางที่ 6.6 จากค่ากระแสดังกล่าวสามารถอธิบายและแสดงการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงเลอรืบลองค์ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.6 ผลการตรวจวัดกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเลอรืบลองค์กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม

Harmonic order (h)	I_{h-HV} (A)	I_{h-LV} (A)	I_{h-HV}^2 (A)	I_{h-LV}^2 (A)	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$
1	18.54	73.77	343.7316	5442.0129	1.000000	1.000000	1.000000
3	0.03	0.14	0.0009	0.0196	0.000004	0.000032	0.000009
5	0.04	0.15	0.0016	0.0225	0.000004	0.000110	0.000016
7	0.01	0.04	0.0001	0.0016	0.000000	0.000009	0.000001
11	0.01	0.01	0.0001	0.0001	0.000000	0.000024	0.000001
13	0.01	0.02	0.0001	0.0004	0.000000	0.000034	0.000002
17	0.01	0.03	0.0001	0.0009	0.000000	0.000101	0.000003
19	0.01	0.05	0.0001	0.0025	0.000000	0.000148	0.000004
23	0.02	0.07	0.0004	0.0049	0.000001	0.000497	0.000012

ตารางที่ 6.6 ผลการตรวจวัดกระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์กรณีใช้วงจรกรองกำลัง
แอกทีฟแบบขนานเฟสรวม (ต่อ)

Harmonic order (h)	I_{h-HV} (A)	I_{h-LV} (A)	I_{h-HV}^2 (A)	I_{h-LV}^2 (A)	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$	$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$
25	0.01	0.05	0.0001	0.0025	0.000000	0.000072	0.000002
29	0.01	0.04	0.0001	0.0016	0.000000	0.000104	0.000002
31	0.01	0.04	0.0001	0.0016	0.000000	0.000399	0.000006
35	0.02	0.05	0.0004	0.0025	0.000001	0.001163	0.000016
37	0.01	0.05	0.0001	0.0025	0.000000	0.000569	0.000007
41	0.01	0.07	0.0001	0.0049	0.000001	0.000949	0.000011
43	0.01	0.05	0.0001	0.0025	0.000000	0.000321	0.000004
47	0.01	0.07	0.0001	0.0049	0.000000	0.000384	0.000004
49	0.02	0.08	0.0004	0.0064	0.000002	0.003738	0.000035
Σ	18.78	74.76	343.74	5442.09	1.000015	1.008653	1.000134

การคำนวณหาค่า P_{TSL-R} ค่า P_{EC} และค่า P_{OSL}

เนื่องจากระบบการจัดฮาร์โมนิกที่พิจารณาเปรียบเทียบกับกรณีใช้วงจรกรองกำลัง
แอกทีฟแบบขนานสามเฟสและกรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมใช้หม้อแปลงไฟฟ้า
แบบเลอว์บลองค์ตัวเดียวกัน ดังนั้นค่า P_{TSL-R} ค่า P_{OSL} และค่า P_{EC} ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่า
พิกัดของหม้อแปลงเลอว์บลองค์จึงมีค่าเท่ากันด้วยนั่นคือ P_{TSL-R} เท่ากับ 12659 W P_{OSL} เท่ากับ
7595 W และค่า P_{EC} เท่ากับ 5064 W

การคำนวณหาค่า F_{HL} และค่า F_{HL-STR}

จากผลการคำนวณค่า $\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2$ ค่า $\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2$ และค่า $\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}$ ใน
ตารางที่ 6.6 จะสามารถคำนวณค่า F_{HL} และค่า F_{HL-STR} โดยใช้สมการที่ (6.14) และ (6.15) ได้เท่ากับ
1.008638 และ 1.001325 ตามลำดับ ดังนั้น

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}$$

จาก

จะได้
$$F_{HL} = \frac{1.008653}{1.000015} = 1.008638$$

และจาก
$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2}$$

จะได้
$$F_{HL-STR} = \frac{1.000134}{1.000015} = 1.001325$$

การคำนวณหาค่า P_{C-H}

การคำนวณค่า P_{C-H} จากสมการที่ (6.13) โดยที่ค่า $I_{h,HV}^2$ และค่า $I_{h,LV}^2$ ในแต่อันดับสามารถดูได้จากตารางที่ 6.6 ส่วนค่า R_{HV} และค่า R_{LV} จะมีค่าเท่ากับ 24.63 Ω และ 1.57 Ω ตามลำดับ จากค่าดังกล่าวจะสามารถคำนวณค่า P_{C-H} ในกรณีนี้ได้เท่ากับ 17006 W แสดงได้ดังนี้

จาก
$$P_{C-H} = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_{h,HV}^2 R_{HV}) + \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_{h,LV}^2 R_{LV})$$

จะได้
$$P_{C-H} = R_{HV} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_{h,HV}^2) + R_{LV} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_{h,LV}^2)$$

$$P_{C-H} = 24.63 \times 343.61 + 1.57 \times 5441.60$$

$$P_{C-H} = 17006 \text{ W}$$

การคำนวณหาค่า P_{LL-H}

จากผลการคำนวณค่า P_{C-H} ค่า P_{EC} และค่า P_{OSL} ในช่วงต้นสามารถคำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียขณะมีโหลดหรือค่า P_{LL-H} ของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ในกรณีใช้วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมได้ตามสมการที่ (6.12) ได้ค่าเท่ากับ 29719 W ดังนี้

จาก
$$P_{LL-H} = P_{C-H} + (P_{EC} \times F_{HL}) + (P_{OSL} \times F_{HL-STR})$$

จะได้
$$P_{LL-H} = 17006 + (5064 \times 1.008638) + (7595 \times 1.001325)$$

$$P_{LL-H} = 29719 \text{ W}$$

การคำนวณหาค่า $\sum P_{loss}$

จากค่า P_{NL} และค่า P_{LL-H} ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์ในกรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมจะสามารถคำนวณค่า $\sum P_{loss}$ ได้เท่ากับ 40439 W แสดงได้ดังนี้

$$\text{จาก} \quad \sum P_{loss} = P_{NL} + P_{LL-H}$$

$$\text{จะได้} \quad \sum P_{loss} = 10720 + 29719 = 40439$$

จากผลการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าเลอรืบลองค์ระหว่างกรณีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสและกรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม สามารถสรุปค่ากำลังงานสูญเสียประเภทต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบแสดงได้ดังตารางที่ 6.7

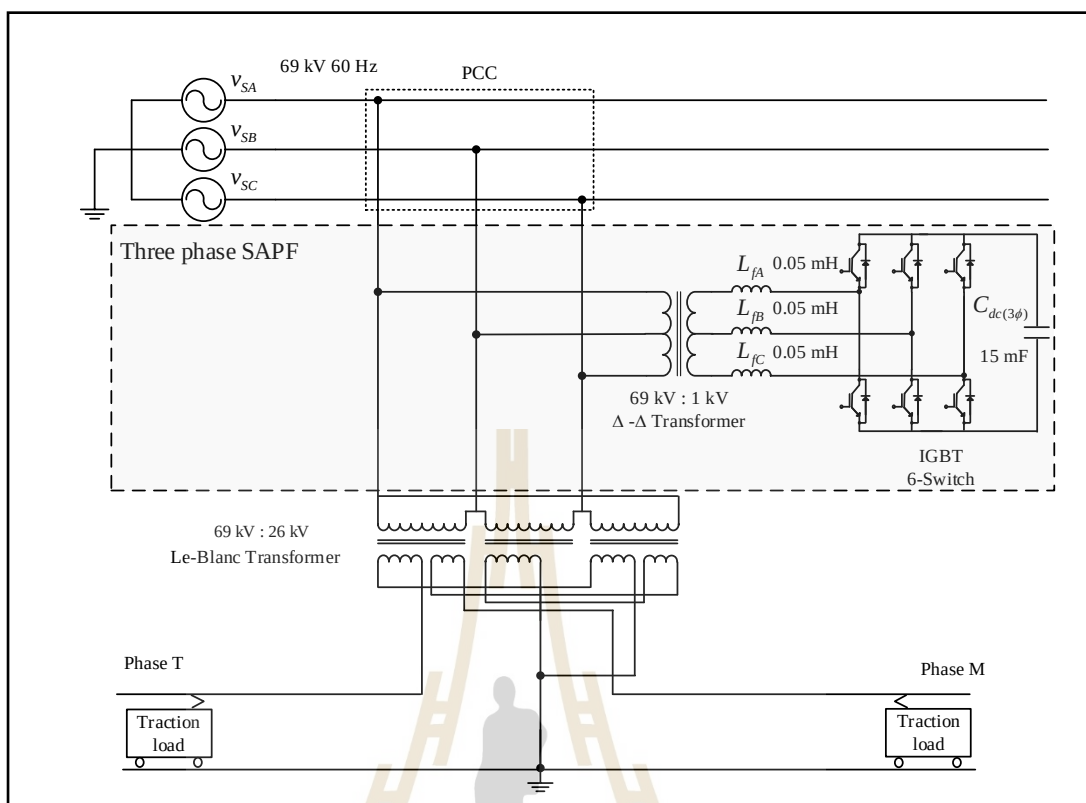
ตารางที่ 6.7 กำลังงานสูญเสียประเภทต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอรืบลองค์

กำลังงานสูญเสีย	ค่ากำลังงานสูญเสีย (W)	
	กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส	กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม
P_{CU-H}	17827	17006
$(P_{EC} \times F_{HL})$	12263	5108
$(P_{OSL} \times F_{HL-STR})$	8341	7605
P_{LL-H}	38431	29719
P_{NL}	10720	10720
$\sum P_{loss}$	49151	40439

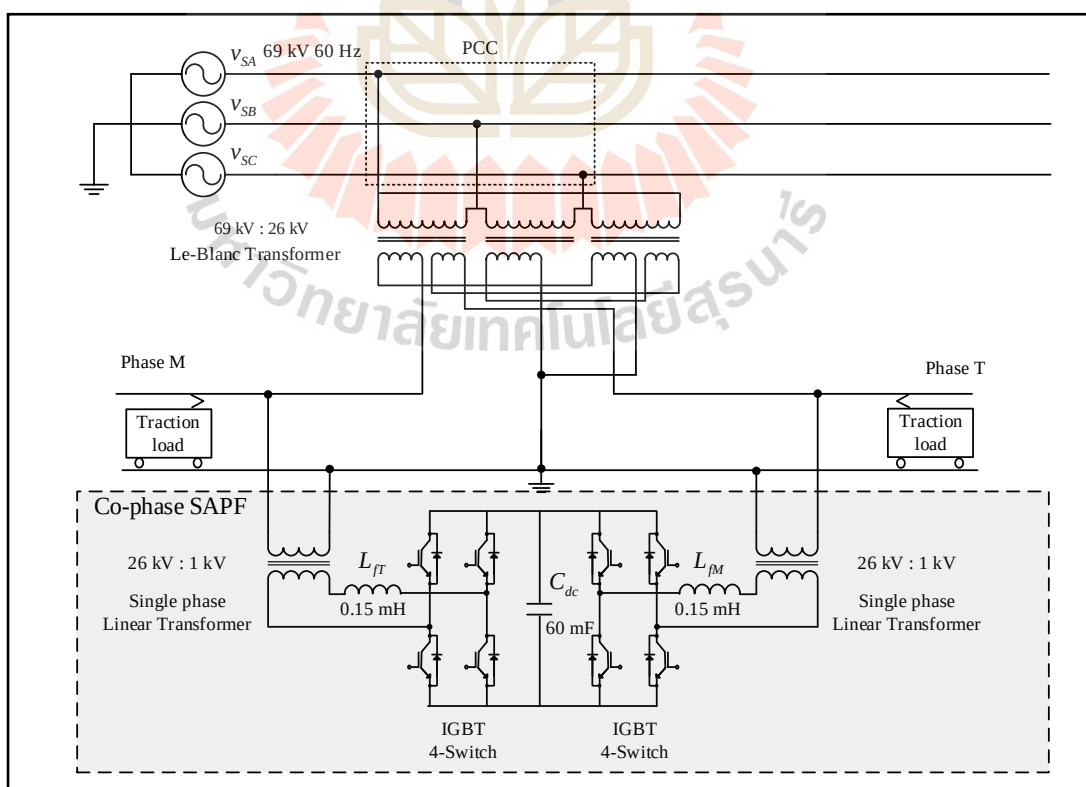
จากตารางที่ 6.7 จะเห็นว่า กรณีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส หม้อแปลงมีค่ากำลังงานสูญเสียทั้งหมดหรือค่า $\sum P_{loss}$ เท่ากับ 49151 W ส่วนกรณีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมมีค่ากำลังงานสูญเสีย $\sum P_{loss}$ เท่ากับ 40439 W จากผลดังกล่าว หมายความว่า กรณีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าสามารถช่วยลดค่ากำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอรืบลองค์ได้ 8712 W (49151 – 40439) หรือมีค่าลดลง 17.72 % เมื่อเทียบกับกรณีการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส

6.7.3 การเปรียบเทียบจำนวนและพิกัดอุปกรณ์สำหรับการสร้างวงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนาน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบในประเด็นข้อมูลจำนวนและพิกัดอุปกรณ์สำหรับการสร้างวงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนานสำหรับใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าระหว่างกรณีการใช้วงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนานสามเฟส และกรณีการใช้วงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนานเฟสรวม โดยรายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนานสามเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 6.17 และกรณีใช้วงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนานเฟสรวมแสดงได้ดังรูปที่ 6.18 โดยอุปกรณ์ที่ใช้การสร้างวงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนานในหัวข้อนี้จะเลือกพิจารณาเฉพาะอุปกรณ์หลัก ๆ ที่สำคัญ ได้แก่ ไอจีบีทีโมดูล (IGBT module) ที่ใช้สำหรับสร้างเป็นวงจรรอกกำลังแอททีฟ ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้เป็นตัวเหนี่ยวนำวงจร (L_f) ตัวเก็บประจุสำหรับใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานของวงจรรอกกำลังแอททีฟ (C_{DC}) และหม้อแปลงไฟฟ้าลดระดับแรงดัน ซึ่งขนาดพิกัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนานทั้งสองกรณีนี้จะถูกกำหนดโดยพิกัดแรงดันไฟฟ้าฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าลดระดับแรงดันที่เชื่อมต่อกับจุดที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกของทั้งสองกรณีวงจรโดยกรณีวงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนานสามเฟสจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสพิกัดแรงดัน 69 kV : 1 kV ต่อขดลวดแบบเดลต้าเดลต้า จำนวน 1 ชุด และกรณีวงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนานเฟสรวมจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสพิกัดแรงดัน 26 kV : 1 kV จำนวน 2 ชุด สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงทั้งสองกรณีเท่ากันเท่ากับ 1000 V จากพิกัดดังกล่าวจะได้ขนาดพิกัดของอุปกรณ์สำหรับการสร้างวงจรรอกกำลังแอททีฟแบบขนานทั้งสองกรณีดังแสดงในตารางที่ 6.8



รูปที่ 6.17 การสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส



ตารางที่ 6.8 พิกัดอุปกรณ์ที่พิจารณาสำหรับสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ประเภทอุปกรณ์	วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส		วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน เฟสรวม	
	รายละเอียด	จำนวน (ชุด)	รายละเอียด	จำนวน (ชุด)
1. วงจรไอจีบีทีอินเวอร์เตอร์	IGBT 6 Switch พิกัดแรงดัน 2300 V พิกัดกระแส 2200 A	1	IGBT 4 Switch พิกัดแรงดัน 1700 V พิกัดกระแส 2400 A	2
2. ตัวเก็บประจุ	ขนาด 15 mF พิกัดแรงดัน 2300 V	1	ขนาด 60 mF พิกัดแรงดัน 1700 V	1
3. ตัวเหนี่ยวนำ	ขนาด 0.05 mH พิกัดกระแส 2200 A	3	ขนาด 0.15 mH พิกัดกระแส 2400 A	2
4. หม้อแปลงไฟฟ้าลดระดับแรงดัน	หม้อแปลงสามเฟส ($\Delta-\Delta$) พิกัดแรงดัน 69 kV : 1 kV พิกัดกำลัง 4 MW	1	หม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส พิกัดแรงดัน 26 kV : 1 kV พิกัดกำลัง 2.5 MW	2

จากตารางที่ 6.8 เมื่อพิจารณาในส่วนของจำนวนอุปกรณ์จะเห็นได้ว่า วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส มีวงจรไอจีบีทีอินเวอร์เตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้าลดระดับแรงดันที่น้อยกว่าจำนวน 1 ชุด มีจำนวนตัวเก็บประจุที่มากกว่าจำนวน 1 ชุด และมีจำนวนตัวเก็บประเท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม และเมื่อพิจารณาในส่วนของพิกัดอุปกรณ์ที่ใช้งานจะพบว่า วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสมีพิกัดแรงดันและพิกัดกำลังที่สูงกว่ากรณีใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม

จากการเปรียบเทียบการก่การจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าระหว่างกรณีที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส และกรณีที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมใน 3 ประเด็นที่ผ่านมา สามารถสรุปผลการเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.9 การเปรียบเทียบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าระหว่างกรณีที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส และกรณีที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม

ประเด็นในการเปรียบเทียบ	วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส	วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม
ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก	ค่า %THD _i หลังการชดเชย $i_{SA} = 2.03 \%$ $i_{SB} = 1.96 \%$ $i_{SC} = 1.97 \%$ $i_{SM} = 22.16 \%$ $i_{ST} = 22.16 \%$	ค่า %THD _i หลังการชดเชย $i_{SA} = 1.83 \%$ $i_{SB} = 1.85 \%$ $i_{SC} = 1.86 \%$ $i_{SM} = 1.87 \%$ $i_{ST} = 1.87 \%$
กำลังงานสูญเสียที่หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์	$\sum P_{Loss} = 49151 \text{ W}$	$\sum P_{Loss} = 40439 \text{ W}$
จำนวนอุปกรณ์	น้อยกว่า	มากกว่า
พิกัดอุปกรณ์	สูงกว่า	ต่ำกว่า

จากตารางที่ 6.9 เมื่อพิจารณาประเด็นประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก จะเห็นว่ากรณีที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานแบบเฟสรวมสามเฟสสามารถให้ค่า %THD_i ทั้งทางฝั่งแรงสูงและฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าได้น้อยกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 1.83 % 1.85 % และ 1.86 % สำหรับเฟส A B และ C ตามลำดับ และ 1.87 % สำหรับเฟส M และ T ในขณะที่กรณีที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสวัดค่า %THD_i ของเฟส A เฟส B และ เฟส C ได้เท่ากับ 2.03 % 1.96 % และ 1.97 % ตามลำดับ และวัดค่า %THD_i ของเฟส M และเฟส T ได้เท่ากันเท่ากับ 22.16 % จากผลดังกล่าวหมายความว่า กรณีที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมสามเฟสสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีกว่ากรณีที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสทั้งทางฝั่งแรงสูงและฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า

สำหรับประเด็นกำลังงานการสูญเสีย (P_{Loss}) ที่หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ พบว่า กรณีที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานแบบเฟสรวมมีค่า P_{Loss} ต่ำกว่า โดยมีค่าเท่ากับ 40439 W ในขณะที่กรณีที่ใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสมีค่า P_{Loss} เท่ากับ 49151 W

สำหรับประเด็นจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสร้างวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน พบว่า กรณีการใช่วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานแบบสามเฟสมีการใช้จำนวนอุปกรณ์ที่น้อยกว่ากรณีใช่วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม และในส่วนของพิกัดของอุปกรณ์ พบว่า การใช่วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานแบบสามเฟสจะมีพิกัดแรงดันของอุปกรณ์ที่สูงกว่ากรณีใช่วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม ซึ่งพิกัดแรงดันดังกล่าวจะมีผลต่อราคาหม้อแปลงลดระดับแรงดันและอุปกรณ์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้างด้วยเช่นกัน ซึ่งสามารถดูตัวอย่างการประมาณราคาได้จากภาคผนวก ข

6.8 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส โดยเนื้อหาในส่วนแรกได้อธิบายเกี่ยวกับการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF สำหรับระบบสามเฟส การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส การออกแบบระบบควบคุมกระแสชดเชยและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา พบว่า วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสและตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบสามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีค่า % THD_i ลดลงอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std 519-2014 นอกจากนี้ เนื้อหาในส่วนที่สองของบทนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบระหว่างกรณีการใช่วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสและกรณีการใช่วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 โดยได้ทำการเปรียบเทียบ 3 ประเด็น คือ ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก กำลังงานสูญเสียที่หม้อแปลงไฟฟ้าเลอ์บลองค์ และจำนวนและพิกัดอุปกรณ์สำหรับการสร้างวงจรรอกำลังแอกทีฟทั้งสองกรณีวงจร ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่า กรณีการใช่วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมสามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีกว่ากรณีการใช่วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส เนื่องจากกรณีดังกล่าวสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ทั้งทางฝั่งแรงต่ำและทางฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอ์บลองค์ และการใช่วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมกำจัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ายังส่งผลให้ค่ากำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอ์บลองค์มีค่าน้อยกว่ากรณีการใช่วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส นอกจากนี้ ผลการเปรียบเทียบจำนวนและพิกัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนาน พบว่า วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานแบบเฟสรวมมีจำนวนอุปกรณ์ที่มากกว่าวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส แต่อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาพิกัดของหม้อแปลงสำหรับลดระดับแรงดันไฟฟ้า อุปกรณ์ควบคุม รวมถึงอุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งอุปกรณ์ในส่วนนี้หากพิจารณาใช้งานกับระบบที่มีแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะมีราคาสูงขึ้นด้วย

เป็นผลให้ราคา รวมของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรรอกกำลังแอททิฟแบบขนานสามเฟสที่ติดตั้งที่
พิกัดแรงสูง (69 kV ขึ้นไป) มีแนวโน้มที่สูงกว่าวงจรรอกกำลังแอททิฟแบบขนานเฟสรวมที่ติดตั้งที่
พิกัดแรงต่ำ (25- 27.5 kV)



บทที่ 7

การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้า ด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

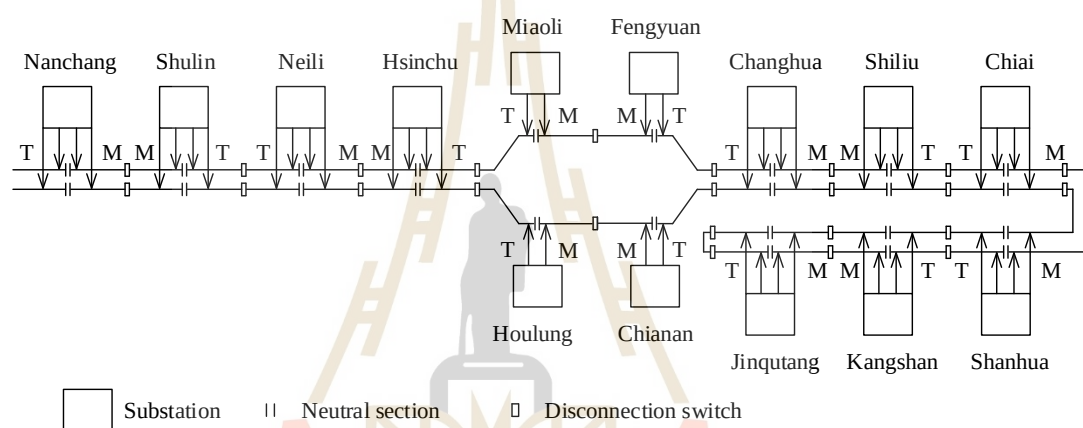
7.1 บทนำ

การกำจัดฮาร์มอนิกของระบบรางไฟฟ้าในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงระบบกำจัดฮาร์มอนิกที่พิจารณาระบบรางไฟฟ้าที่มีสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเพียงหนึ่งสถานีเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว โครงสร้างของระบบรางไฟฟ้าโดยทั่วไปจะประกอบด้วยสถานีย่อยหลาย ๆ สถานีเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายระบบไฟฟ้าตามเส้นทางของรถไฟไฟฟ้าใช้สำหรับการขนส่งระหว่างเมือง (Inter-city rail) ทุก ๆ 20 ถึง 40 กิโลเมตร โดยทั่วไปสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละสถานีจะรับไฟฟ้าจากแหล่งจำหน่ายไฟฟ้าเดียวกัน ซึ่งเมื่อเกิดปัญหาฮาร์มอนิกขึ้นในระบบรางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อยใด ๆ จะส่งผลให้มีปริมาณฮาร์มอนิกเกิดขึ้นที่ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ดังนั้น ในบทนี้จึงนำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้าในประเทศไทยได้หวั่น โดยการติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมในสถานีไฟฟ้าย่อยที่พิจารณาหรือต้องการกำจัดฮาร์มอนิก ซึ่งการกำจัดฮาร์มอนิกในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นนอกจากจะทำให้ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นมีปริมาณฮาร์มอนิกลดลงแล้ว ยังส่งผลให้ปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้ามีค่าลดลงด้วยเช่นกัน โดยเนื้อหาที่จะนำเสนอในบทนี้ประกอบด้วย หัวข้อที่ 7.2 จะอธิบายระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้าในประเทศไทยได้หวั่น หัวข้อที่ 7.3 นำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกในสถานีไฟฟ้าย่อยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม และในหัวข้อที่ 7.4 จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้า

7.2 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้าในประเทศไทยได้หวั่น

ระบบรางไฟฟ้าของประเทศไทยได้หวั่นในปี 2001 (Ruen Huang and et. al, 2001) (อ้างอิงตามข้อมูลระบบรางไฟฟ้าประเทศไทยได้หวั่นที่ใช้พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้) มีเส้นทางเดินไฟฟ้าจากนคร Keelung ถึงนคร Kaohsiung รวมเป็นระยะทาง 406 กิโลเมตร โดยระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะมีสถานีไฟฟ้าย่อยในทุก ๆ 40 กิโลเมตร ตลอดเส้นทางของรถไฟรวมทั้งหมด 14 สถานี ดังแสดงได้ดังรูปที่ 7.1 ซึ่งประกอบด้วยสถานี Nanchang สถานี Shulin สถานี

Neili สถานี Hsinchu สถานี Maioli สถานี Fengyuan สถานี Holong สถานี Chianan สถานี Changhua สถานี Shiliu สถานี Chiai สถานี Shanhua สถานี Kangshan และสถานี Jiuqutang โดยในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยจะมีระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่รับแรงดันไฟฟ้าสามเฟสพิกัดแรงดัน 69 kV 60 Hz จากแหล่งจ่ายเดียวกัน คือ บริษัทผลิตไฟฟ้าไต้หวัน (Taiwan power company : TPC) ซึ่งในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยจะใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าเลอ์บลองค์สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าสามเฟสที่พิกัดแรงดัน 69 kV 60 Hz ให้เป็นระบบไฟฟ้าสองเฟส (เฟส M และเฟส T) พิกัดแรงดัน 26 kV 60 Hz ก่อนจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบรางไฟฟ้าผ่านระบบสายส่งเหนือศีรษะ (Overhead wire systems) ตามเส้นทางเดินรถไฟต่อไป



รูปที่ 7.1 สถานีไฟฟ้าย่อยในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าประเทศไต้หวัน

สำหรับระบบรางไฟฟ้าของประเทศไทยที่ประกอบด้วยสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยจำนวน 14 สถานีดังกล่าว ได้มีการนำเสนอข้อมูลการตรวจวัดปริมาณฮาร์มอนิกของสถานีไฟฟ้าย่อยในระบบรางไฟฟ้าประเทศไทย (Ruen Huang and et. al, 2002) จำนวน 3 สถานีที่มีปริมาณฮาร์มอนิกสูงกว่าสถานีอื่นที่เหลือ ได้แก่ สถานี Hsin Chu สถานี Chang Hua และสถานี Nei Li โดยรายละเอียดปริมาณฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.1 โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ใน 1 เดือน ของแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อย จากตารางดังกล่าวจะเห็นว่า ที่สถานี Hsin Chu มีปริมาณฮาร์มอนิกมากที่สุดที่ค่า %THD_i เท่ากับ 22.22 % ในขณะที่สถานี Chang Hua และสถานี Nei Li มีปริมาณฮาร์มอนิกน้อยกว่าที่ %THD_i เท่ากับ 13.00 % และ 8.75 % ตามลำดับ

ตารางที่ 7.1 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกเฉลี่ยในระบบแรงไฟฟ้าประเทศไต้หวัน (Ruen Huang and et. al, 2002)

สถานีไฟฟ้าย่อย อันดับ ฮาร์มอนิกส์ (h)	สถานี Hsinchu i_{LM_1} (A)	สถานี Chanhua i_{LM_2} (A)	สถานี Neili i_{LM_3} (A)
1	221.00	383.00	574.00
3	39.90	46.80	46.80
5	26.11	15.72	15.80
7	5.76	6.87	6.90
11	4.22	2.19	2.10
13	2.88	1.50	1.60
17	4.22	0.81	0.80
19	4.99	0.72	0.75
23	2.33	0.39	0.40
25	1.25	0.14	0.14
29	1.63	0.29	0.30
31	2.50	0.33	0.34
35	1.15	0.20	0.19
37	1.15	0.09	0.10
41	1.05	0.12	0.12
43	0.86	0.16	0.15
47	1.05	0.10	0.11
49	1.25	0.05	0.05
ค่า %THD _i	22.16	13.00	8.75

หมายเหตุ i_{LM_1} คือ กระแสไฟฟ้าที่ฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ของสถานี Hsinchu

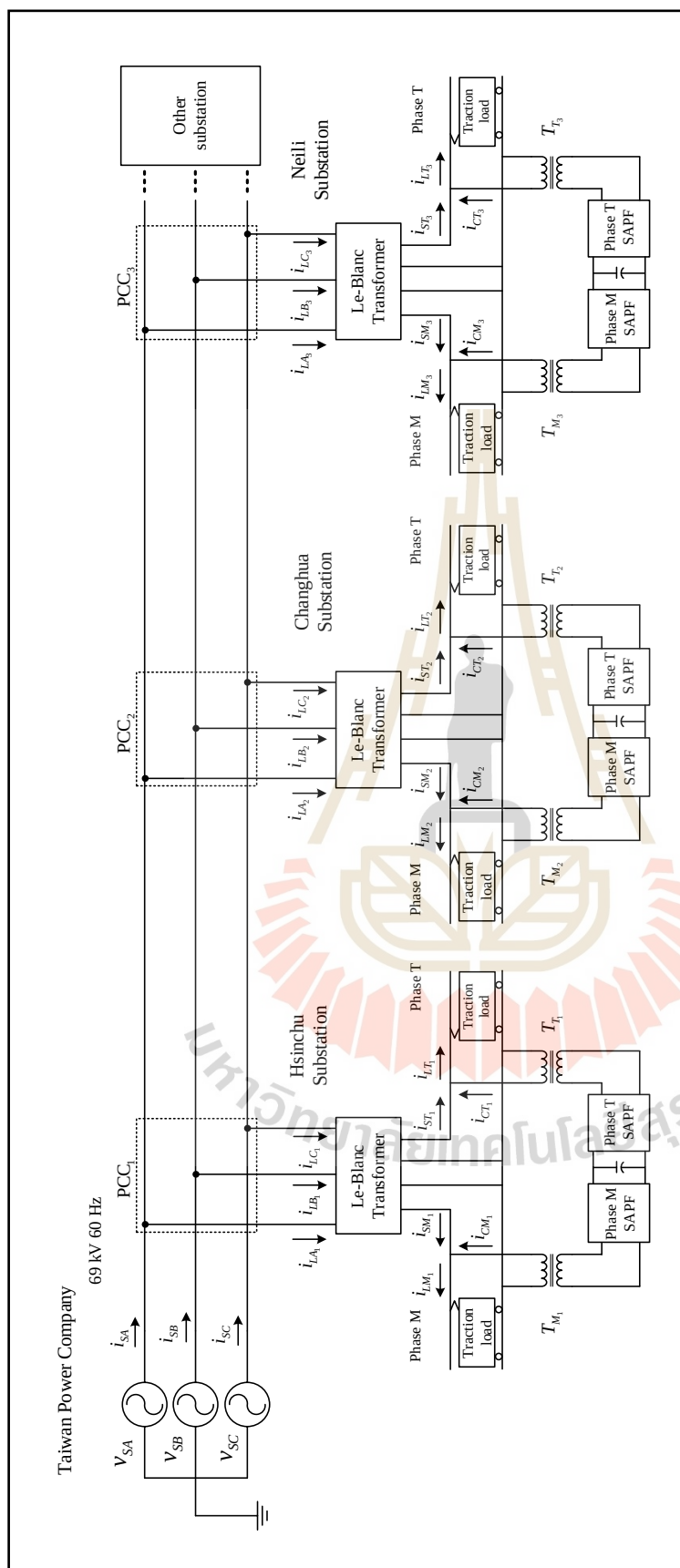
หมายเหตุ i_{LM_2} คือ กระแสไฟฟ้าที่ฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ของสถานี Chanhua

หมายเหตุ i_{LM_3} คือ กระแสไฟฟ้าที่ฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ของสถานี Neili

จากข้อมูลการตรวจวัดปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบแรงไฟฟ้าประเทศไต้หวันทั้ง 3 สถานีไฟฟ้าย่อยในตารางที่ 7.1 จะสามารถนำไปประกอบการสร้างระบบจำลองการกำจัดฮาร์มอนิก

ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมด้วยวงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนานแสดงเฟสรวมได้ดังรูปที่ 7.2 จากรูปดังกล่าวระบบประกอบด้วย 4 ส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนที่ 1 บริษัทผลิตไฟฟ้าได้หวัน (TPC) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจำหน่ายระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสส่งให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยทั้งสามสถานี ส่วนที่ 2 หม้อแปลงไฟฟ้าเลอ์บลองค์ ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าสามเฟส (ABC) ที่รับมาจาก TPC เปลี่ยนเป็นระบบไฟฟ้าสองเฟส (M และ T) เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดรางไฟฟ้า (Traction Load) ของแต่ละสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย โดยที่โหลดรางไฟฟ้างกล่าว จะถูกกำหนดแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสที่เป็นองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกตามข้อมูลการตรวจวัดปริมาณฮาร์มอนิกในตารางที่ 7.1 และส่วนสุดท้ายส่วนที่ 4 คือ วงจรรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (SAPF) ใช้สำหรับกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นระบบรางไฟฟ้าในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อย รายละเอียดการออกแบบของวงจรรองกำลังแอกทีฟดังกล่าวสามารถดูได้จากหัวข้อที่ 7.3





รูปที่ 7.2 การกำจัดการรบกวนในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมด้วยวงจรกรองกำลังแยกที่แบบขนาน

7.3 การกำจัดการฮาร์มอนิกในสถานีไฟฟ้าย่อยด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

การกำจัดการฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้าจะเลือกใช้การติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมในทุกสถานีไฟฟ้าย่อย ณ ตำแหน่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอ์บลองค์ดังแสดงในรูปที่ 7.2

จากรูปที่ 7.2 สามารถแสดงตัวอย่างรายละเอียดระบบกำจัดการฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมของสถานี Hsinchu ได้ดังรูปที่ 7.3 โดยที่การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมและระบบควบคุมในแต่ละสถานีนั้นจะใช้วิธีการที่ได้นำเสนอมาแล้วในบทที่ 4 และบทที่ 5 ซึ่งจะเริ่มต้นพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_f) และค่าตัวเก็บประจุดีซี (C_{dc}) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

การออกแบบค่า V_{dc}

ค่า V_{dc} ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมนั้นจะพิจารณาจากค่าแรงดันที่จุดที่พิจารณากำจัดการฮาร์มอนิกซึ่งอยู่ที่ฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอ์บลองค์ และเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่จุดดังกล่าวของทั้งสามสถานีไฟฟ้าที่พิจารณานั้นมีค่าเท่ากัน ดังนั้น ค่า V_{dc} ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานของทั้งสามสถานีไฟฟ้าจะกำหนดให้มีค่าเท่ากันเท่ากับ 1700 V

การออกแบบค่า L_f

การออกแบบค่า L_f ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสามสถานีจะเริ่มต้นจากการพิจารณาค่า $\max(\frac{di_c^*}{dt})$ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (5.2) โดยผลการคำนวณค่า $\max(\frac{di_c^*}{dt})$ ของสถานี Hsin Chu จะได้เท่ากับ 1809896 A/s สถานี Chang Hua ได้เท่ากับ 1946195 A/s และสถานี Nei Li ได้เท่ากับ 1946195 A/s จากผลของค่า $\max(\frac{di_c^*}{dt})$ ดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณค่า $L_{f(max)}$ โดยใช้สมการที่ (5.3) ซึ่งจะได้ค่า $L_{f(max)}$ ของสถานี Hsin Chu เท่ากับ 0.158 mH สถานี Chang Hua เท่ากับ 0.147 mH และสถานี Nei Li เท่ากับ 0.147 mH ดังแสดงในตารางที่ 7.2

การกำหนดเลือกค่า L_f สำหรับใช้เป็นตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานของทั้งสามสถานีไฟฟ้าย่อยจะเลือกให้มีค่าเท่ากัน เนื่องจากต้องการให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสามตัวมีพิกัดที่เท่ากันและสามารถกำจัดการฮาร์มอนิกได้ใกล้เคียงกันทุกสถานี โดยยังอยู่ภายใต้ขอบเขตของ $L_{f(max)}$ ที่ได้จากการคำนวณของทั้ง 3 สถานี ดังนั้น ในบทนี้จะเลือกใช้ค่า L_f ของทั้งสามสถานีไฟฟ้าย่อยเท่ากันเท่ากับ 0.10 mH

ตารางที่ 7.2 การเลือกใช้ค่า L_f สำหรับแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อย

ค่าพารามิเตอร์	สถานีไฟฟ้าย่อย		
	สถานี Hsin Chu	สถานี Chang Hua	สถานี Nei Li
$L_{f(max)}$	0.158 mH	0.147 mH	0.147 mH
L_f	เลือกใช้ค่า L_f เท่ากันเท่ากับ 0.10 mH		

การออกแบบค่า C_{dc}

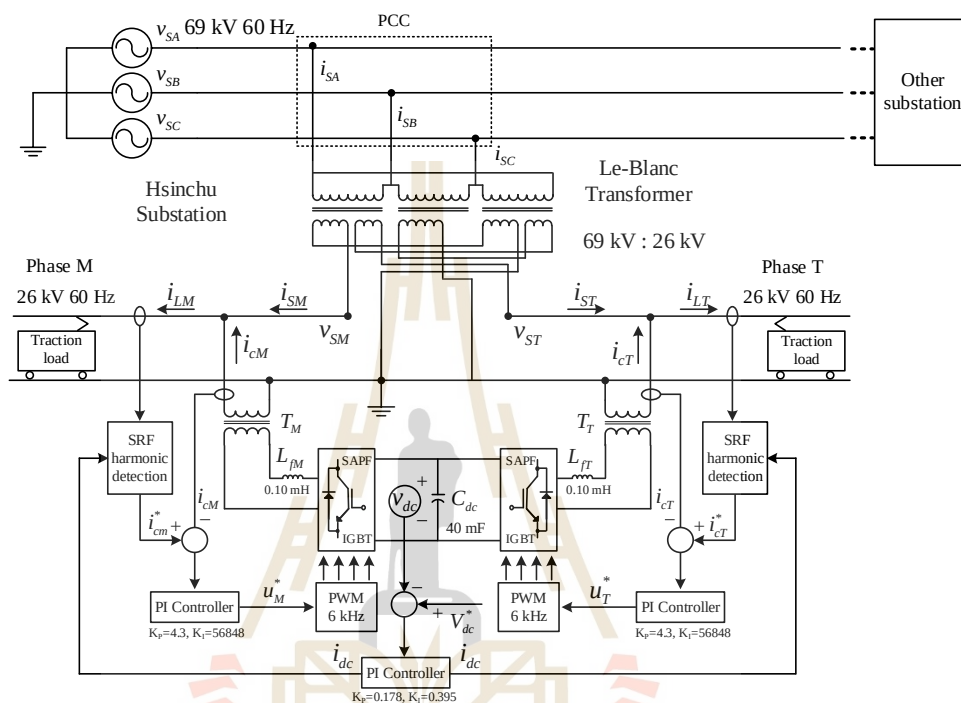
การออกแบบค่า C_{dc} จะเริ่มต้นจากการพิจารณาการกระเพื่อมของผลรวมกำลังแอกทีฟ ($\Delta \int \tilde{p}_L dt$) ตามวิธีการที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 5.4.2 ในบทที่ 5 ซึ่งจากวิธีการดังกล่าว จะสามารถหาค่า $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ ของสถานี Hsin Chu มีค่าเท่ากับ 1200 W สถานี Chang Hua มีค่าเท่ากับ 2120 W และสถานี Nei Li มีค่าเท่ากับ 2090 W จากค่า $\Delta \int \tilde{p}_L dt$ ที่ได้จะสามารถนำไปคำนวณค่า $C_{dc(min)}$ โดยใช้สมการที่ (5.4) ซึ่งจะได้ที่ค่า $C_{dc(min)}$ ของสถานี Hsin Chu เท่ากับ 20.76 mF สถานี Chang Hua เท่ากับ 36.68 mF และสถานี Nei Li เท่ากับ 36.16 mF อย่างไรก็ตาม ในบทนี้จะเลือกใช้ค่า C_{dc} ของทั้งสามสถานีไฟฟ้าย่อยมีขนาดเท่ากันเท่ากับ 40 mF ทั้งนี้เนื่องจากต้องการให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสามตัวมีพิกัดที่เท่ากันและสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ใกล้เคียงกันทุกสถานี ซึ่ง C_{dc} ที่กำหนดเลือกนี้ยังคงอยู่ในขอบเขตของค่า $C_{dc(min)}$ ที่ได้จากการออกแบบของทั้งสามสถานียังแสดงในตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 การเลือกใช้ค่า C_{dc} สำหรับแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อย

ค่าพารามิเตอร์	สถานีไฟฟ้าย่อย		
	สถานี Hsin Chu	สถานี Chang Hua	สถานี Nei Li
$C_{dc(min)}$	20.76 mF	36.68 mF	36.16 mF
C_{dc}	เลือกใช้ค่า C_{dc} เท่ากันเท่ากับ 40 mF		

จากการผลการออกแบบค่า V_{dc} ค่า L_f และค่า C_{dc} จะสามารถนำไปคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ใช้สำหรับการฉีดกระแสชดเชยได้โดยใช้สมการที่ (5.7) และ (5.8) ในบทที่ 5 ซึ่งได้ค่า K_p เท่ากับ 2.67 และค่า K_i เท่ากับ 35530 และคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยสมการที่ (5.10) และ (5.11) ได้ค่า K_p เท่ากับ 0.178 และค่า เท่ากับ 0.395 จากผลการคำนวณดังกล่าว สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสาม

สถานีได้ดังตารางที่ 7.4 จากตารางดังกล่าว การเลือกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานของทั้งสามสถานีไฟฟ้าจะเลือกใช้ค่าเท่ากันทั้งสามสถานี ทั้งนี้เนื่องจากต้องการให้วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้มีพิกัดใช้งานที่เท่ากันและสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ใกล้เคียงกันทุกสถานี



รูปที่ 7.3 ระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม (ยกตัวอย่างสถานี Hsinchu)

ตารางที่ 7.4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรกรองกำลังแอทไฟแบบขนานในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อย

พารามิเตอร์ของ วงจรกรองกำลังแอท ไฟแบบขนานเฟส ร่วม	สถานีไฟฟ้าย่อย		
	สถานี Hsin Chu	สถานี Chang Hua	สถานี Nei Li
โวลต์ระบบรางไฟฟ้า	เฟส M และเฟส T (THD _i = 22.16 %)	เฟส M และเฟส T (THD _i = 13.00 %)	เฟส M และเฟส T (THD _i = 8.75 %)
การตรวจจับ ฮาร์มอนิก	วิธี SRF ใช้ LPF ความถี่ตัด 30 Hz		
วงจรกรองกำลัง แอทไฟแบบขนาน	$V_{dc} = 1700 \text{ V}$, $C_{dc} = 40 \text{ mF}$ $L_{fM} = L_{fT} = 0.10 \text{ mH}$		
หม้อแปลงลดระดับ แรงดัน	หม้อแปลงเชิงเส้นหนึ่งเฟส 2 ตัวพิกัด 26 kV to 1 kV		
การควบคุมการสวิตช์ ด้วยเทคนิค PWM	ความถี่สวิตช์ 6000 Hz		
ตัวควบคุม กระแสชดเชย	ตัวควบคุมพีไอ $K_p = 2.67$, $K_I = 35530$		
ตัวควบคุมแรงดัน บัสไฟตรง	ตัวควบคุมพีไอ $K_p = 0.178$, $K_I = 0.395$		

7.4 ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้า

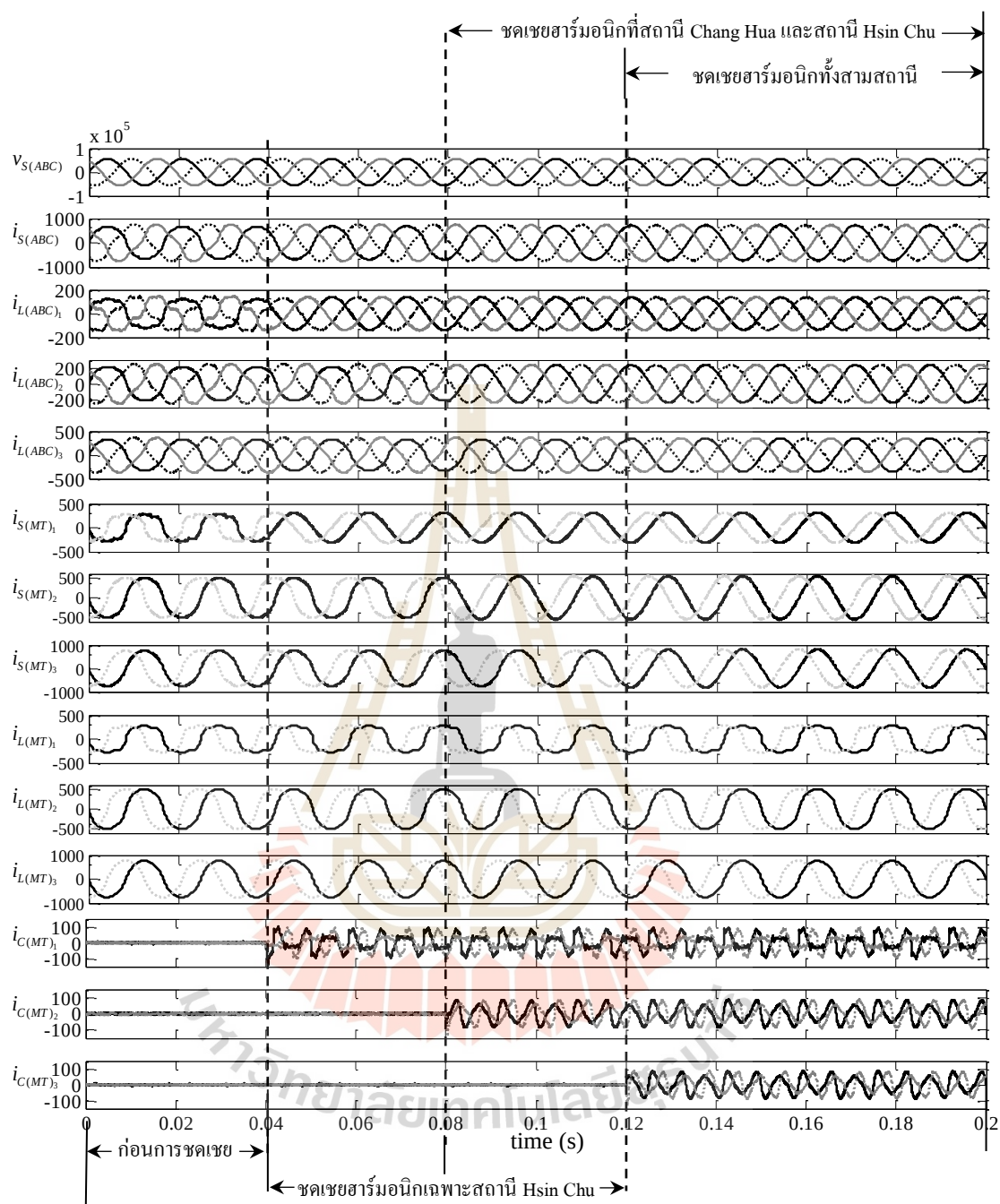
การจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้า ในรูปที่ 7.2 ร่วมกับค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอทไฟขนานเฟสร่วมและตัวควบคุมพีไอที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 7.4 สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกได้ดังรูปที่ 7.4 และสามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกแยกของสถานีที่ Hsin Chu สถานีที่ Chang Hua และสถานีที่ Nei Li ได้ดังรูปที่ 7.5(ก.) รูปที่ 7.5(ข.) และรูปที่ 7.5(ค.) ตามลำดับ

จากระบบการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวในข้างต้นจะกำหนดการฉีดกระแสชดเชยการจัดฮาร์มอนิกในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยที่เวลาแตกต่างกันโดยแบ่งเป็น 4 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาที่ 1 ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.04 วินาที กำหนดให้ยังไม่มีกระแสชดเชยการจัดฮาร์มอนิก ช่วงเวลาที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.04

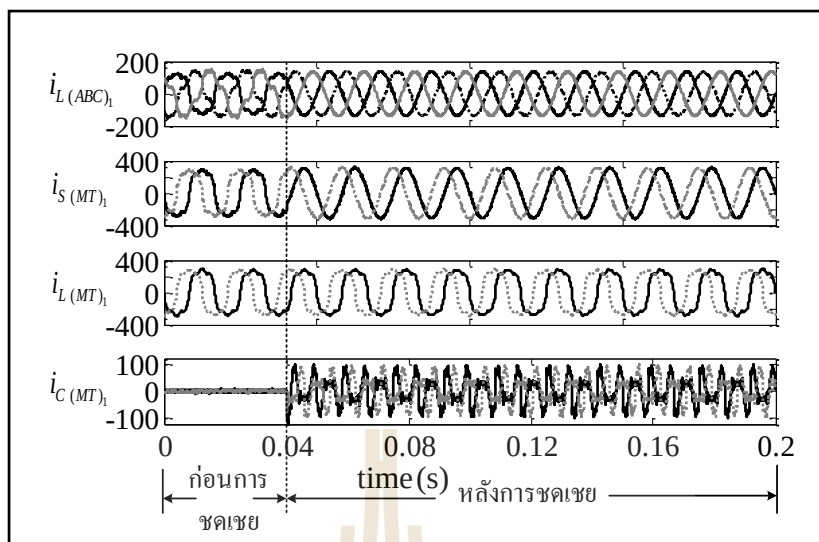
เป็นต้นไป จะกำหนดให้มีเพียงสถานี Hsin Chu ที่ทำการฉีดกระแสชดเชย ช่วงเวลาที่ 3 ตั้งแต่เวลา 0.08 ถึง เป็นต้นไป จะกำหนดให้สถานี Hsin Chu และสถานี Chang Hua ที่มีการฉีดกระแสชดเชย และสุดท้ายช่วงเวลาที่ 4 ตั้งแต่เวลา 0.12 ถึง 0.2 วินาที จะกำหนดให้ทั้งสามสถานีมีการฉีดกระแสชดเชย

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 7.4 จะสังเกตได้ว่า ในช่วงเวลาที่ 1 ตั้งแต่เวลา 0 วินาที เป็นต้นไป เมื่อระบบรางไฟฟ้าทั้งสามสถานีไฟฟ้าย่อยมีโหลด กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกจากฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อย ($i_{S(MT)_1}$), ($i_{S(MT)_2}$) และ ($i_{S(MT)_3}$) มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์เหมือนกับกระแสไหลในแต่ละสถานี ($i_{L(MT)_1}$), ($i_{L(MT)_2}$) และ ($i_{L(MT)_3}$) ทุกประการ โดยวัดค่า %THD_i สำหรับสถานี Hsin Chu ได้เท่ากับ 22.16 % สถานี Chang Hua เท่ากับ 13.05 % สถานี Nei Li วัดได้เท่ากับ 8.75 % ซึ่งจากผลการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ปริมาณฮาร์มอนิกดังกล่าวได้ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่โหลดฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ของทั้งสามสถานีไฟฟ้าย่อย ($i_{L(ABC)_1}$), ($i_{L(ABC)_2}$) และ ($i_{L(ABC)_3}$) รวมถึงกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ารวม ($i_{S(ABC)}$) มีลักษณะบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปไซน์ด้วยเช่นกัน โดยสามารถวัดค่า %THD_i ของกระแส $i_{L(ABC)_1}$ ได้เท่ากับ 22.16 % กระแส $i_{L(ABC)_2}$ เท่ากับ 13.04 % กระแส $i_{L(ABC)_3}$ เท่ากับ 8.75 % และกระแส $i_{S(ABC)}$ เท่ากับ 12.51 %

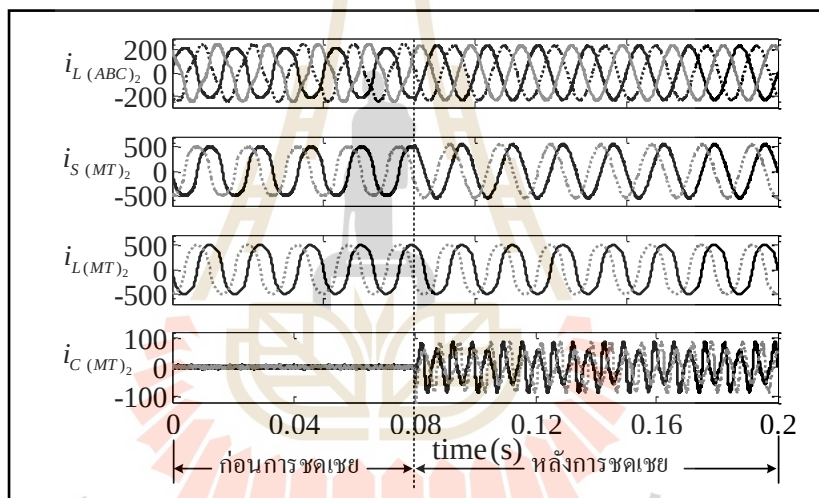




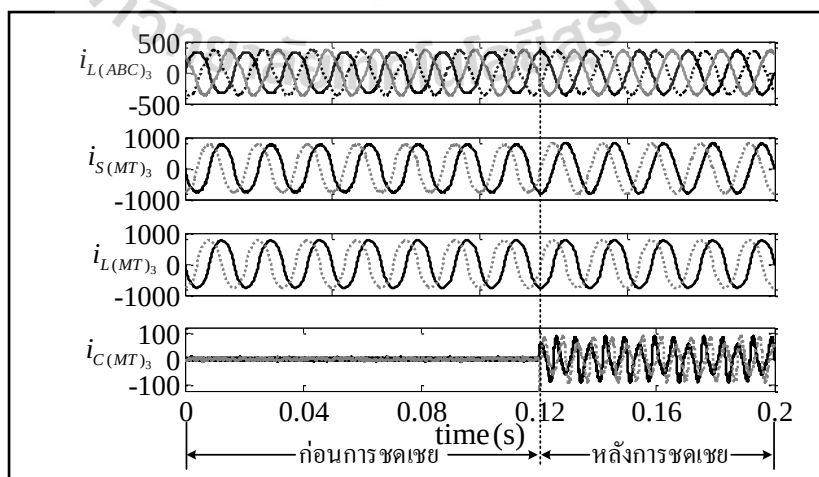
รูปที่ 7.4 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกทั้งสามสถานีไฟฟ้าย่อย



(ก) ที่สถานี Hsin Chu



(ข) ที่สถานี Chang Hua



(ค) ที่สถานี Nei Li

รูปที่ 7.5 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิก

หลังจากนั้นในช่วงเวลาที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.04 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อวงจรรอกำลังแยกที่ฟแบบขนานเฟสร่วมที่สถานี Hsin Chu (สามารถดูผลการจำลองสถานการณ์แยกเฉพาะสถานี Hsin Chu ได้จากรูปที่ 7.5(ก)) เริ่มทำการฉีดกระแสชดเชย ($i_{C(MT)_1}$) เข้าที่จุดที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกทางฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์ สังเกตได้ว่า รูปสัญญาณของ $i_{S(MT)_1}$ มีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยค่า %THD_i ภายหลังการชดเชยมีค่าลดลงจาก 22.16 % เหลือเท่ากับ 1.87 % เท่ากันทั้งเฟส M และ เฟส T ในขณะเดียวกันรูปสัญญาณของ $i_{L(ABC)_1}$ ทางฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์มีลักษณะกลับมาเป็นรูปไซน์มากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยวัดค่า %THD_i ได้ค่าเท่ากับ 1.83 % 1.87 % และ 1.83 % ตามลำดับเฟส นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายรวม $i_{S(ABC)_1}$ พบว่ามีลักษณะเป็นรูปไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยมีค่า %THD_i ลดลงเหลือเท่ากับ 8.48 % 8.48 % และ 8.47 % ตามลำดับเฟส

ในช่วงเวลาที่ 3 ตั้งแต่เวลา 0.08 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อมีการฉีดกระแสชดเชย ($i_{C(MT)_2}$) ที่สถานีไฟฟ้าย่อย Chang Hua เพิ่มเติมร่วมกับสถานี Hsin Chu (ดูผลการจำลองสถานการณ์เฉพาะสถานี Chang Hua ได้จากรูปที่ 7.5 (ข)) พบว่า รูปสัญญาณของ $i_{S(MT)_2}$ ภายหลังการชดเชยมีลักษณะกลับมาเป็นรูปคลื่นไซน์โดยวัดค่า %THD_i ได้เท่ากับ 1.04 % เท่ากันทั้งเฟส M และเฟส T ในขณะเดียวกันพบว่ารูปสัญญาณของ $i_{L(ABC)_2}$ ทางฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์มีลักษณะเป็นไซน์เช่นเดียวกันที่ %THD_i เท่ากับ 1.04 % 1.03 % และ 1.04 % ตามลำดับเฟส จากผลการกำจัดฮาร์มอนิกเพิ่มเติมที่สถานี Chang Hua ดังกล่าวได้ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายรวม $i_{S(ABC)_2}$ มีลักษณะเป็นไซน์เพิ่มมากขึ้นโดยพบค่า %THD_i ลดลงเหลือเท่ากับ 4.26% 4.26 % และ 4.27 % ตามลำดับเฟส

ในช่วงเวลาที่ 4 ตั้งแต่เวลา 0.12 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อมีการฉีดกระแสชดเชย ($i_{C(MT)_3}$) ที่สถานีไฟฟ้าย่อย Nei Li เพิ่มเติมร่วมกับสองสถานีที่ผ่านมา (ดูผลการจำลองสถานการณ์แยกเฉพาะสถานี Nei Li ได้จากรูปที่ 7.5 (ค)) พบว่า รูปสัญญาณของ $i_{S(MT)_3}$ ภายหลังการชดเชยมีค่า %THD_i เท่ากับ 0.71 % เท่ากันทั้งเฟส M และ เฟส T และรูปสัญญาณของ $i_{L(ABC)_3}$ ทางฝั่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลองค์มีค่า %THD_i ภายหลังการชดเชยค่าเท่ากับ 0.72 % 0.72 % และ 0.69 % ตามลำดับเฟส จากผลการกำจัดฮาร์มอนิกเพิ่มเติมที่สถานี Nei Li ได้ส่งผลให้รูปสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายรวมมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์มากขึ้นกว่าเดิมโดยค่า มีค่า %THD_i ลดลงเหลือเพียง 0.62% 0.65 % และ 0.63 % ตามลำดับเฟส

จากผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่สถานี Hsin Chu สถานี Chang Hua และสถานี Nei Li สามารถสรุปค่า %THD_i ในแต่ละช่วงเวลาของทั้งสามสถานีไฟฟ้าย่อยแสดงได้ดังตารางที่ 7.5

ตารางที่ 7.5 ผลการกำจัดฮาร์มอนิกที่สถานีไฟฟ้าย่อยในแต่ละช่วงเวลา

สถานีไฟฟ้า ย่อย	%THD _i สามเฟสที่ แหล่งจ่ายไฟฟ้ารวม			%THD _i ฝั่งแรงสูงของ หม้อแปลงเลอ์บลองค์			%THD _i ฝั่งแรงต่ำของ หม้อแปลงเลอ์บลองค์	
	<i>i</i> _{SA}	<i>i</i> _{SB}	<i>i</i> _{SC}	<i>i</i> _{LA}	<i>i</i> _{LB}	<i>i</i> _{LC}	<i>i</i> _{SM}	<i>i</i> _{ST}
ก่อนการกำจัดฮาร์มอนิก ที่เวลา 0.00 ถึง 0.04 วินาที								
Hsin Chu	12.51 %	12.52 %	12.51 %	22.16 %	22.16 %	22.16 %	22.16 %	22.16 %
Chang Hua				13.04 %	13.04 %	13.04 %	13.04 %	13.04 %
Nei Li				8.75 %	8.75 %	8.75 %	8.75 %	8.75 %
ภายหลังการกำจัดฮาร์มอนิกที่สถานี Hsin Chu ตั้งแต่เวลา 0.04 วินาทีเป็นต้นไป								
Hsin Chu	8.48 %	8.48 %	8.47 %	1.83 %	1.87 %	1.83 %	1.87 %	1.85 %
Chang Hua				13.04 %	13.04 %	13.04 %	13.04 %	13.04 %
Nei Li				8.75 %	8.75 %	8.75 %	8.75 %	8.75 %
ภายหลังการกำจัดฮาร์มอนิกที่สถานี Chang Hua เพิ่มเติมตั้งแต่เวลา 0.08 วินาทีเป็นต้นไป								
Hsin Chu	4.26 %	4.26 %	4.27 %	1.83 %	1.87 %	1.83 %	1.87 %	1.85 %
Chang Hua				1.04 %	1.03 %	1.04 %	1.04 %	1.04 %
Nei Li				8.75 %	8.75 %	8.75 %	8.75 %	8.75 %
ภายหลังการกำจัดฮาร์มอนิกที่สถานี Nei Li เพิ่มเติมตั้งแต่เวลา 0.12 วินาทีเป็นต้นไป								
Hsin Chu	0.62 %	0.65 %	0.63 %	1.86 %	1.87 %	1.87 %	1.87 %	1.87 %
Chang Hua				1.04 %	1.03 %	1.04 %	1.04 %	1.04 %
Nei Li				0.71 %	0.72 %	0.69 %	0.71 %	0.71 %

จากผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของทั้งสามสถานี ไฟฟ้าย่อยข้างต้น แสดงให้เห็นว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมสามารถกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้าของแต่ละสถานีไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ผลการกำจัดฮาร์มอนิกดังกล่าวยังช่วยให้ปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้ามีค่าลดลงด้วยเช่นกัน

7.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการกำจัดฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้าประเทศไต้หวัน โดยเนื้อหาในส่วนแรกได้นำเสนอเกี่ยวกับโครงสร้างระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าที่มีการกระจายตัวของสถานีไฟฟ้าย่อยหลาย ๆ สถานี ตามเส้นทางการเดินรถไฟ โดยที่ทุกสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นจะรับไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเดียวกัน ถัดมาได้นำเสนอการใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานติดตั้งในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อทำการกำจัดฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมดังกล่าว ซึ่งจากการผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา พบว่า การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกำจัดฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยสามารถกำจัดฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นแต่ละในสถานีไฟฟ้าย่อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ และส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้ากลับมามีลักษณะเป็นรูปไซน์และมีค่า % THD_i ลดลงอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std 519-2014



บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสรวม โดยเริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบแรงไฟฟ้า ตามด้วยระบบกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ในส่วนระบบแรงไฟฟ้าประกอบด้วย การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับใช้แปลงแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าสามเฟสให้เป็นระบบไฟฟ้าสองเฟสในลักษณะเฟสรวม และในส่วนของระบบกำจัดฮาร์มอนิกประกอบไปด้วย โครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและการออกแบบ การตรวจจับฮาร์มอนิก การควบคุมกระแสชดเชย และการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง รายละเอียดการค้นคว้าและการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 2

ระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสพิกัด 25 kV ถึง 27.5 kV ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz เป็นระบบที่นิยมใช้สำหรับระบบแรงไฟฟ้าทางไกลที่ต้องการความเร็วสูง โดยการใช้งานระบบดังกล่าวนิยมใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสมดุเพื่อลดปัญหาเฟสไม่สมดุลที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าทางด้านการจ่าย ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ที่มีคุณสมบัติเป็นหม้อแปลงสมดุลโดยเนื้อหาในบทที่ 3 ได้นำเสนอการวิเคราะห์หม้อแปลง 4 ประเภท ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์ รวมถึงนำเสนอการเปรียบเทียบการจ่ายโหลดรูปแบบต่าง ๆ ของหม้อแปลงแต่ละชนิดซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อตมีปัญหากระแสไฟฟ้าไม่สมดุลน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟสและหม้อแปลงไฟฟ้าแบบโอเพนเดลต้า อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเรื่องต้นทุนราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าร่วมด้วย จะได้ว่า หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอว์บลองค์มีต้นทุนที่ต่ำกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต

การตรวจจับฮาร์มอนิกเพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานถือเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธีการอบอ้างอิงซิงโครนัส (วิธี SRF) เนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่มีความรวดเร็วในการคำนวณ มีความถูกต้องในการตรวจจับฮาร์มอนิก โดยในบทที่ 4 ได้นำเสนอขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการอบอ้างอิงซิงโครนัส และวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่ง (วิธี PQ) และนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับฮาร์มอนิกระหว่างวิธี SRF

และวิธี PQ ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่า วิธี SRF สามารถให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ดีกว่าวิธี PQ ทั้งในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นคลื่นรูปไซน์บริสุทธิ์และกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าเท่ากับ 1 ได้ทั้งสองกรณีของแรงดันไฟฟ้า

สำหรับในบทที่ 5 ได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ใช้สำหรับควบคุมกระแสชดเชยและการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง รวมถึงนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกและที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม โดยในการเปรียบเทียบดังกล่าวจะใช้ผลการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่มีค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามที่ได้นำเสนอไว้ ซึ่งผลการเปรียบเทียบ พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้างให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฮาร์มอนิกที่ดีใกล้เคียงกัน แต่กรณีวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมมีค่าแรงดันกระแสเฟรมของแรงดันบัสไฟตรงต่ำกว่ากรณีใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก นอกจากนี้การใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมยังใช้ตัวเก็บประจุ และตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเพียง 1 ชุด เมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกที่ต้องใช้จำนวน 2 ชุด นอกจากนี้ ในส่วนท้ายของบทนี้ได้นำเสนอการทดสอบสมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ได้ออกแบบในกรณีที่โหลดของระบบรางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงโดยใช้วิธีการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้บอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experiment ร่วมกับโปรแกรม Simulink/MATLAB ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานแบบเฟสร่วมที่ได้ออกแบบยังคงสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้โหลดมีการเปลี่ยนแปลง

การจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้านอกจากจะสามารถใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วมแล้วยังสามารถใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสได้เช่นกัน ซึ่งการตรวจจับฮาร์มอนิก การควบคุมกระแสชดเชย การควบคุมแรงดันบัสไฟตรง และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสสำหรับใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6 นอกจากนี้ในบทนี้ยังได้นำเสนอการเปรียบเทียบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากับกรณีที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม โดยเปรียบเทียบ 3 ประเด็น คือ ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก กำลังงานสูญเสียที่หม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลอนด์ และข้อมูลจำนวนและพิกัดของอุปกรณ์สำหรับการสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองวงจร โดยผลการเปรียบเทียบ พบว่า ในประเด็นประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิก และกำลังงานสูญเสียที่หม้อแปลงไฟฟ้าเลอว์บลอนด์ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานแบบเฟสร่วมให้ผลที่ดีกว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส และในส่วนของการ

ประเด็นสำหรับประเด็นจำนวนและพิกัดของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสร้างวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานพบว่า วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานแบบสามเฟสมีการใช้จำนวนอุปกรณ์ที่น้อยกว่ากรณีใช้วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม แต่อย่างไรก็ตาม วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานแบบสามเฟสจะมีพิกัดแรงดันของอุปกรณ์ที่สูงกว่ากรณีใช้วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม

ในบทที่ 7 ได้นำเสนอเกี่ยวกับระบบกำจัดฮาร์โมนิกในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้าประเทศไต้หวัน โดยได้จำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีระบบรางไฟฟ้าทั้งหมดสามสถานีไฟฟ้าย่อยเชื่อมต่อกันโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าเดียวกัน ซึ่งผลจากการติดตั้งวงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานเพื่อกำจัดฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในทุกสถานีไฟฟ้าย่อย พบว่า วงจรรอกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถลดกระแสชดเชยกำจัดกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นภายในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมของระบบรางไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพทุกสถานีไฟฟ้าย่อย

8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการศึกษาต่อยอดกรณีโหลดรางไฟฟ้าทั้งสองเฟสมีขนาดและมุมเฟสไม่เท่ากัน ซึ่งโหลดลักษณะดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดปัญหากระแสไฟฟ้าไม่สมดุลที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังนั้นนอกจากการพิจารณากำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าแล้วจะต้องมีการพิจารณาเพื่อชดเชยให้กระแสไฟฟ้าทางฝั่งสามเฟสมีความสมดุลเพิ่มอีกด้วย
2. ควรมีการพัฒนาในส่วนของการตรวจจับฮาร์โมนิกให้มีความแม่นยำมากขึ้น เพื่อให้สามารถรองรับกับโหลดกระแสไฟฟ้าของระบบรางไฟฟ้าที่มีความหลากหลายได้
3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับจุดที่พิจารณากำจัดฮาร์โมนิกที่จุดอื่นเพิ่มเติม นอกเหนือจากการพิจารณาที่ฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น การพิจารณาจุดกำจัดฮาร์โมนิกที่ขบวนรถไฟฟ้าที่อยู่ถัดจากหม้อแปลงไฟฟ้าภายในขบวนรถไฟฟ้า ซึ่งจุดดังกล่าวมีแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำ ซึ่งสามารถทำให้วงจรรอกำลังแอกทีฟที่พิจารณาที่จุดดังกล่าวมีพิกัดที่ต่ำลงอีกด้วย
4. ควรมีการศึกษาลักษณะการทำงานของโหลดการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าให้มีความสมจริงมากยิ่งขึ้น เพื่อให้สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้เป็นโหลดรางไฟฟ้าสำหรับกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้า
5. ควรมีงานภาคปฏิบัติสำหรับการสร้างระบบกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้า เพื่อใช้ยืนยันกับผลการจำลองสถานการณ์ และสามารถใช้เป็นต้นแบบสำหรับการศึกษาวิจัยและพัฒนา ระบบกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าให้ดีขึ้นต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- กองพล อารีรักษ์. (2549). การระบุเอกลักษณ์ฮาร์โมนิกสำหรับวงจรรอกกำลังแอกทีฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ทศพร ณรงค์ฤทธิ์. (2553). การกำจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรรอกกำลังแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมดุล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นคร จันทกร (2559). 3. ช่างรถไฟความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- พลสิทธิ์ ศานติประพันธ์. (2554). การควบคุมกระแสขดเคี้ยวของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานด้วยเทคนิคพีดีบีเอ็มบนแกนดิจิทัล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- 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. Zouidi, F. Fnaiech and K. Al-Haddad (2006). Voltage source Inverter Based three-phase shunt active Power Filter Topology Modeling and Control Strategies. **2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**. 785-790
- Ant'onio Martins, Sandro Vale, Vitor Sobrado, and Adriano Carvalho (2014). Comparison of Current Control Methods for Grid-Connected Low-Power Single-Phase Converters. **IECON 2014 - 40th Ann. Conf. of the IEEE Ind.**
- Atiqi Mohd Zainuri, Mohd Radzil, and al. (1996). DC-link capacitor voltage control for single- phase shunt active power filter with step size error cancellation in self-charging algorithm. **IET Power Electron**. 9(2): 323-335.
- B A. Angelico, L B.G. Campanhol, S A. Oliveira da silva (2014). Instantaneous Power Theory with Fourier and Optimal Predictive Controller Design for Shunt Active Power Filter. **Hindawi Publishing Corporation Modelling and Simulation in Engineering**.

- B. Angélico, S. Oliveira da Silva, L. Campanhol. (2014). Proportional-integral/proportionalintegral-derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram. **IET Power Electronics**. 7: 2647-2659
- B. Fujita (2009). A Single-Phase Active Filter Using an H-Bridge PWM Converter With a Sampling Frequency Quadruple of the Switching Frequency. **IEEE Transactions on Power Electronics**.: 1-8.
- B. Han (2009). Single-Phase Active Power Filter using FFT with Harmonic Phase-Delay Compensation. **IEEE Transactions on industrial electronics**.: 1-6
- B. Leandro, V.-D. Bacon, A. Oliveira and B.-A. Angelico (2017). Tuning of a PI-MR Controller Based on Differential Evolution Metaheuristic Applied to the Current Control Loop of a Shunt-APF. **IEEE Transactions on industrial electronics**. 56(8): 3128–3143.
- B. Mellitt, J. Allan, Z.Y. Shao, and others (1990). Computer-based methods for induced-voltage calculations in AC railways. **IEE PROCEEDINGS**. 137(1): 59-72
- B.-K. Chen and B.-S. Guo (1996). Three Phase Models of Specially Connected Transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 11(1): 323-330
- Blair A. Ross (1971). A Survey of Western European AC Electrified Railway Supply Substation and Catenary System Techniques and Standards. **IEEE Transactions on industrial and general applications**. 7(5): 666-672
- BY F. H. Brehob and F. H. Craton (1932). Engineering Features of Three Power Locomotives. **Transactions A. I. E. E.** Jan 1: 489-495
- BY W. A. Giger (1933). Simplified Speed Control for Single-Phase Locomotives. **Transactions A. I. E. E.** Jan 1: 379-385
- C.-Y Hsu and H.-Y Wu (1995). A New Single-phase Active Power Filter with Reduced Energy Storage Capacitor. **IEEE Transactions on Power Delivery**.: 202-208
- Ch-P. Huang, Ch-J Wu, Y-S. Chuang, and others (2006). Loading Characteristics Analysis of Specially Connected Transformers Using Various Power Factor Definitions. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 21(3): 1406-1413
- F. Caracciolo, A. Fumi and E. Cinieri (2016). Managing the Italian High-Speed Railway Network. **IEEE Electrification Magazine**. Seb: 42-47

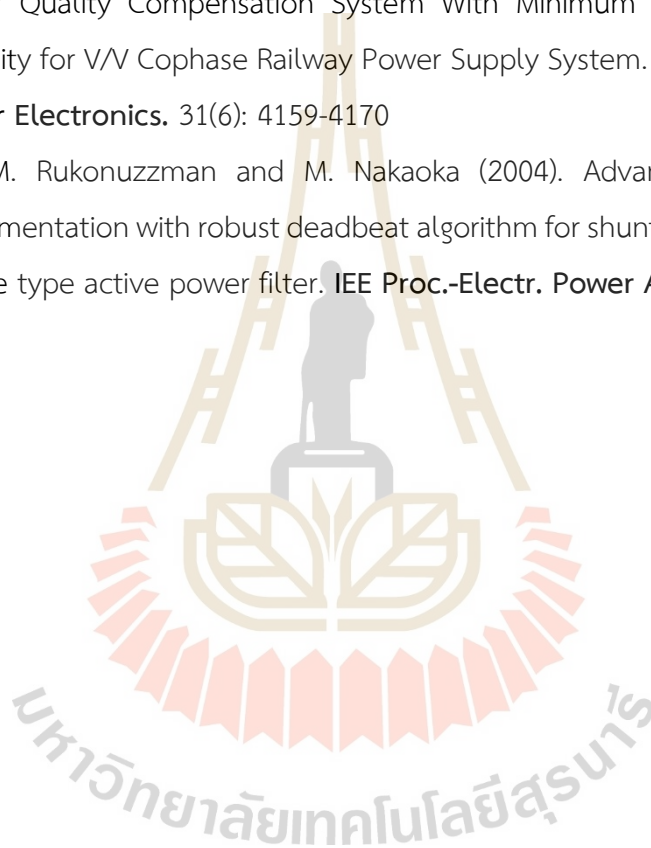
- F. Fathima and S. Prabhakar Karthikeyan (2016). Harmonic analysis on various traction transformers in co-phase traction system. **Ain Shams Engineering Journal**. 7: 627-638
- H. Hu, Z. He and S. Gao (2015). Passive filter design for china high-speed railway with considering harmonic resonance and characteristic harmonics. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 30(1): 505-514
- H. Morimoto, T. UZuka and A. Horiguchi (2009). New Type of Feeding Transformer for AC Railway Traction System. **PEDS2009**.: 800-805
- H.-L. Jou, J.-C. Wu, H.-Y. Chu (1994). New Single-phase Active Power Filter. **IEE Proc.-Electr. Power**. 141(3): 129-134
- I. Colak and R. Bayindir (2010). DC Bus Voltage Regulation of an Active Power Filter Using a Fuzzy Logic Controller. **Int. Conf. on Machine Learning and Applications**
- I. Krastev, P. Tricoil, S. Hillmansen and M. Chen (2016). Advanced electrification systems with static converters. **IEEE Electrification Magazine**. Seb: 6-14
- Ingram, D.M.E. and Round, S.D. (1997). A Novel Digital Hysteresis Current Controller for an Active Power Filter. **IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems**. 2: 744-749
- 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. Lie, J. Yang, Z. Wan, Jaiotong and Tarafdar (1999). A New Approach for Single-Phase Harmonic Current Detecting and Its Application in A Htbrid Active Power Filter. **IECON '99 Proc.**: 849-854
- J. V. B. Duer (1915). Third Rail and Trolley System of the West Jersey and Seashore Railroad. **Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers**. July 1: 1237-1253
- J.-C. Wu and H.-L. jou (1996). Simplified control method for the single-phase active power filter. **IEE Proc.-Electr. Power**. 143(3): 219-224.
- K.-C. Lu and N. Chen (1997). The phasor combination differential protection for Le-Blanc transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 12(4): 1434-1438

- L. Battistelli, D. Lauria and P. Vernillo (2001). Control strategy of advanced 25kV-50 Hz electrified railway systems. **IEE PROC-Electr.** 148(1): 97-104
- L. Benchaita, S. Saadate and A. Salem nia (1999). A Comparison of Voltage Source and Current Source Shunt Active Filter by Simulation and Experimentation. **IEEE Transactions on Power Systems.** 14(2): 837-842.
- 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 Electron.** 10(6): 637-645
- L.R. Denning (1987). Air Clearances for Electric Railway. **Influence of commutating reactance on the design of DC power supply converters.:** 181-188
- 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
- M. Shu, M. Amran, A. Che Soh, and N. Mariun (2016). DC-link capacitor voltage control for singlephase shunt active power filter with step size error cancellation in self-charging algorithm. **IET Power Electron.** 9(2): 223-235.
- 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. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale and A. Miraoui (2009). A Single-Phase DG Generation Unit With Shunt Active Power Filter Capability by Adaptive Neural Filtering. **IEEE Transactions on industrial electronics.** 56(8): 3128-3143.
- M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale and A. Miraoui (2009). Current Harmonic Compensation by a Single-Phase Shunt Active Power Filter Controlled by Adaptive Neural Filtering. **IEEE Transactions on industrial electronics.** 56(8): 3128-3143.
- M. Gonzalez, V. Cardenas and F. Pazos (2004). DQ Transformation Development for Single-Phase Systems to Compensate Hannonic Distortion and Reactive Power. **IEEE Transactions on industrial electronics.** 9(2): 177-182.
- M. Rukonuzzaman and M. Nakaoka (2001). Single-phase shunt active power filter with harmonic detection. **IEE Proc.-Electr.** 149(5): 343-350

- M. Saitou, N. Matsui and T. Shimizu (2003). A Control Strategy of Single-phase Active Filter Using a Novel d-q Transformation. **IAS Ann. Meeting on Conf.**
- M.El-Habrouk and M.K.Darwish (2001). Design and implementation of a modified Fourier analysis harmonic current computation technique for power active filters using DSPs. **IEE Proc.-Electr.** 148(1): 21-28
- N. Howard, C. eng, F. I. E. E. (1983). Electrification of the Midland Suburban services. **IEE PROCEEDINGS.** 130(2): 109-120
- N. R. 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.
- P. E. Sutherland and et al (2006). System impacts evaluation of a single-phase traction load on a 115-kV transmission system. **IEEE Transactions on Power Delivery.** 21(2): 837-844
- P. E. Sutherland, M. Wacławski and M. F. McGranahan (2006). System Impacts Evaluation of a Single-Phase Traction Load on a 115-kV Transmission System. **IEEE Transactions on Power Delivery.** 21(2): 837-844
- P. J. Lambeth and D.H. Nguyen (1985). Air Clearances for Electric Railway. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.** 104(10): 2872-2878
- P.-C. Tan, P Loh and D. Holmes (2004). A robust multilevel hybrid compensation system for 25-kv electrified railway applications. **IEEE Transactions on Power Electronics.** 19(4): 1043-1051
- S. Fukuda and T.Yoda (2001). A Novel Current-Tracking Method for Active Filters Based on a Sinusoidal Internal Model. **IEEE Transactions on industrial applications.** 37(3): 888-895.
- S. Senini and P. J. Wolfs (2000). Hybrid active filter for harmonically unbalanced three phase three wire railway traction loads. **IEEE Trans. Power Electron.** 15(4): 702-710
- S.H. Case, B. SC, C.eng, M.I.E.E., and others (1983). Electrification of Taiwan main-line railway from Keelung to Kaohsiung. **IEE PROCEEDINGS.** 130(5): 289-301

- S.-R. Huang, Y.-L. Kuo, B.-N. Chen, K.-Ch. Lu and M.-Ch. Huang. (2001) A short circuit current study for the power supply system of Taiwan railway. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 16(4): 492-497
- S-R. Huang and B-N. Chen (2002). Harmonic Study of the Le Blanc Transformer for Taiwan Railway's Electrification System. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 17(2): 495-499
- T.-H. Chen (1994). Comparison of Scott and Leblanc transformers for supplying unbalanced electric railway demands. **Electric Power Systems Research**. 12: 235-240
- Thomas, T., Haddad, K., Joos, G. and Jaafari, A. (1998). Design and performance of active power filters. **IEEE Industry Applications Magazine**. 4: 38-46.
- V. Khadkikar, A.Chandra and B.N. Singh (2009). Generalised single-phase p-q theory for active power filtering: simulation and DSP-based experimental investigation. **IET Power Electronics**. 2(1): 67-68.
- V. Khadkikar, M. Singh, A. Chandra and B. Singh (2010). Implementation of Single-phase Synchronous dq Reference Frame Controller for Shunt Active Filter under Distorted Voltage Condition. **PEDES Power Electronics**.
- V-F. Andres, M-R. Panfilo G. Escobar L-P. Ceser (2013). A Model-Based Controller for the Cascade H-Bridge Multilevel Converter Used as a Shunt Active Filter. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 60(11): 5019-5028.
- X. Xu (2012). Research of electrified railway harmonic suppression based on H-infinity control. **Journal of Computer**. 7(12): 3075-3081
- Z. He, Z. Zheng and H. Hu (2016). Power quality in high-speed railway systems. **International Journal of Rail Transportatio** 1(2): 71-79
- Z. Shu and et al (2013). Digital Detection, Control, and Distribution System for Co-Phase Traction Power Supply Application. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 60(5): 1831-1839
- 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. Zhang, B. Wu, J. Kang and L. Luo (2009). A Multi-Purpose Balanced Transformer for Railway Traction Applications. **IEEE Transactions on Power Delivery**. 24(2): 711-718
- B. Xie et al (2018). A Compensation System for Cophase High-Speed Electric Railways by Reactive Power Generation of SHC&SAC. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 65(4): 2956-2966
- B. Chen, C. Zhang, C. Tian, J. Wang and J. Yuan (2016). A Hybrid Electrical Magnetic Power Quality Compensation System With Minimum Active Compensation Capacity for V/V Cophase Railway Power Supply System. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 31(6): 4159-4170
- K. Nishida, M. Rukonuzzman and M. Nakaoka (2004). Advanced current control implementation with robust deadbeat algorithm for shunt single-phase voltage-source type active power filter. **IEE Proc.-Electr. Power Appl**. 151(3): 283-288



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a golden-yellow triangular structure with a silhouette of a person standing inside. Below the triangle is a circular emblem with a red and white scalloped border. The university's name is written in Thai script along the bottom arc of the emblem.

ภาคผนวก ก

โค้ดโปรแกรมภาษาซีการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์ดมอนิกในระบบราง
ไฟฟ้าแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โค้ดโปรแกรมภาษาซีการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าแบบ ฮาร์ดแวร์ในลูป

```
1.  #include <stdio.h>
2.  #include <rtdx.h>  /* RTDX_Read      */
3.  #include "target.h" /* TARGET_INITIALIZE */
4.  #include "math.h"
5.  void Harmonic_railway_elimitate(float *in1, float *out1);
6.  float din1[7];
7.  float dout1[4];
8.  /**alpha tobeta Variable**/
9.  int16 point=0;
10. int16 xx=417;
11. int16 point1=0;
12. int16 xx1=0;
13. //phase M
14. float IAlM[1668];
15. float IBeM;
16. //phase T
17. float IAlT[1668];
18. float IBeT;
19. /**PLLparamitor**/
20. float Ts=1e-5;
21. float VAL[1668];
22. float VBe;
23. float Vqref=0;
24. float Vqerror=0;
25. float zetaq;
26. float wt;
```

```

27.  float vq;
28.  float kpq= 0.021, kiq=53;
29.  //SRF_detection
30.  float idM;
31.  float idT;
32.  float iqM;
33.  float iqT;
34.  float zetaM;
35.  float zetaT;
36.  float iddcM;
37.  float iddcT;
38.  float irefnewM;
39.  float irefnewT;
40.  float icalphaM;
41.  float icalphaT;
42.  int16 point3=0;
43.  //Low pass filter
44.  float ifilterM,xM;
45.  float ifilterT,xT;
46.  //Vdc bus voltage control_paramitor
47.  float Vref=1700;
48.  float Verror=0;
49.  float Kpv=0.267,Kiv=0.592;
50.  float Gpv=0,Giv=0;
51.  float Idc;
52.  //currernt control_paramitor
53.  float lerrorM=0;
54.  float GpM=0,GiM=0;
55.  float lerrorT=0;
56.  float GpT=0,GiT=0;
57.  float Kpi=4,Kii=53300;

```

```

58.     float UrefM;
59.     float UrefT;
60.     /*-- defines RTDX channels --*/
61.     RTDX_CreateInputChannel (ichan1);
62.     RTDX_CreateOutputChannel(ochan1);
63.     void main()
64.     {
65.         TARGET_INITIALIZE();           /* Target-specific initialization */
66.         RTDX_enableInput (&ichan1);    /* Enable channels */
67.         RTDX_enableOutput(&ochan1);
68.         while (1) {
69.             /* Read inputs from host */
70.             RTDX_read( &ichan1, din1, 6 * sizeof(long) );
71.             /* Call function */
72.             Harmonic_railway_elimitate(din1,dout1);
73.             /* Write outputs to host */
74.             while ( RTDX_writing != NULL )
75.             { /* wait for previous write to complete */
76.                 #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
77.                 RTDX_Poll();
78.                 #endif
79.             }
80.             RTDX_write( &ochan1, dout1, 4 * sizeof(long) );
81.         }
82.     }
83.     /*----- add_sub_buffers -----*/
84.     void Harmonic_railway_elimitate(float *in1, float *out1)
85.     {
86.         short t;
87.         for (t = 0; t<1; t++) {
88.             //SRF_detection

```

```

89. //step1 aphapa to beta
90. point=point+1;
91. if(point>=2085){point=417;}
92. xx=point;
93. point1=point1+1;
94. if(point1>=1668){point1=0;}
95. xx1=point1;
96. // phase M
97. IAlM[xx1]=in1[1];
98. IBeM=IAlM[xx-417];
99. //phase T
100. IAlT[xx1]=in1[3];
101. IBeT=IAlT[xx-417];
102. //PLL
103. VAl[xx1]=in1[5];
104. VBe=VAl[xx-417];
105. //****PLL_controller****//
106. zetaq=wt+(1.5708);
107. vq=(VAl[xx1]*-sin(zetaq))+(VBe*cos(zetaq));
108. Vqerror = Vqref-vq; // Verror
109. Gpv = Vqerror*Kpv; //Kp
110. Giv = Giv + (Kiv*Vqerror*Ts); //Ki
111. wt= Gpv + Giv ;
112. //step2
113. // phase M
114. zetaM=wt+(1.5708);
115. idM=(IAlM[xx1]*cos(zetaM))+(IBeM*sin(zetaM));
116. iqM=(IAlM[xx1]*-sin(zetaM))+(IBeM*cos(zetaM));
117. //phase T
118. zetaT=wt+(1.5708);
119. idT=(IAlT[xx1]*cos(zetaT))+(IBeT*sin(zetaT));

```

```

120. iqT=(IaIT[xx1]*-sin(zetaT))+IbET*cos(zetaT));
121. //step3 LPF phase M
122. xM=idM;
123. ifilterM=0.9994*ifilterM+0.0006281*xM;
124. // phase T
125. xT=idT;
126. ifilterT=0.9994*ifilterT+0.0006281*xT;
127. //step4 phase N
128. iddcM=ifilterM;
129. icalphaM=(iddcM-Idc)*cos(zetaM);
130. //phase T
131. iddcT=ifilterT;
132. icalphaT=(iddcT-Idc)*cos(zetaT);
133. /***step5 Start compensation at 0.04 s***/
134. irefnewM=0;
135. irefnewT=0;
136. point3=point3+1;
137. if(point3>=4000){irefnewM=in1[1]-icalphaM; irefnewT=in1[3]-icalphaT;
point3=4000; }
138. // PI V loop1
139. Verror = Vref-in1[0]; // error
140. Gpv = Verror*Kpv; //Kp
141. Giv = Giv + (Kiv*Verror*Ts); //Ki
142. Idc= Gpv + Giv ;
143. // PI cuurent M

144. lerrorM = irefnewM-in1[2]; // error
145. GpM = lerrorM*Kpi; //Kp
146. GiM = GiM + (Kii*lerrorM*Ts);//Ki
147. UrefM= GpM + GiM ;
148. // PI cuurent T

```

```

149.   lerrorT = irefnewT-in1[4];    // error
150.   GpT = lerrorT*Kpi;           //Kp
151.   GiT = GiT + (Kii*lerrorM*Ts); //Ki
152.   UrefT= GpT + GiT ;
153.   out1[0] = irefnewM;
154.   out1[1] = UrefM;
155.   out1[2] = UrefT;
156.   out1[3] = irefnewT;
157.   }
158.   return;
159.   }

```

การอธิบายโค้ดโปรแกรมภาษาซีการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าแบบฮาร์ดแวร์ในรูป

บรรทัดที่ 1 ถึง 4 คือ การเรียกใช้งานฟังก์ชันพื้นฐานของภาษาซีผ่านคำสั่ง `stdio.h` การเรียกใช้งานช่องสำหรับสื่อสาร RTDX ผ่านคำสั่ง `rt dx.h` การเรียกใช้บอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000TM Experiment Kit ผ่านคำสั่ง `target.h` และการเรียกใช้ฟังก์ชันสำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของภาษาซีผ่านคำสั่ง `math.h`

บรรทัดที่ 5 คือ การประกาศสร้างฟังก์ชัน `Harmonic_railway_elimitate`

บรรทัดที่ 6 ถึง 7 คือ การประกาศตัวแปรสำหรับใช้เก็บข้อมูลเพื่อรับและส่งข้อมูลระบบหว่าโปรแกรม MATLAB/Simulink กับบอร์ด DSP ซึ่งได้แก่ `din1[7]` และ `dout1[4]`

บรรทัดที่ 8 ถึง 18 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้สำหรับการแปลงค่ากระแสไฟฟ้าบนแกนแอลฟาไปแกนเบต้า

บรรทัดที่ 19 ถึง 28 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้สำหรับการคำนวณหามุม ωt ด้วยเทคนิค PLL

บรรทัดที่ 29 ถึง 42 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF

บรรทัดที่ 43 ถึง 45 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้สำหรับวงจรกรองผ่านต่ำ

บรรทัดที่ 46 ถึง 51 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้สำหรับระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

บรรทัดที่ 52 ถึง 59 คือ การประกาศตัวแปรที่ใช้สำหรับระบบควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ

บรรทัดที่ 61 ถึง 62 คือ การสร้างช่องทางสื่อสาร RTDX สำหรับการส่งข้อมูลอินพุต (ichan1) และเอาต์พุต (ochan1) ระหว่างบอร์ด DSP และโปรแกรม MATLAB/Simulink

บรรทัดที่ 65 คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับเรียกใช้งานบอร์ด DSP

บรรทัดที่ 66 ถึง 67 คือ การเรียกใช้งานช่องทางสื่อสาร ichan1 และ ochan1

บรรทัดที่ 70 คือ การอ่านข้อมูลที่ส่งมาจากโปรแกรม MATLAB/Simulink ผ่าน ichan1 และเก็บข้อมูลไว้ใน din1

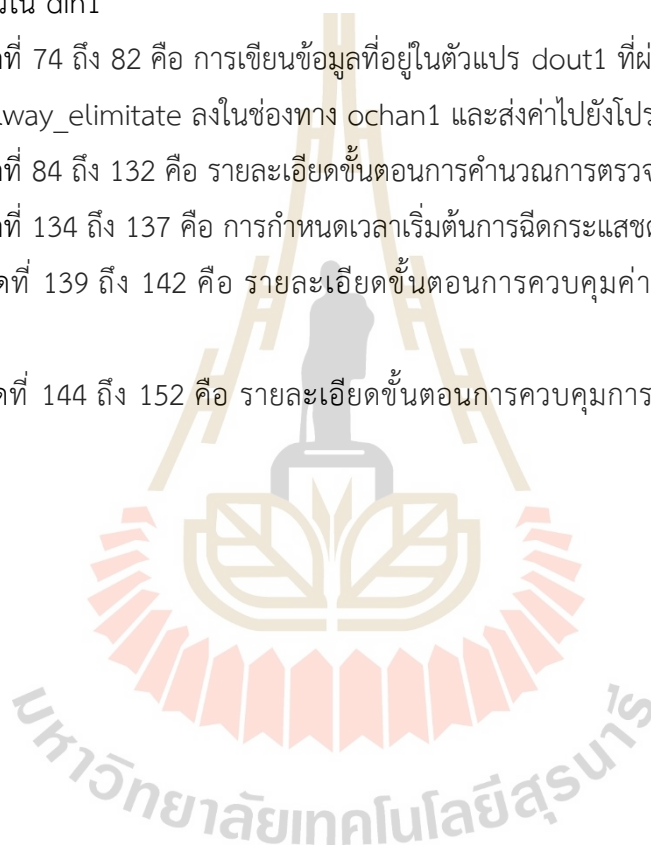
บรรทัดที่ 74 ถึง 82 คือ การเขียนข้อมูลที่อยู่ในตัวแปร dout1 ที่ผ่านการคำนวณบนฟังก์ชัน Harmonic_railway_elimitate ลงในช่องทาง ochan1 และส่งค่าไปยังโปรแกรม MATLAB/Simulink

บรรทัดที่ 84 ถึง 132 คือ รายละเอียดขั้นตอนการคำนวณการตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF

บรรทัดที่ 134 ถึง 137 คือ การกำหนดเวลาเริ่มต้นการฉีดกระแสชดเชยที่เวลา 0.04 วินาที

บรรทัดที่ 139 ถึง 142 คือ รายละเอียดขั้นตอนการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

บรรทัดที่ 144 ถึง 152 คือ รายละเอียดขั้นตอนการควบคุมการฉีดกระแสชดเชยด้วยตัวควบคุมพีไอ



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการประมาณราคาสำหรับการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟ

แบบขนาน

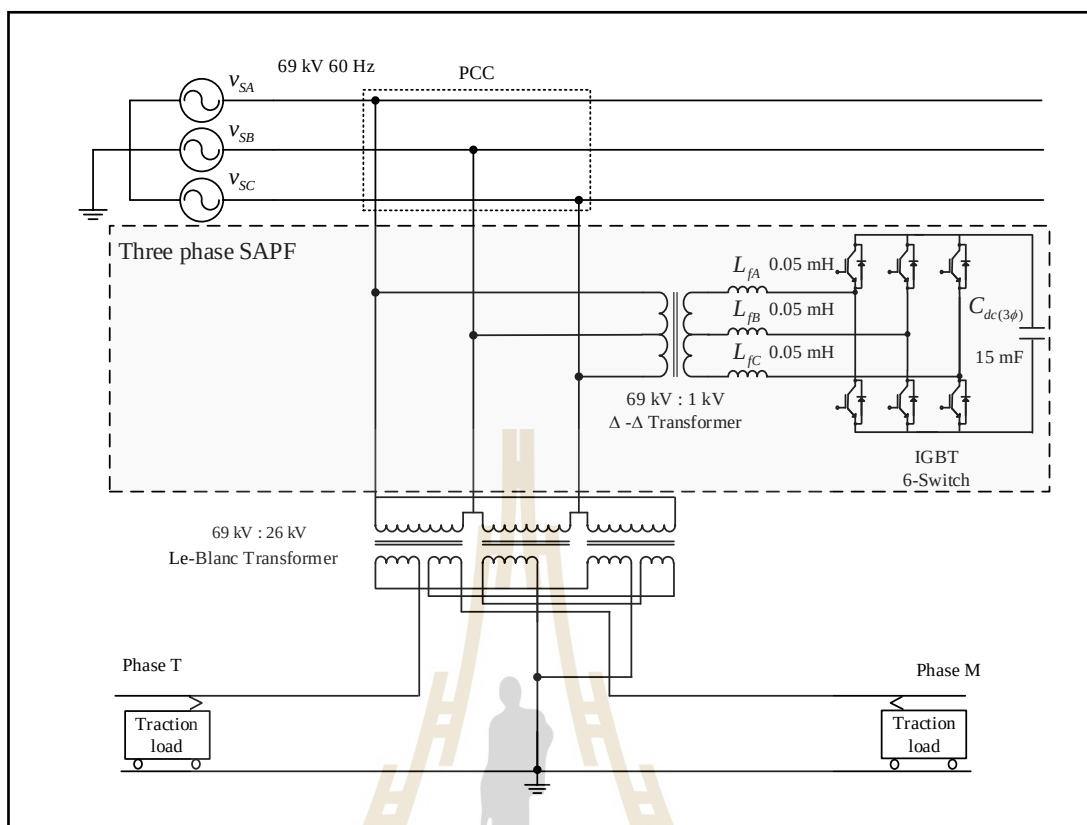
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประมาณราคาสำหรับการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน

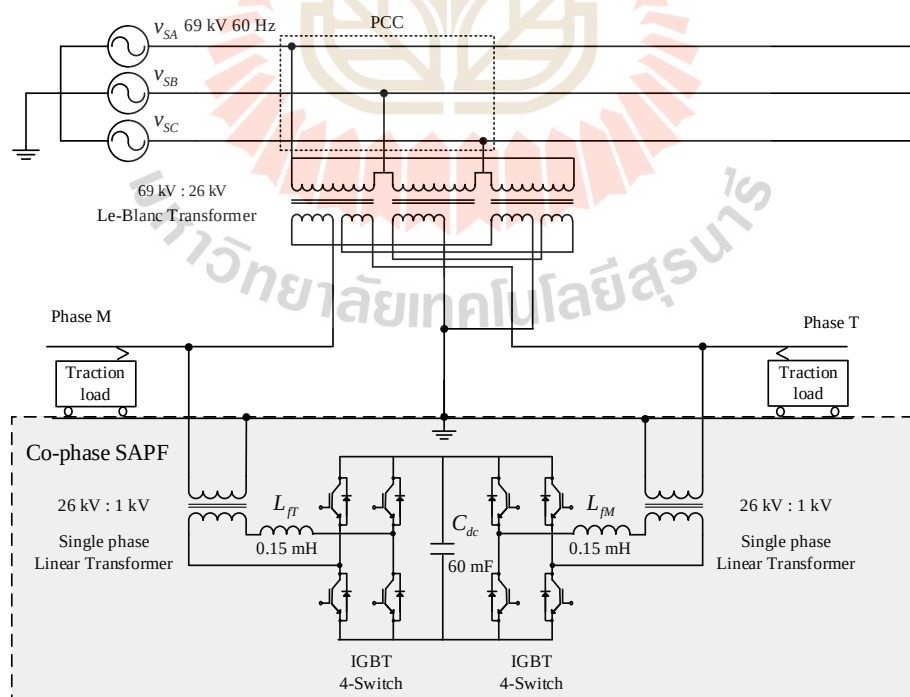
ในส่วนนี้จะเป็นอย่างการประมาณราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าระหว่างกรณีการใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส และกรณีการใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม โดยรายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสแสดงได้ดังรูปที่ ข.1 และกรณีใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมแสดงได้ดังรูปที่ ข.2 โดยอุปกรณ์ที่ใช้การสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานในหัวข้อนี้จะเลือกพิจารณาเฉพาะอุปกรณ์หลัก ๆ ที่สำคัญ ได้แก่ โมดูลไอจีบีที (IGBT module) ที่ใช้สำหรับสร้างเป็นวงจรรอกกำลังแอกทีฟ ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้เป็นตัวเหนี่ยวนำวงจร (L_f) ตัวเก็บประจุสำหรับใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานของวงจรรอกกำลังแอกทีฟ (C_{DC}) ซึ่งขนาดพิกัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองกรณีนี้จะถูกกำหนดโดยพิกัดแรงดันไฟฟ้าฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าลดระดับแรงดันที่เชื่อมต่อกับจุดที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกของทั้งสองกรณีวงจร โดยหลักการที่ใช้ในการเลือกอุปกรณ์จะพิจารณาจากพิกัดอุปกรณ์ที่ต้องใช้เทียบกับพิกัดอุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้โดยทั่วไปจากพิกัดดังกล่าวจะได้ขนาดพิกัดของอุปกรณ์สำหรับการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองกรณีดังแสดงในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 พิกัดอุปกรณ์ที่พิจารณาสำหรับสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนาน

ประเภทอุปกรณ์	วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส		วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม	
	รายละเอียด	จำนวน (ชุด)	รายละเอียด	จำนวน (ชุด)
1. วงจรไอจีบีทีอินเวอร์เตอร์	IGBT 6 Switch พิกัดแรงดัน 2300 V พิกัดกระแส 2200 A	1	IGBT 4 Switch พิกัดแรงดัน 1700 V พิกัดกระแส 2400 A	2
2. ตัวเก็บประจุ	ขนาด 15 mF พิกัดแรงดัน 2300 V	1	ขนาด 60 mF พิกัดแรงดัน 1700 V	1
3. ตัวเหนี่ยวนำ	ขนาด 0.05 mH พิกัดกระแส 2200 A	3	ขนาด 0.15 mH พิกัดกระแส 2400 A	2



รูปที่ ข.1 การสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส

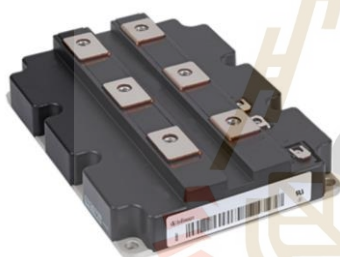


รูปที่ ข.2 การสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสร่วม

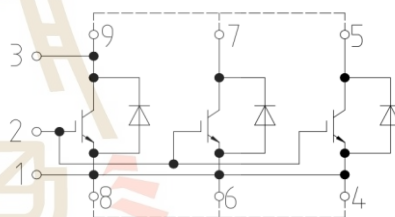
กรณีที่ 1 การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส

การเลือกอุปกรณ์สำหรับใช้สร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสในกรณีนี้จะเลือกใช้โดยคำนึงถึงค่าพิกัดอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน โดยจะทำการเลือกใช้ให้สอดคล้องกับระบบที่พิจารณาจริง ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการเลือกใช้อุปกรณ์แต่ละประเภทได้ดังนี้

อุปกรณ์ที่ 1 วงจรไอจีบีทีอินเวอร์เตอร์ จะพิจารณาเลือกใช้ไอจีบีทีโมดูลของบริษัทผู้ผลิต Infineon รุ่น FZ1500R33HE3 มีพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1500 A และพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3300 V มีโครงสร้างภายนอกแสดงได้ดังรูป ข.3 (ก) และโครงสร้างภายในแสดงได้ดังรูป ข.3 (ข) โดยโครงสร้างภายในของไอจีบีทีโมดูลดังกล่าวประกอบด้วยวงจรไอจีบีทีย้อยจำนวน 3 ตัวต่อแบบขนานกัน อย่างไรก็ตามสำหรับการใช้ไอจีบีทีโมดูลดังกล่าวเพื่อสร้างเป็นวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสที่พิกัดกระแส 2200 A และแรงดัน 2300 V สวิตช์ทั้ง 6 ตัวของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสในรูปที่ ข.1 จะต้องใช้ไอจีบีทีโมดูลชนิดนี้รวมทั้งหมด 12 ชุด โดยที่สวิตช์แต่ละตัวจะใช้ไอจีบีทีโมดูลจำนวน 2 ชุด ต่อขนานกัน



(ก) โครงสร้างภายนอก



(ข) โครงสร้างภายใน

รูปที่ ข.3 วงจรไอจีบีทีโมดูลรุ่น FZ1500R33HE3

ที่มา: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/igbt-modules/fz1500r33he3/>

อุปกรณ์ที่ 2 ตัวเก็บประจุ C_{dc} เลือกใช้ของบริษัทผู้ผลิต EPCOS/TDK รุ่น B25645A2677K003 ดังรูปที่ ข.4 มีขนาดความจุไฟฟ้าเท่ากับ 670 μF พิกัดแรงดัน 2300 V ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 15 mF สำหรับทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสจะต้องตัวเก็บประจุนี้จำนวน 23 ตัวต่อขนานกัน



รูปที่ ข.4 ตัวเก็บประจุ รุ่น B25645A2677K003
ที่มา.

https://product.tdk.com/en/search/capacitor/film/power/info?part_no=B25645A2677K003

อุปกรณ์ที่ 3 ตัวเหนี่ยวนำ L_f เลือกใช้ ของบริษัทผู้ผลิต EPCOS/TDK รุ่น B82727E6403A040 ดังรูปที่ ข.5 มีขนาดเท่ากับ 1.5 mH พิกัดกระแสเท่ากับ 40 A สำหรับใช้งานตัวเหนี่ยวนำดังกล่าวเป็นตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองในแต่ละเฟส (L_{fA}, L_{fB}, L_{fC}) ของวงจรกรองกำลัง แยกทีฟแบบขนานสามเฟส ซึ่งแต่ละเฟสจะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำชนิดนี้จำนวน 2 ชุด ต่ออนุกรมกัน โดยที่แต่ละชุดประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำขนานกันจำนวน 55 ตัว ดังนั้น สำหรับการใช้งานที่พิกัด 2200 A และมีค่าความเหนี่ยวนำ 0.5 mH จะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำทั้งหมด 110 ตัว ต่อหนึ่งเฟส และรวมทั้งสามเฟส คือ 330 ตัว



รูปที่ ข.5 ตัวเหนี่ยวนำ รุ่น B82727E6403A040

ที่มา. https://product.tdk.com/en/search/emc/emc/line-filter/info?part_no=B82727E6403A040

จากการเลือกใช้งานอุปกรณ์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถประมาณราคาของอุปกรณ์เบื้องต้นที่จำเป็นสำหรับการสร้างวงจรกรองกำลังแยกทีฟแบบขนานสามเฟสสำหรับกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าได้ดังตารางที่ ข.2 ดังนี้

ตารางที่ ข.2 การประมาณราคาสำหรับการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส

ชนิดอุปกรณ์	วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส			
	พิกัด	จำนวน (ชุด)	ราคาต่อชุด	ราคารวม (บาท)
1. วงจรไอจีบีทีอินเวอร์เตอร์	3300 V, 1500 A	12	56,595.71	679,148.52
2. ตัวเก็บประจุ	670 μ F 2300V	23	10,933.09	251,461.07
3. ตัวเหนี่ยวนำ	1.5 mH 40 A	330	290.43	95,841.90
รวม				1,026,451.49

จากราคาของอุปกรณ์แต่ละประเภทในตารางที่ ข.2 สามารถสรุปการประมาณราคาอุปกรณ์เบื้องต้นสำหรับการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสเท่ากับ 1,026,451.49 บาท

กรณีที่ 2 การใช้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม

การเลือกอุปกรณ์สำหรับการสร้างวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมสามารถแสดงรายละเอียดการเลือกใช้อุปกรณ์แต่ละประเภทได้ดังต่อไปนี้

อุปกรณ์ที่ 1 วงจรไอจีบีทีอินเวอร์เตอร์ จะพิจารณาเลือกใช้ไอจีบีทีโมดูลของบริษัทผู้ผลิต Infineon รุ่น FZ1500R33HE3 พิกัดกระแสเท่ากับ 1500 A และพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3300 V เช่นเดียวกับกรณีวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส ดังนั้น สำหรับการใช้อีจีบีทีโมดูลเพื่อสร้างเป็นวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมที่มีสวิตช์ทั้งหมด 8 ตัว ดังรูปที่ ข.2 และมีพิกัดกระแส 2400 A และแรงดัน 1700 V จะต้องใช้อีจีบีทีโมดูลดังกล่าวรวมทั้งหมดจำนวน 16 ชุด โดยที่สวิตช์แต่ละตัวจะใช้อีจีบีทีโมดูลต่อขนานกัน 2 ชุด

อุปกรณ์ที่ 2 ตัวเก็บประจุ C_{dc} เลือกใช้ของบริษัทผู้ผลิต EPCOS/TDK รุ่น B25645A1108K003 ดังรูปที่ ข.6 ซึ่งมีขนาดความจุไฟฟ้าเท่ากับ 1025 μ F พิกัดแรงดัน 1800 V ดังนั้น เพื่อให้ได้ค่าความเก็บประจุเท่ากับ 60 mF สำหรับทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานของวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม จะต้องตัวเก็บประจุชนิดนี้ต่อขนานกันจำนวน 58 ตัว

จากตารางที่ ข.2 และตารางที่ ข.3 เมื่อพิจารณาจำนวนตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ จะสังเกตได้ว่า ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธีการต่ออนุกรมหรือต่อขนานตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดต่ำกว่าค่าพิกัดแทนการเลือกใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่มีขนาดใกล้เคียงกับค่าพิกัดที่ออกแบบได้ ทั้งนี้เนื่องจาก การหาข้อมูลราคาต่อชุดสำหรับตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ตามพิกัดที่ได้ออกแบบนั้นหาข้อมูลราคาค่อนข้างยาก ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกการประมาณราคาของอุปกรณ์ดังกล่าวจากพิกัดที่สามารถหาซื้อได้โดยทั่วไป

จากผลการประมาณราคาเบื้องต้นสำหรับการสร้างชุดวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าระหว่างกรณีการใช่วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟส และกรณีการใช่วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวม พบว่า กรณีการใช่วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสมีค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์เบื้องต้นอยู่ที่ราคาประมาณ 1,026,451.49บาท ส่วนกรณีการใช่วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมมีค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเบื้องต้นอยู่ที่ราคาประมาณ 1,748,760.18 บาท

หมายเหตุ การประมาณราคาในส่วนนี้ยังไม่ได้พิจารณาราคาหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ลดระดับแรงดันที่จุดที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกก่อนเชื่อมต่อเข้ากับชุดวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (กรณีวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสพิกัดแรงดัน 69 kV: 1 kV และกรณีวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมใช้หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสพิกัดแรงดัน 26 kV: 1 kV) ทั้งนี้เนื่องจาก หม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าวถูกออกแบบพิกัดแรงดันฝั่งแรงต่ำเท่ากับ 1 kV ซึ่งใช้สำหรับจำกัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้โดยเฉพาะ ซึ่งค่าพิกัดแรงดันดังกล่าวไม่ใช่พิกัดแรงดันในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปจึงไม่สามารถประมาณราคาที่เหมาะสมได้ อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสที่ใช้ลดระดับแรงดันก่อนเชื่อมต่อกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบสามเฟส จะสังเกตได้ว่า หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสที่เชื่อมต่อกับระบบส่งจ่ายฝั่งแรงสูงของระบบรางไฟฟ้า จะต้องออกแบบให้สอดคล้องกับพิกัดแรงดันของระบบส่งจ่ายของระบบรางไฟฟ้าซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามระบบส่งจ่ายไฟฟ้าของแต่ละประเทศ โดยสำหรับระบบส่งจ่ายของระบบรางไฟฟ้าประเทศไต้หวันจะใช้ระดับแรงดัน 69 kV และ 161 kV (Yasukochi D. and et al., 2018) หรือสำหรับระบบส่งจ่ายของระบบรางไฟฟ้าในประเทศไทยจะใช้ระดับแรงดัน 69 kV และ 115 kV จากข้อสังเกตดังกล่าวหมายความว่า ราคาของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการติดตั้งวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามเฟสจะมีราคาสูงขึ้นตามค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น ในขณะที่การติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสของกรณีวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานเฟสรวมนั้น จะติดตั้งที่ฝั่งแรงต่ำของระบบส่งจ่ายของระบบรางไฟฟ้า โดยมีพิกัดแรงดันประมาณ 25-27.5 kV (26 kV สำหรับระบบรางไฟฟ้าประเทศไต้หวัน) ซึ่งเป็นพิกัดแรงดันมาตรฐานของระบบรางไฟฟ้า

กระแสสลับ ดังนั้น หม้อแปลงไฟฟ้าหนึ่งเฟสในกรณีนี้จึงมีแนวโน้มราคาในการสร้างรวมถึงการติดตั้งที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับราคาหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสของกรณีวงจรกรองกำลังแยกที่เฟสแบบขนานสามเฟส



ภาคผนวก ค
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

- ฐานันตร์ ตรงใจ กองพล อารีรักษ์ และ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ (2560). การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี
ทฤษฎีกาลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งสำหรับระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส. การประชุม
วิชาการระดับชาติ TNIAC ครั้งที่ 4, สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, หน้า 176-179
- ฐานันตร์ ตรงใจ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และ กองพล อารีรักษ์ (2560). การเปรียบเทียบวิธีทฤษฎีกาลัง
รีแอกทีฟขณะหนึ่งและวิธีกรอบอ้างอิงเชิงโครนัสสำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบ
รางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40
(EECON40)., หน้า 218-221
- ฐานันตร์ ตรงใจ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และ กองพล อารีรักษ์ (2561). การเปรียบเทียบโครงสร้างของ
วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า
กระแสสลับ. วารสารวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัศรีนครินทรวิโรฒ. ปีที่ 13, ฉบับที่ 2,
หน้า 38-51
- ฐานันตร์ ตรงใจ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และ กองพล อารีรักษ์ (2562). การออกแบบวงจรกรองกำลัง
แอกทีฟแบบขนานสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า. วารสารวิชาการ
วิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัอุบลราชธานี., ปีที่ 13, ฉบับที่ 1, หน้า 29-41
- T. Trongjai, T. Narongrit, K. Areerak and S. Janpong. The Comparison of Three-Phase
and Co-Phase Shunt Active Power Filters for Harmonic Elimination in AC
Electric Railway Systems. (2021) 9th International Electrical Engineering Congress
(iEECON)., pp. 113-116

การเปรียบเทียบวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟพหุหนึ่งและวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส สำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส

The Comparison of Instantaneous Reactive Power Theory and Synchronous Reference Frame for Harmonic Detection in Single-Phase Electric Railway Systems

ฐานันตร์ ตรงใจ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์ และ กองพล อารีรัตน์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Corresponding Author: tosaporn@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าเพื่อคำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน 2 วิธี คือ วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟพหุหนึ่ง (PQ) และวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (SRF) การเปรียบเทียบดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของระบบรางเป็นไซน์บริสุทธิ์ และกรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายของระบบรางมีความเพี้ยนฮาร์มอนิก การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าทั้งสองกรณีจะใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์พบว่า การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SRF มีสมรรถนะในการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ใกล้เคียงกัน กรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นไซน์บริสุทธิ์ ส่วนในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีความเพี้ยนฮาร์มอนิกพบว่า วิธี SRF ให้สมรรถนะการตรวจจับที่ดีกว่าวิธี PQ นอกจากนี้ ทั้งสองวิธีสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบรางไฟฟ้าได้ด้วยเช่นกัน

คำสำคัญ: วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟพหุหนึ่ง, วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส, การตรวจจับฮาร์มอนิก, วงจรกรองกำลังแอกทีฟ, การกำจัดฮาร์มอนิก

Abstract

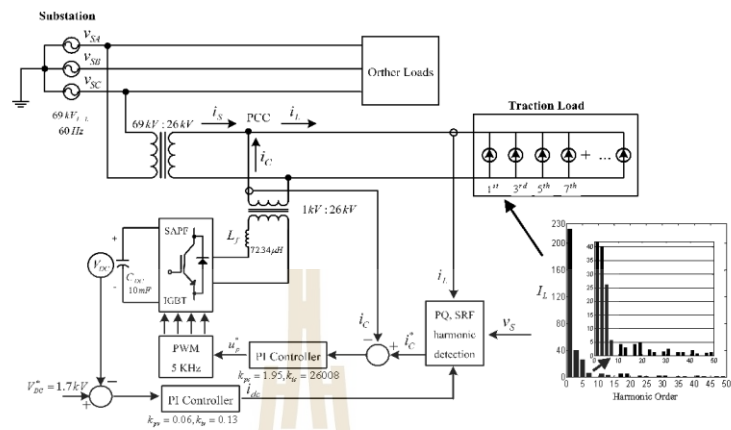
The paper presents the comparison of harmonic detection between the Instantaneous reactive power theory (PQ method) and the Synchronous reference frame (SRF method). These method are used to calculate the reference current of shunt active power filter (SAFP) in single-phase electric railway systems. The performance of PQ and SRF are compared in 2 cases study. There are the pure sinusoidal waveform of voltage source and the distorted voltage source from harmonics systems. The simulation results by Simulink/MATLAB shown that the PQ and SRF methods can provide the good performance harmonic detection in case of the pure sinusoidal waveform of voltage source system. But in another hand, the SRF method is better than PQ method for the distorted voltage source system. Furthermore, the both two methods can improve the power factor for electric railway systems too.

Keywords: Instantaneous reactive power theory, Synchronous reference frame, Harmonic detection, Active power filter, harmonic elimination

1. บทนำ

ระบบรางไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีการขนส่งที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความทนทานอย่างยิ่งในปัจจุบัน โดยระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบรางจะต่อเข้ากับโหลดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อแปลงผันกำลังไฟฟ้าสำหรับใช้ควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้ารวมถึงใช้กับโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไปภายในขบวนรถ ซึ่งการใช้งานอุปกรณ์ประเภทดังกล่าวส่งผลให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าและทำให้เกิดผลเสียต่อระบบรางไฟฟ้าหลายประการ เช่น เกิดกำลังงานสูญเสียในสายส่งของระบบไฟฟ้า ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เหนบบรับไฟ (pantograph) มีปริมาณน้อยลง เกิดสัญญาณรบกวนทำให้ระบบป้องกันอุปกรณ์ ระบบควบคุมรถไฟและระบบสื่อสารทำงานผิดพลาด [1-3] จากผลเสียที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์และหาวิธีการกำจัดฮาร์มอนิกให้ลดน้อยลง ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางมีหลายวิธีเช่น ใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter: PPF) [4] วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active power Filter: SAFP) [5] วงจรอาร์พีซี (Railway Power Conditioners: RPC) [6] หรือการนำมาร่วมกันเรียกว่าวงจรไฮบริด (Hybrid) [6] ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและเงื่อนไขในการเลือกใช้งานแตกต่างกัน บทความนี้มุ่งเน้นการกำจัดฮาร์มอนิกและการชดเชยค่าตัวประกอบกำลังในระบบรางไฟฟ้าเป็นหลักจึงเลือกใช้งานวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (SAFP) ดังแสดงในรูปที่ 1 วงจรดังกล่าวที่มีความยืดหยุ่นสูงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของโหลดในระบบไฟฟ้า ไม่ทำให้เกิดปัญหาไรเซนเนสเมื่อเทียบกับวงจรพาสซีฟ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดฮาร์มอนิก โดยการกำจัดฮาร์มอนิกด้วย SAFP มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ การตรวจจับฮาร์มอนิก ซึ่งบทความนี้นำเสนอการจำลองสถานการณ์การตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าโดยจะเปรียบเทียบระหว่างการใช้วิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟพหุหนึ่ง (Instantaneous reactive power theory: PQ) [7] และวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (Synchronous Reference Frame: SRF) [8] ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสองวิธีเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและมีความถูกต้องในการตรวจจับ อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบรางไฟฟ้าได้ด้วย

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 40 (EECON-40) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



รูปที่ 1 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยตัวกรองกำลังแอกทีฟ

การนำเสนอเนื้อหาในบทความนี้ประกอบไปด้วยหัวข้อที่ 2 คือ การอธิบายวิธีการตรวจสอบสภาวะของตัวกรอง PQ หัวข้อที่ 3 จะอธิบายวิธีการตรวจสอบสภาวะของตัวกรอง SRF หัวข้อที่ 4 จะนำเสนอการกำจัดสภาวะของในระบบรางไฟฟ้าด้วยตัวกรองกำลังแอกทีฟ โดยใช้การตรวจสอบสภาวะของตัวกรอง PQ เปรียบเทียบกับวิธี SRF และในหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการสรุปผลที่ได้

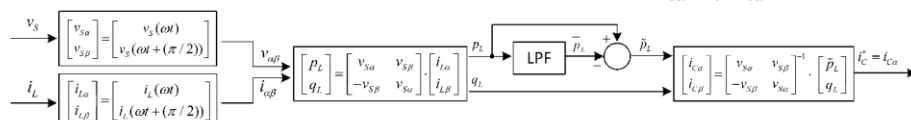
2. การตรวจสอบสภาวะของตัวกรองกำลังแอกทีฟ

ขั้นตอนที่ 1

การตรวจสอบสภาวะของตัวกรองกำลังแอกทีฟที่ขั้นตอนที่ 1 หรือวิธี PQ สำหรับคำนวณหากระแสอ้างอิงให้กับ SAPF มีรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณดังนี้

ขั้นที่ 1 แปลงปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (v_s) และกระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_L) ให้เป็นค่าแรงดันและกระแสบนแกน $\alpha\beta$ โดยใช้สมการที่ 1 และ 2 โดยที่ปริมาณบนแกน α จะมีขนาดและมุมเฟสเท่ากับปริมาณบนแกนเฟส ส่วนปริมาณบนแกน β จะมีขนาดเท่ากับแกนเฟสเช่นกัน แต่มุมเฟสจะเลื่อนไปเท่ากับ $\pi/2$

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_s(\omega t) \\ v_s(\omega t + (\pi/2)) \end{bmatrix} \quad (1)$$



รูปที่ 2 แผนภาพการตรวจสอบสภาวะของตัวกรองกำลังแอกทีฟที่ขั้นตอนที่ 1

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(\omega t) \\ i_L(\omega t + (\pi/2)) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ขั้นที่ 2 คำนวณค่ากำลังแอกทีฟของหนึ่ง (p_L) และค่ากำลังรีแอกทีฟของหนึ่ง (q_L) ที่โหลดโดยใช้สมการที่ 3

$$\begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ขั้นที่ 3 ใช้วงจรกรอง (Filter) แยกกำลังแอกทีฟที่เป็นปริมาณสาร์โมนิก $\bar{p}_L$ ออกจากกำลังแอกทีฟพื้นฐาน ($\bar{p}_L$) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4 (ในบทความนี้ใช้วงจรกรองผ่านต่ำ Low pass filter: LPF อันดับ 3 ความถี่ตัด 30 Hz)

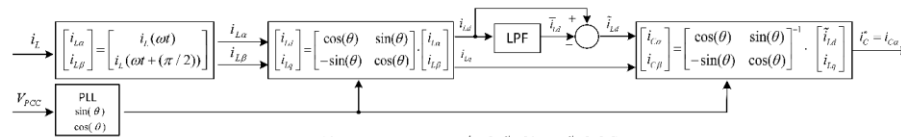
$$p_L = \bar{p}_L + \hat{p}_L \quad (4)$$

ขั้นที่ 4 คำนวณหากระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยสาร์โมนิกที่อยู่นบนแกน $\alpha\beta$ โดยใช้สมการที่ 5

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

ขั้นที่ 5 กำหนดให้กระแสอ้างอิงสำหรับการชดเชยบนแกนเฟส (i_c^*) มีค่าเท่ากับกระแสอ้างอิงบนแกน α ($i_{c\alpha}$) ($i_c^* = i_{c\alpha}$)

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 40 (EECON-40) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



รูปที่ 3 แผนภาพการควบคุมตัวกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงโรตารี

จากขั้นตอนการตรวจจับสนามฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ ข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนภาพการคำนวณได้ดังที่ รูปที่ 2

3. การตรวจจับสนามฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงโรตารี

การตรวจจับสนามฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงโรตารี หรือวิธี SRF เพื่อใช้คำนวณหากระแสอ้างอิงให้กับวงจร SAPF มีรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณดังนี้

ขั้นที่ 1 แปลงค่ากระแสไฟฟ้าบนแกนเฟสที่โหลด (i_L) เป็นกระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$) โดยใช้สมการที่ 2 (เหมือนกับวิธี PQ)

ขั้นที่ 2 แปลงค่ากระแสไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ ไปอยู่บนแกน d-q (i_{Ld}, i_{Lq}) ตามสมการที่ 6 โดยที่ $\sin(\theta), \cos(\theta)$ ได้จากการคำนวณด้วยเทคนิคเฟสล็อกลูป (Phase-locked loop: PLL) ที่หน่วงด้วยมุมของแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (V_{PCC})

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ขั้นที่ 3 แยกปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่อยู่บนแกน d-q ออกจากปริมาณกระแสที่ความถี่ฐาน i_{Ld} ด้วยวงจร LPF (ใช้วงจรเดียวกับกรณีวิธี PQ)

ขั้นที่ 4 ส่วนของกระแสอ้างอิงสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกบนแกน $\alpha\beta$ โดยใช้สมการที่ 9

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{Ld}^* \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \quad (7)$$

ขั้นที่ 5 ทำการกำหนดให้กระแสอ้างอิงบนแกนเฟส (i_c^*) มีค่าเท่ากับกระแสฮาร์มอนิกบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{c\alpha}^* = i_{c\alpha}, i_{c\beta}^* = i_{c\beta}$) เพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงให้กับ SAPF จัดกระแสเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกต่อไป

จาก 5 ขั้นตอนการตรวจจับสนามฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF สามารถเขียนสรุปเป็นแผนภาพการคำนวณ ได้ดังรูปที่ 3

4. การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิก

ระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณาจำลองฮาร์มอนิกดังแสดงรูปที่ 1 ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้าแบบเหนือศีรษะ (Overhead wire system) ที่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส รับแรงดันไฟฟ้ามาจากระบบไฟฟ้าที่ 69 kV 60 Hz ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าลดแรงดันเป็น 26 kV ต่อเข้ากับโหลดแรงไฟฟ้า ซึ่งแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เป็นส่วนประกอบมูลฐานและส่วนประกอบฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบแรงไฟฟ้า [9] ซึ่งมี % THD_v เท่ากับ 22.16

ส่วนที่ 2 วงจร SAPF ที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) [8] ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์และอุปกรณ์กำลังไฟฟ้าตรงตามค่าพารามิเตอร์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 1 จากระบบดังกล่าวจะทำการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับสนามฮาร์มอนิกระหว่างวิธี PQ กับ SRF ในสองกรณีคือ กรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายระบบแรงเป็นไซน์บริสุทธิ์ และกรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีความเพี้ยนฮาร์มอนิก โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก (% THD_i) และค่าตัวประกอบกำลังภายหลังการชดเชยเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของทั้ง 2 กรณี

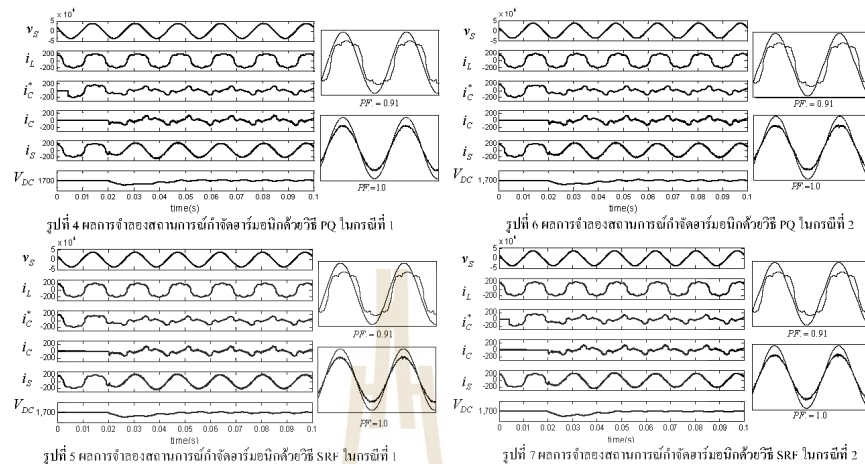
กรณีที่ 1 แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์บริสุทธิ์

ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจร SAPF ร่วมกับวิธี PQ และวิธี SRF สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว สังเกตได้ว่า ก่อนการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึงเวลา 0.02 วินาที กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย (i_g) มีลักษณะเหมือนกับกระแสโหลด (i_L) ทุกประการ คือคิดเป็นรูปไซน์ เนื่องจากมีปริมาณฮาร์มอนิกเกิดขึ้นในระบบแรงไฟฟ้าส่งผลให้ค่า % THD_v ที่แหล่งจ่ายมีค่าสูงเท่ากับ 22.16 % อย่างไรก็ตามตั้งแต่เวลา 0.02 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อวงจร SAPF ร่วมกับตัวควบคุม PI จัดกระแสชดเชยตามลักษณะกระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากการตรวจจับสนามฮาร์มอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SRF พบว่า รูปสัญญาณของ i_g มีลักษณะกลับมาเป็นคลื่นรูปไซน์มากขึ้นใกล้เคียงกัน โดยวัดค่า % THD_i ของ i_g ที่ใช้วิธี PQ ได้ค่าเท่ากับ 3.65 % และที่ใช้วิธี SRF มีค่าเท่ากับ 3.63 % นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอนุพัทธ์ระหว่าง v_s กับ i_g ดังแสดงในรูปย่อยด้านขวามือของรูปที่ 4 และรูปที่ 5 จะพบว่ามีมุมเฟสของ v_s กับ i_g ตรงกันพอดีส่งผลให้การคำนวณค่าตัวประกอบกำลัง (power factor: PF) ภายหลังการชดเชยของทั้งสองวิธีมีค่าเท่ากับ 1 (ก่อนการชดเชยมีค่าเท่ากับ 0.91)

กรณีที่ 2 แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีความเพี้ยนฮาร์มอนิก [10]

ในกรณีนี้จะกำหนดให้แรงดันมีความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่ค่า (THD_v) เท่ากับ 3.26 % โดยผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวิธี

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 40 (EECON-40) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



PQ และ วิธี SRF สามารถแสดงได้ดังรูป 6 และรูปที่ 7 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว พบว่า ภายหลังการชดเชย ค่า % THD ของ i_s ที่ได้จากวิธี PQ มีค่าเท่ากับ 4.77 % ในขณะที่วิธี SRF ให้ค่า % THD น้อยกว่าเท่ากับ 3.66 % อย่างไรก็ตามในกรณีนี้ ทั้งสองวิธียังคงสามารถให้ผลการปรับปรุงค่า PF ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 1 ได้เช่นกัน

จากผลดังกล่าวหมายความว่า การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQ และวิธี SRF มีสมรรถนะการตรวจจับที่ใกล้เคียงกัน ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ ส่วนในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีความเพี้ยนสรามอนิกปะปน การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี SRF สามารถให้ผลการตรวจจับสนามอนิกดีกว่าวิธี PQ

นอกจากนี้ผลการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) ดังแสดงในรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 7 จะเห็นว่า ตัวควบคุม PI มีสมรรถนะที่เพียงพอสามารถควบคุมแรงดันให้รักษาค่าเท่ากับ 1700 โวลต์ตามที่ได้ออกแบบไว้

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งและวิธีกรอบอ้างอิงซึ่งโครนิสสำหรับใช้คำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ เพื่อกำจัดสรามอนิกในระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส โดยผลการเปรียบเทียบในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี PQ และ SRF สามารถกำจัดสรามอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน แต่ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีความเพี้ยนสรามอนิกปะปน พบว่า การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี SRF สามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธี PQ อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบแรงไฟฟ้าได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. He, Z. Zheng and H. Hu, "Power quality in high-speed railway systems," *International journal of rail transportation*, vol.4, no.2, pp. 71-91, Apr 2016.
- [2] P.-C. Tan, P. C. Loh and D. G. Holmes, "A robust multilevel hybrid compensation system for 25-kv electrified railway applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.19, Jul 2004.
- [3] IEEE Std. 519-2014, IEEE Recommended practices and requirement for harmonic control in electrical power system.
- [4] H. Hu, Z. He and S. Gao, "Passive filter design for china high-speed railway with considering harmonic resonance and characteristic harmonics," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.30, no. 1, pp. 505-514, Feb 2015.
- [5] M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale and A. Miraoui, "Current harmonic compensation by a single-phase shunt active power filter controlled by adaptive neural filtering," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.56, no.8, pp. 3128-3143, Aug 2009.
- [6] Z. He, Z. Zheng, H. Hu, "Power quality in high-speed railway systems," *International Journal of Rail Transportation*, no. 2, pp.71-79, Apr 2016.
- [7] อุบลรัตน์ ศรีงาใจ, กองพล อธิวิทย์ และ ทศพร วรรณฤทธิ์, "การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งสำหรับระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส," การประชุมวิชาการระดับชาติ TNAC ครั้งที่ 4, สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 19 พ.ค. 2560 หน้า 176-179.
- [8] B. A. Angelico, L. B.G. Campanhol, S. A. Oliveira da Silva, "P-U-P-I-D tunig procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram," *IET Power Electron*, vol. 7, pp. 2647-2659, 2014.
- [9] S.-R. Huang and B.-N. Chen, "Harmonic study of the Le Blanc transformer for Taiwan railway's electrification system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 2, pp. 495-499, Apr 2002.
- [10] P.-C. Tan, R.E. Morrison, D. G. Holmes, "Voltage Form Factor Control and Reactive Power Compensation in a 25-kV Electrified Railway System Using a Shunt Active Filter Based on Voltage Detection," *IEEE Transactions on Industrial Application*, no. 2, pp. 575-581, Apr 2003.

การเปรียบเทียบโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับ การกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับ

The Comparison of Shunt Active Power Filter Structure for the Harmonic Elimination in AC-Electric Railway Systems

ฐานันตร์ ตรงใจ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์* กองพล อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Thanan Trongjai Tosaporn Narongrit* and Kongpol Areerak

Power electronics, Energy, Machines, and Control Research Group,

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

*Corresponding author: Email: tosaporn@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน 2 โครงสร้าง คือ โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม โดยการเปรียบเทียบจะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวม (%THD) ค่าเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรง ($\% \Delta V_{DC(ripple)}$) และผลตอบสนองทางพลวัต (Dynamic response) ของแรงดันบัสไฟตรงในช่วงที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร สมรรถนะของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้าง การตรวจจับฮาร์โมนิกสำหรับใช้คำนวณกระแสอ้างอิงให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้างจะใช้วิธีการออกแบบอ้างอิงเชิงโคโรนา (วิธี SRF) ระบบควบคุมการฉีดกระแสและระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใช้ตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม การจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าในบทความนี้ จะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimenter Kit ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้างให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์โมนิกที่ใกล้เคียงกัน โดยค่า %THD ของกระแสไฟฟ้ที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std 519-2014 นอกจากนี้ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถให้ผลค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงที่มีขนาดน้อยกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก อย่างไรก็ตามโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกมีผลตอบสนองทางพลวัตที่ดีกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงโหลดมากขึ้น

คำสำคัญ: วงจรกรองกำลังแอกทีฟ การกำจัดฮาร์โมนิก ระบบรางไฟฟ้า การตรวจจับฮาร์โมนิก ระบบฮาร์ดแวร์ในลูป

ABSTRACT

This paper presents the performance comparison of harmonic elimination in electric railway systems with two shunt active power filter (SAPF) structures: split capacitor structure and joint capacitor structure. The indicators of the comparison for the two SAPF structures are the total current harmonic distortion (%THD), the ripple of DC bus voltage ($\% \Delta V_{DC(ripple)}$) and the dynamic response of DC bus voltage during load changes. The harmonic detection,

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

39

synchronous reference frame (SRF method) is used for calculating the reference current of both SAPF structures. The conventional PI controllers are used to control the compensating current and regulate the DC bus voltage of SAPF. The hardware in the loop (HIL) simulation technique which process by Simulink/MATLAB program and TMS320C2000™ Experimenter Kit board is applied to simulate harmonic elimination in AC-electric railway systems. The simulation results show that both SAPF structures can provide good performance for harmonic elimination and the %THD of source current after compensation are satisfied under the IEEE std 519-2014. Furthermore, the SAPF with joint capacitor structure gives less ripple of DC bus voltage than the split capacitor structure. However, the split capacitor structure has better dynamic response than the joint capacitor structure when loads in the system have been changed and greatly increased.

Keyword: Active power filter, harmonic elimination, railway systems, Harmonic detection, Hardware in the loop

1. บทนำ

ปัจจุบันการขนส่งด้วยระบบรางไฟฟ้าถูกนำมาใช้งานในหลายประเทศทั่วโลก เนื่องจากการขนส่งด้วยระบบดังกล่าวเป็นการขนส่งที่มีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัยสูงเมื่อเทียบกับการขนส่งด้วยระบบอื่นๆ ระบบรางไฟฟ้าจำเป็นต้องมีระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนตัวรถไฟฟ้า ซึ่งระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางที่มีระยะทางไกลหรือรถไฟความเร็วสูงที่ใช้ในหลายประเทศ คือ ระบบไฟฟ้ากระแสสลับพิกัดใช้งานในช่วง 25-27.5 kV ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz ทั้งนี้เนื่องจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าดังกล่าวมีระดับแรงดันไฟฟ้าสูง ทำให้มีพิธีการจ่ายไฟฟ้าที่ไกล และส่งผลให้รถไฟสามารถวิ่งด้วยความเร็วที่สูงกว่าระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [1] ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางจะเริ่มต้นจาก สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (Substation) รับไฟฟ้าแรงสูงตั้งแต่พิกัดแรงดัน 69 kV ขึ้นไปจากสายส่งของผู้ผลิตไฟฟ้า จากนั้นจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าของระบบราง (Traction Transformer) เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงมาที่ระดับแรงดันในช่วง 25-27.5 kV ก่อนส่งจ่ายให้กับโหลดรถไฟ (Traction Load) ในอดีตที่ผ่านมา ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบรางจะเป็นระบบหนึ่งเฟส (Single-phase Power

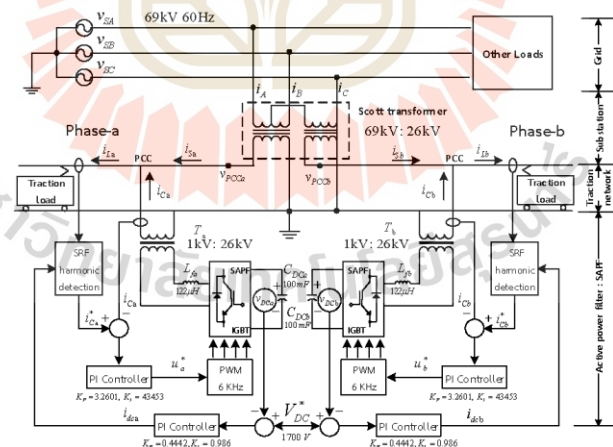
Supply Systems) ซึ่งนิยมใช้งานร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส (Single-Phase Linear Transformer) เนื่องจากหม้อแปลงดังกล่าวมีต้นทุนการผลิตต่ำและมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามระบบส่งจ่ายแบบหนึ่งเฟสดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดปัญหาเฟสไม่สมดุลขึ้นที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า [4] จากปัญหาเฟสไม่สมดุลที่เกิดขึ้นจึงมีการใช้งานระบบหนึ่งเฟสแบบ 2 ชุด หรือ 2 เฟสจากหนึ่งสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย เรียกว่า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสร่วม (Co-phase Power Supply Systems) [5] โดยระบบนี้จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแปลงแรงดันจากระบบสามเฟสให้เป็นระบบสองเฟสซึ่งสามารถช่วยลดปัญหาเฟสไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าทางฝั่งปฐมภูมิได้เมื่อโหลดของรถไฟทั้งสองเฟสทางฝั่งทุติยภูมิมีขนาดเท่ากัน หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสมดุล (balance transformer) ที่นิยมใช้งานในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสร่วมมีอยู่หลายประเภทด้วยกัน เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต (Scott Transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเลอบลองซ์ (Le-blanc Transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบวูดบริดจ์ (Woodbridge Transformer) เป็นต้น [3-5] อย่างไรก็ตามในบทความนี้จะพิจารณาใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบสก็อต เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทดังกล่าวเป็น

หม้อแปลงไฟฟ้าทำให้เกิดปัญหาเฟสไม่สมดุลทางฝั่งปฐมภูมิน้อย และมีพิคัดใช้งานอยู่ในย่านเดียวกับข้อมูลของระบบรางไฟฟ้าที่นำมาใช้พิจารณาในกรณีศึกษาอื่น อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ต่อรวมทางฝั่งปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าอีกด้วย [4]

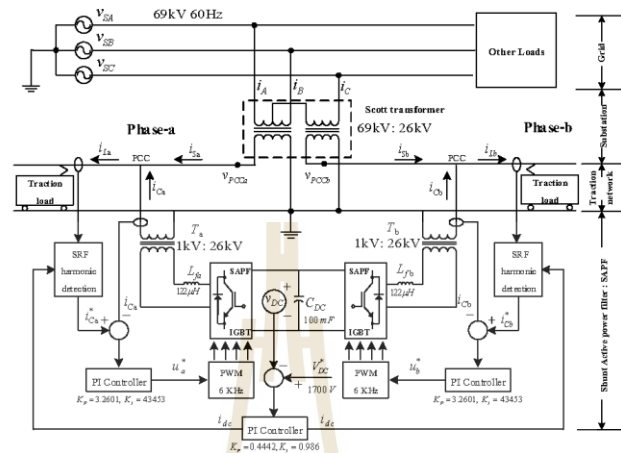
โดยทั่วไปโหลดของระบบรางไฟฟ้านั้นประกอบด้วยชุดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ชุดวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ รวมถึงโหลดของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ภายในขบวนรถไฟ เช่น อุปกรณ์แสงสว่าง พัดลม และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น ซึ่งการใช้งานโหลดดังกล่าวจะก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้าส่งผลให้เกิดผลเสียหลายประการต่อระบบรางไฟฟ้า เช่น เกิดกำลังงานสูญเสียในสายส่งกำลัง ทำให้ความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าลดลง [4] เกิดสัญญาณรบกวนทำให้ระบบสื่อสารและระบบอาณัติสัญญาณทำงานผิดพลาด [4] เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าให้หมดไปหรือลดน้อยลง การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (Passive Power Filter: PPF) [10] การใช้วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟ (Active Power Filter) [6] รวมถึงการนำวงจรทั้งสองมาใช้งาน

ร่วมกันเรียกว่าวงจรไฮบริดจ์ (Hybrid Filter) [7] โดยบทความนี้จะนำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพสูงในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก มีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบไฟฟ้าได้ดี อีกทั้งยังสามารถชดเชยค่าตัวประกอบกำลังให้กับระบบไฟฟ้าได้ด้วย [6]

การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวมด้วยวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานจำเป็นต้องใช้วงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานจำนวน 2 ชุด เพื่อให้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้ทั้งสองเฟสของระบบรางไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 โครงสร้าง คือ โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกกันแสดงในรูปที่ 1 และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุรวมกันแสดงในรูปที่ 2 โดยจากกระบวนการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้างดังกล่าวมีส่วนประกอบที่สำคัญเหมือนกัน 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 คือ การตรวจจับฮาร์มอนิก ซึ่งจะใช้สำหรับคำนวณกระแสอ้างอิงในการชดเชยให้กับของวงจรกรองกำลังแอ็กทีฟเพื่อให้อำนาจ



รูปที่ 1 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจร SAPF ที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก



รูปที่ 2 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาการจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจร SAPF ที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

ฉีดกระแสชดเชยได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ซึ่งปัจจุบันการตรวจจับฮาร์มอนิกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีทฤษฎีกำลังรีแอคทีฟขณะหนึ่ง (Instantaneous reactive power theory: PQ) [2] วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (Synchronous Reference Frame: SRF) [2] วิธีฟูริเยร์วินโดว์เลื่อน (Sliding Window Fourier Analysis: SWFA) [8] และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neuron Network: NN) [6] เป็นต้น แต่ในบทความนี้จะเลือกใช้การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (SRF) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความถูกต้องในการตรวจจับฮาร์มอนิก และสามารถทำงานได้ดีทั้งกรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายเป็นไซน์บริสุทธิ์และในกรณีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายมีฮาร์มอนิกปะปน รวมถึงเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ [2] ในส่วนที่ 2 คือ ระบบควบคุมกระแสชดเชย ทำหน้าที่ควบคุมให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยตามค่ากระแสอ้างอิงที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิก ซึ่งในบทความนี้เลือกใช้ตัวควบคุมพีโอ [9] ที่ทำงานร่วมกับเทคนิคการสวิตช์แบบพีดีบีเอ็ม (PWM) เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวถือเป็นตัวควบคุมพื้นฐานที่ให้

ประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดี และง่ายต่อการออกแบบ สำหรับส่วนที่ 3 คือ ระบบควบคุมแรงดันบัลไฟตรง มีหน้าที่ควบคุมให้แรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีค่าตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยในบทความนี้จะใช้ตัวควบคุมพีโอ [9] เช่นกัน เนื่องจากมีสมรรถนะที่ดีเพียงพอสำหรับการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรง [9]

การนำเสนอเนื้อหาในบทความนี้ประกอบไปด้วยในหัวข้อที่ 2 จะอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก และที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม หัวข้อที่ 3 คือ การอธิบายทบทวนการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF หัวข้อที่ 4 จะนำเสนอเทคนิคการจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปที่จะใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experimenter Kit ส่วนหัวข้อที่ 5 จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผลการเปรียบเทียบกับสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกของวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้าง และในหัวข้อสุดท้ายคือการสรุปผลของบทความนี้

2. โครงสร้างของวงจรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า

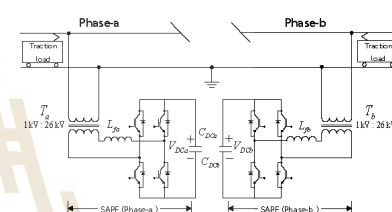
2.1. โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

วงจรองกำลังแยกที่ฟแบบขนาน ที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปดังกล่าวประกอบด้วยวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันจำนวน 2 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะประกอบด้วย อุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีที (IGBT) จำนวน 4 ตัว ต่อกันเป็นวงจรบริดจ์ นอกจากนี้ยังมีตัวเหนี่ยวนำวงจรองกำลัง (L_a, L_b) จำนวน 2 ตัว และตัวเก็บประจุ (C_{Dca}, C_{Dcb}) จำนวน 2 ตัว โดยหลักการการทำงานของวงจรดังกล่าวจะเริ่มจากตัวเก็บประจุที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานแต่ละชุดจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ โดยมีอุปกรณ์สวิตช์ทำหน้าที่เปิดและปิดวงจรตามสัญญาณพัลส์ที่ได้จากส่วนของการควบคุมกระแสชดเชยร่วมกับเทคนิค PWM เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ จากนั้นตัวเหนี่ยวนำวงจรองกำลังจะทำหน้าที่แปลงค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้เป็นค่ากระแสชดเชยก่อนต่อเข้ากับจุดต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) เพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเนื่องจากระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีกักเก็บแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC สูง จึงทำให้จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้า (T_a, T_b) ลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC [3] ให้มีค่าเหมาะสม [1kV : 26 kV] ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส [4] ดังที่ปรากฏในรูปที่ 3

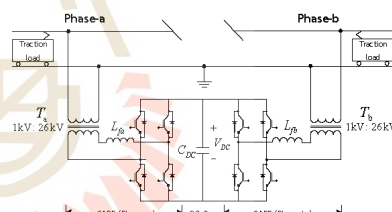
2.2. โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

วงจรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 โครงสร้างวงจรดังกล่าวจะมีส่วนประกอบที่เหมือนกับโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกทุกประการ แต่กรณีของโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมจะใช้ตัวเก็บประจุ (C_{Dc}) เพียง 1 ตัวร่วมกันทั้งสองชุดของวงจรองกำลังแยกที่ฟดังปรากฏในรูปที่ 4 อย่างไรก็ตาม หลักการทำงานของวงจรยังคงเหมือนกับกรณีของวงจรองกำลังแยกที่ฟโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

จากวงจรองกำลังแยกที่ฟแบบขนานทั้งสองโครงสร้างสามารถสรุปเปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละโครงสร้างแสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า วงจรองกำลังแยกที่ฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมจะใช้จำนวนตัวเก็บประจุน้อยกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก 1 ตัว ดังนั้น หากพิจารณาถึงการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ตัวเก็บประจุ จะพบว่า โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมจะใช้ชุดควบคุมที่น้อยกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกด้วยเช่นกัน



รูปที่ 3 SAPF โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก



รูปที่ 4 SAPF โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ของวงจรองกำลังแยกที่ฟแบบขนาน 2 โครงสร้าง

ชนิดอุปกรณ์	จำนวนอุปกรณ์ที่ใช้	
	SAPF แบบตัวเก็บประจุแยก	SAPF แบบตัวเก็บประจุร่วม
1. ตัวเก็บประจุ	2	1
2. ตัวเหนี่ยวนำ	2	2
3. อุปกรณ์สวิตช์	8	8
4. หม้อแปลงไฟฟ้า	2	2

3. การตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงโรตอร์

การตรวจจับสนามอนิกถือเป็นส่วนที่สำคัญใช้สำหรับคำนวณกระแสอ้างอิงในการชดเชยให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อให้สามารถลดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้อง โดยในบทความนี้จะอธิบายการตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธีกรอบอ้างอิงโรตอร์ หรือวิธี SRF ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณทั้งหมด 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 แปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่โหลด (i_L) ให้อยู่บนแกน $\alpha\beta$ ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$) โดยใช้สมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L \cos(\omega t) \\ i_L \cos(\omega t - (\pi/2)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดยค่า $i_{L\alpha}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนแอลฟา

$i_{L\beta}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนเบตา

ขั้นที่ 2 แปลงค่ากระแสที่โหลดบนแกน $\alpha\beta$ ให้อยู่บนแกนหมุน DQ ($i_{d\alpha}, i_{d\beta}$) โดยใช้สมการที่ (2) ซึ่งค่า θ ได้จากการใช้เทคนิคเฟสล็อกลูป (Phase-locked loop; PLL) ที่หมุนด้วยมุมของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่จุดต่อร่วม (v_{PCC}) ของระบบที่พิจารณา

$$\begin{bmatrix} i_{d\alpha} \\ i_{d\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยค่า $i_{d\alpha}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนดี

$i_{d\beta}$ คือ กระแสไฟฟ้าที่โหลดบนแกนคว

จากสมการที่ (2) ค่า $i_{d\alpha}$ จะประกอบด้วยองค์ประกอบที่เป็นสัญญาณกระแสตรง ($\bar{i}_{d\alpha}$) ที่บ่งบอกถึงปริมาณมูลฐาน และสัญญาณกระแสสลับ ($\tilde{i}_{d\alpha}$) ที่บ่งบอกถึงปริมาณฮาร์มอนิกดังแสดงในสมการที่ (3)

$$i_{d\alpha} = \bar{i}_{d\alpha} + \tilde{i}_{d\alpha} \quad (3)$$

ขั้นที่ 3 ใช้วงจรกรอง (filter) แยกปริมาณมูลฐาน $\bar{i}_{d\alpha}$ ออกจากปริมาณฮาร์มอนิก $\tilde{i}_{d\alpha}$ (สำหรับบทความนี้เลือกใช้อำนาจกรองผ่านต่ำ Low pass filter: LPF อันดับ 1 ความถี่ตัดเท่ากับ 15 Hz)

ขั้นที่ 4 คำนวณหากระแสอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{c\alpha}, i_{c\beta}$) โดยใช้สมการที่ (4)

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{i}_{d\alpha} - i_{d\alpha} \\ i_{d\beta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดยค่า $i_{c\alpha}$ คือ กระแสไฟฟ้าอ้างอิงบนแกนแอลฟา

$i_{c\beta}$ คือ กระแสไฟฟ้าอ้างอิงบนแกนเบตา

$i_{d\alpha}$ คือ ปริมาณกระแสตรงที่ได้จากส่วนของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

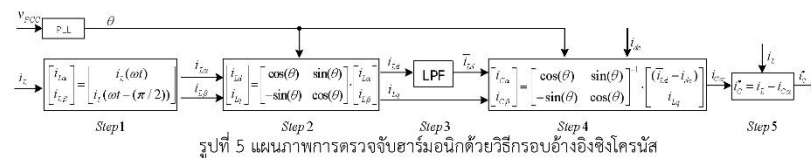
ขั้นที่ 5 คำนวณหากระแสอ้างอิงบนแกนเฟส (i_c^*) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้จากสมการที่ (5)

$$i_c^* = i_L - i_{c\alpha} \quad (5)$$

จากขั้นตอนการตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี SRF ทั้ง 5 ขั้นตอนข้างต้น สามารถสรุปเป็นแผนภาพการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 5

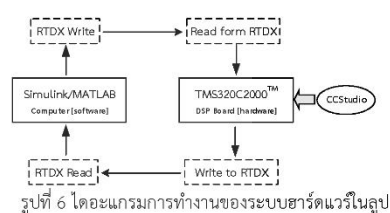
4. การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

การจำลองสถานการณ์ของบทความนี้จะใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the loop: HIL) ที่ใช้โปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experiment Kit โดยมีไดอะแกรมการทำงานของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งประกอบด้วยส่วนของซอฟต์แวร์ (software) คือ โปรแกรม Simulink/MATLAB บนคอมพิวเตอร์ และส่วนของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ (hardware) บอร์ด DSP ที่ทำงานร่วมกับโปรแกรม Code Composer Studio (CCStudio) การส่งและรับข้อมูลระหว่างซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ดังกล่าวจะอยู่ในรูปแบบของ Real-time data exchange (RTDX) ซึ่งในโปรแกรม Simulink จะใช้บล็อก RTDX Write สำหรับส่งข้อมูลไปยังบอร์ด DSP และใช้บล็อก RTDX Read สำหรับรับข้อมูลจากบอร์ด DSP ในขณะที่บอร์ด DSP จะใช้การโปรแกรมด้วยคำสั่ง Read From RTDX สำหรับรับข้อมูลจากโปรแกรม Simulink และใช้

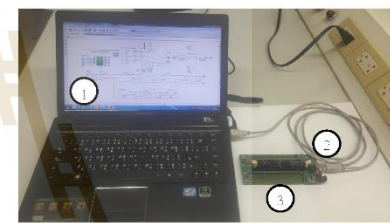


คำสั่ง Write to RTDX สำหรับส่งข้อมูลไปยังโปรแกรม Simulink [11] ซึ่งกระบวนการการเชื่อมต่อแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างโปรแกรม Simulink และบอร์ด DSP ดังกล่าวจะเชื่อมต่อกันผ่านสาย (USB JTAG emulation) ดังแสดงในรูปที่ 7

จากระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาการจัดฮาร์ดแวร์ในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 เมื่อใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปสามารถแสดงใหม่ได้ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว ส่วนของระบบรางไฟฟ้าและวงจรกรองกำลังแอกทีฟ จะถูกสร้างขึ้นด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (SimPowerSystem blockset) ในโปรแกรม Simulink ในขณะที่ส่วนของการตรวจจับสนามอนิกด้วยวิธี SRF การควบคุมการฉีดกระแสและชุดควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอจะถูกสร้างขึ้นบนบอร์ด DSP จากระบบจำลองสถานการณ์รูปที่ 8 ข้อมูลอินพุตที่ถูกส่งให้กับบอร์ด DSP ประกอบด้วย ค่าแรงดันบัสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (V_{pccu}, V_{pccb}) ค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{DCu}, V_{DCb}) ค่ากระแสโหลด (i_{La}, i_{Lb}) และค่ากระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (i_{ca}, i_{cb}) ส่วนระบบจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่ามีข้อมูลอินพุตที่แตกต่างจากระบบในรูปที่ 8 คือ มีค่าแรงดันบัสไฟตรงเพียงชุดเดียว (V_{DC}) โดยข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากบอร์ด DSP ของทั้งสองระบบจำลองสถานการณ์ คือ ค่าแรงดันอ้างอิง (u_a^*, u_b^*) ที่จะถูกส่งไปยังโปรแกรม Simulink เพื่อไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะสามเหลี่ยม (triangular carrier) ตามวิธีการของเทคนิคการสวิตช์แบบ PWM จากนั้นจะนำสัญญาณพัลส์ที่ได้ไปควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีทีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเพื่อฉีดกระแสชดเชยการจัดฮาร์ดแวร์ในระบบรางไฟฟ้าซึ่งสร้างอยู่บนโปรแกรม Simulink ต่อไป

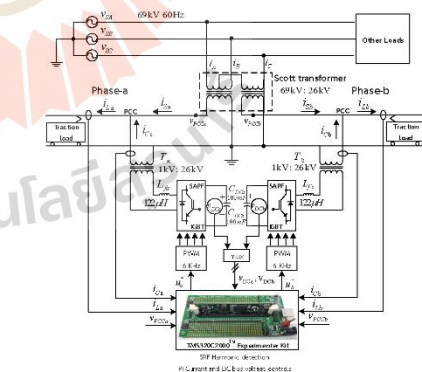


รูปที่ 6 โค้ดแอมการดำเนินงานของระบบฮาร์ดแวร์ในลูป

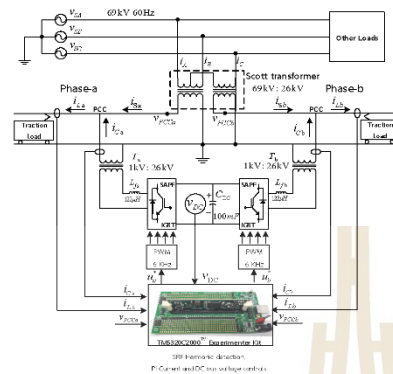


1. SimPowerSystem™ Simulink 2. JTAG emulator
3. TMS320C2000™ Experimenter Kit

รูปที่ 7 การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด TMS320F28335



รูปที่ 8 ระบบ HIL กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก



รูปที่ 9 ระบบ HIL กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

5. ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปราย

การจำลองสถานการณ์การก่อกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปตั้งระบบในรูปแบบที่ 8 และ 9 จะพิจารณาแทนโหลดรถไฟ (Traction Load) ด้วยแหล่งจ่ายกระแสทางอุดมคติที่ประกอบด้วยองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบรางไฟฟ้า [3] โดยกรณีการก่อกำเนิดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก (รูปที่ 8) และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม (รูปที่ 9) จะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ปรากฏในระบบรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ จากระบบการจำลองสถานการณ์จะกำหนดการเปลี่ยนแปลงจำนวนขบวนของโหลดรถไฟที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (เฟส a และเฟส b) ตามช่วงเวลาการเดินรถไฟตามสถิติที่พิจารณาในกรณีศึกษาที่แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งจะแบ่งเป็น 4 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาที่ 1 ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึงเวลา 0.25 วินาที จะกำหนดให้มีโหลดรถไฟเพียงเฟส a เท่านั้น ส่วนช่วงเวลา 2 ตั้งแต่เวลา 0.25 วินาที ถึงเวลา 0.5 วินาที กำหนดให้ขบวนรถไฟเคลื่อนที่ออกจากเฟส a ไปยังเฟส b ส่งผลให้เฟส b มีโหลดรถไฟ 1 ขบวน และเฟส a ไม่มีโหลด ต่อมาช่วงเวลา 3 ตั้งแต่เวลา 0.5 วินาทีถึงเวลา

0.75 วินาที กำหนดให้มีโหลดรถไฟเพิ่มเข้ามาที่เฟส a ทำให้ทั้งเฟส a และเฟส b มีโหลดรถไฟเฟสละ 1 ขบวน และสุดท้ายช่วงเวลา 4 ตั้งแต่เวลา 0.75 วินาทีถึงเวลา 1 วินาที จะพิจารณาให้มีโหลดรถไฟเพิ่มเป็นเฟสละ 2 ขบวน โดยผลการจำลองสถานการณ์การก่อกำเนิดฮาร์มอนิกในแต่ละช่วงเวลาของวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้างสามารถดูได้จากนี้

ตารางที่ 2 ช่วงเวลาการเดินรถไฟตามสถิติ

โหลด	จำนวนโหลดรถไฟ (ขบวน)			
ระบบราง	ช่วงเวลา 1	ช่วงเวลา 2	ช่วงเวลา 3	ช่วงเวลา 4
เฟส a	1	ไม่มี	1	2
เฟส b	ไม่มี	1	1	2

กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

ผลการจำลองสถานการณ์การก่อกำเนิดฮาร์มอนิกของเฟส a และเฟส b กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกสามารถแสดงดังรูปที่ 10 จากรูปดังกล่าว ในช่วงเวลาที่ 1 ที่มีโหลดรถไฟเฉพาะเฟส a จำนวน 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า ก่อนการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 วินาทีถึง 0.1 วินาที ซึ่งยังไม่มีการฉีดกระแสชดเชยกำลังแอกทีฟ รูปสัญญาณกระแสที่แหล่งจ่ายเฟส a (i_{sa}) และกระแสที่โหลดเฟส a (i_{La}) มีลักษณะเหมือนกันคือบิดเบี้ยวไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยวัดค่า %THD ได้เท่ากับ 22.16% จากนั้นตั้งเวลา 0.1 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส a ฉีดกระแสชดเชย (i_{ca}) เข้าสู่ระบบรางไฟฟ้า พบว่า รูปสัญญาณของ i_{sa} กลับมาเป็นรูปคลื่นไซน์มากขึ้นโดยค่า %THD ลดลงเหลือ 2.26% ในขณะที่เฟส b ยังไม่มีโหลดรถไฟ จึงไม่มีการชดเชยกำลังแอกทีฟที่เฟสดังกล่าว

ในช่วงเวลาที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.25 วินาที ถึง 0.5 วินาที เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดรถไฟคือ เฟส a ไม่มีโหลด ส่วนเฟส b มีโหลดรถไฟจำนวน 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส a หยุดฉีดกระแสชดเชย

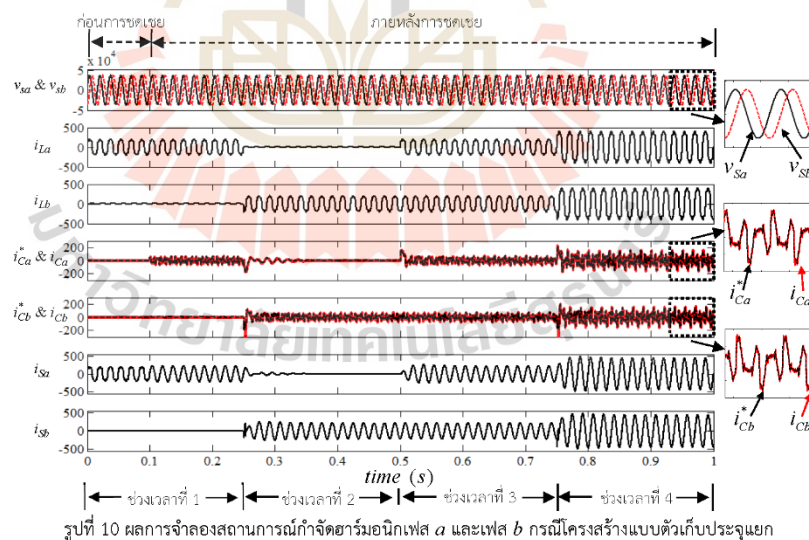
ในขณะที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส b สามารถทำหน้าที่ดีดกระแสชดเชยเฟส b (i_{cb}) กำจัดฮาร์มอนิกได้ โดยค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายเฟส b (i_{sb}) ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 2.22% (ก่อนการชดเชยค่า %THD_i ของ i_{sb} สำหรับช่วงเวลานี้มีค่าเท่ากับ 22.16%)

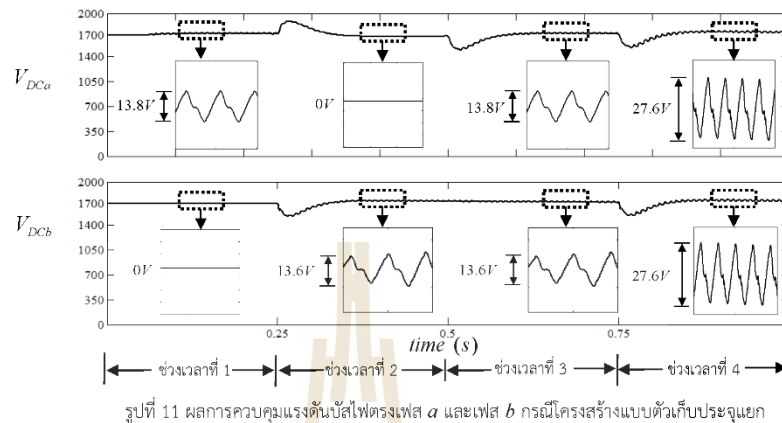
ต่อมาในช่วงเวลาที่ 3 ตั้งแต่เวลา 0.5 วินาที ถึง 0.75 วินาที ทั้งเฟส a และเฟส b มีโหลดโรงไฟฟ้าเฟสละ 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองเฟสสามารถดีดกระแสชดเชยได้พร้อมกันส่งผลให้ค่า %THD_i ของ i_{sa} และ i_{sb} ภายหลังการชดเชยมีค่าเท่ากับ 2.25% และ 2.22% ตามลำดับเฟส

สำหรับช่วงเวลาที่ 4 ตั้งแต่เวลา 0.75 วินาที เป็นต้นไป เมื่อทั้งสองเฟสมีโหลดโรงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นเฟสละ 2 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองเฟสยังคงสามารถดีดกระแสชดเชยได้พร้อมกันส่งผลให้ค่า %THD_i ของ i_{sa} และ i_{sb} ภายหลังการชดเชยสำหรับกรณีโหลดนี้มีค่าเท่ากับ 2.47 % และ 2.44 % ตามลำดับ จากผลดังกล่าวหมายความว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

แบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมกับตัวควบคุมพีโอ ($K_p=3.26$, $K_i=43453$) [9] ที่ใช้สำหรับควบคุมค่ากระแสชดเชย มีสมรรถนะการทำงานและควบคุมที่ดีตลอดทุกช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงของโหลดโรงไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาผลการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเฟส a และเฟส b ดังแสดงในรูปที่ 11 จะสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมพีโอ ($K_p=9.4442$, $K_i=0.986$) [9] มีสมรรถนะที่ดีสามารถควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงให้มีค่าเท่ากับค่าอ้างอิงที่ 1700 V ที่ได้ออกแบบไว้ได้ทุกช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงโหลดโรงไฟฟ้า จากผลดังกล่าวเมื่อพิจารณาจำนวนค่าเปอร์เซ็นต์การกระเพื่อมของแรงดันบัลไฟตรง ($\% \Delta V_{DC(ripple)}$) โดยใช้สมการที่ (6) พบว่า ในกรณีของเฟส a จะมีค่า $\% \Delta V_{DC(ripple)}$ ในแต่ละช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงโหลดเท่ากับ 0.81%, 0%, 0.81% และ 1.62% ตามลำดับ ส่วนในกรณีของเฟส b มีค่าเท่ากับ 0%, 0.81%, 0.80% และ 1.62% ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองทางพลวัต (Dynamic response) ของการควบคุมค่าแรงดันบัลไฟตรงเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 11 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเฟส *a* และเฟส *b* กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

ครั้งแรกที่เวลา 0.25 วินาทีสังเกตได้ว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงเฟส *a* มีค่าแรงดันพุ่งเกินสูงสุดเท่ากับ 1890 V ในขณะที่แรงดันบัสไฟตรงเฟส *b* มีค่าตกลงต่ำสุดเท่ากับ 1515 V โดยทั้งสองเฟสใช้เวลาในการเข้าสู่สถานะคงตัวที่ค่าแรงดัน 1700 V (Setting time: T_s) ประมาณเท่ากับ 0.12 วินาที ต่อมาในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งที่สองที่เวลา 0.5 วินาที สังเกตได้ว่า แรงดันบัสไฟตรงเฟส *a* มีค่าตกลงต่ำสุดเท่ากับ 1500 V และใช้เวลาในการเข้าสู่สถานะคงตัวเท่ากับ 0.13 วินาที ในขณะที่แรงดันบัสไฟตรงเฟส *b* มีค่าคงที่เท่ากับ 1700 V (เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดที่เฟส *b*) และในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งที่สามที่เวลา 0.75 วินาที สังเกตได้ว่า ทั้งค่าแรงดันบัสไฟตรงเฟส *a* และเฟส *b* มีค่าตกลงต่ำสุดเท่ากันประมาณเท่ากับ 1520 V โดยทั้งสองเฟสใช้เวลาในการเข้าสู่สถานะคงตัวประมาณเท่ากับ 0.12 วินาที

$$\% \Delta V_{DC(ripple)} = \frac{\Delta V_{DC}}{V_{DC}} \times 100 \quad (6)$$

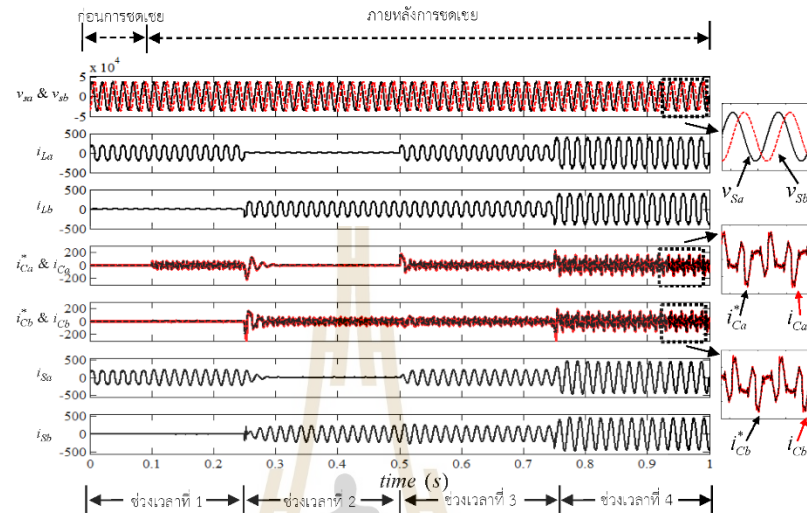
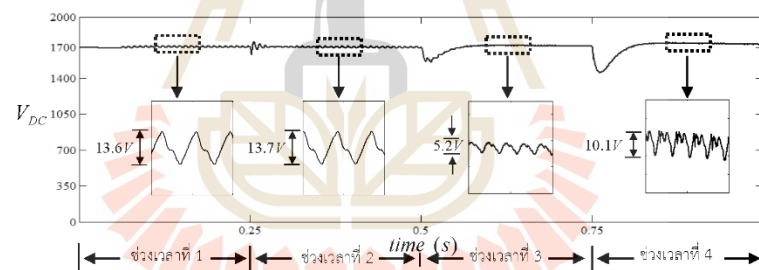
กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุรวม

ผลการจำลองสถานการณ์ก่้างัดฮาร์โมนิกของเฟส *a* และเฟส *b* กรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มี

โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุรวม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12 จากรูปดังกล่าวในช่วงเวลาที่ 1 ตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 0.25 วินาที ที่มีโหลดรฟไฟเฉพาะเฟส *a* พบว่า เมื่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส *a* ทำการฉีดกระแสชดเชยกำลังฮาร์โมนิกตั้งแต่เวลา 0.1 วินาที เป็นต้นไป จะเห็นได้ว่า รูปสัญญาณของ i_{sa} มีลักษณะเป็นรูปไซน์มากขึ้น โดยวัดค่า %THD_i ของ i_{sa} ได้เท่ากับ 2.24% (เฟส *b* ไม่มีโหลดรฟไฟจึงไม่มีการฉีดกระแสชดเชยกำลังฮาร์โมนิก)

ต่อมาในช่วงเวลาที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.25 วินาที ถึง 0.5 วินาที เมื่อเฟส *a* ไม่มีโหลดรฟไฟ ในขณะที่เฟส *b* มีโหลดรฟไฟจำนวน 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส *a* ได้ทำการหยุดฉีดกระแสชดเชยส่วนวงจรกรองกำลังแอกทีฟของเฟส *b* ได้ทำหน้าที่ฉีดกระแสชดเชยให้กับระบบแรงไฟฟ้า โดยวัดค่า %THD_i หลังการชดเชยของ i_{sb} ได้ค่าเท่ากับ 2.23%

สำหรับในช่วงเวลาที่ 3 ตั้งแต่เวลา 0.5 วินาที ถึง 0.75 วินาที เมื่อทั้งสองเฟสมีโหลดรฟไฟเฟสละ 1 ขบวน จะสังเกตได้ว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถฉีดกระแสชดเชยกำลังฮาร์โมนิกได้ทั้งเฟส 2 เฟสพร้อมกัน โดยวัด %THD_i ของ i_{sa} และ i_{sb} ได้เท่ากับ 2.20% และ 2.21% ตามลำดับ

รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์การนำจัตฮาร์โมนิกเฟส a และเฟส b กรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

รูปที่ 13 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม

และในช่วงเวลาที่ 4 เมื่อทั้งสองเฟสมีโหลดไฟฟ้าเพิ่มเป็นเฟสละ 2 ขบวนการพบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมยังคงสามารถมีกระแสชดเชยการจัตฮาร์โมนิกให้กับระบบแรงไฟฟ้าทั้งสองเฟสได้เช่นเดิม โดยวัดค่า %THD ของ i_{sa} และ i_{sb} ได้เท่ากับ 2.32% และ 2.31% ตามลำดับจากผลดังกล่าว หมายความว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟ

แบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมร่วมกับตัวควบคุมพีโอ ($K_p=3.26$, $K=43453$) [9] สามารถให้ประสิทธิภาพการนำจัตฮาร์โมนิกดีตลอดทุกช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงของโหลดครไฟฟ้า

ผลการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงกรณีใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานที่มีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถแสดงในรูปที่ 13 โดยจะเห็นได้ว่า

การใช้ตัวควบคุมที่โอเพนเพียง 1 ชุด สามารถควบคุมให้ค่า V_{DC} มีค่าเท่ากับ 1700 V ได้ทุกช่วงเวลากการเปลี่ยนแปลงโหลดของทั้งสองเฟสโดยวัดค่า $\% \Delta V_{DC(ripple)}$ ในแต่ละช่วงเวลา ได้ค่าเท่ากับ 0.8%, 0.79%, 0.30% และ 0.58% ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองทางพลวัตของการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งแรกที่เวลา 0.25 วินาที สังเกตได้ว่า ค่าแรงดันบัสไฟตรงมีการกวัดแกว่งเล็กน้อยที่ค่าสูงสุดเท่ากับ 1755 V และต่ำสุดเท่ากับ 1630 V จากนั้นสามารถเข้าสู่สู่สถานะคงตัวที่ค่าแรงดัน 1700 V ได้โดยใช้เวลาประมาณเท่ากับ 0.03 วินาที ต่อมาในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งที่สองที่เวลา 0.5 วินาที สังเกตได้ว่า แรงดันบัสไฟตรงมีค่าตกลงต่ำสุดเท่ากับ 1560 V โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สู่สถานะคงตัวเท่ากับ 0.07 วินาที และในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงครั้งที่สามที่เวลา 0.75 วินาที สังเกตได้ว่า ทั้งค่าแรงดันบัสไฟตรงมีค่าตกลงต่ำสุดประมาณเท่ากับ 1450 V โดยในกรณีนี้ใช้เวลาการเข้าสู่สู่สถานะคงตัวประมาณเท่ากับ 0.19 วินาที

จากผลการจำลองสถานการณ์การกักจัดฮาร์มอนิกตัววงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้าง เมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะการกักจัดฮาร์มอนิกโดยใช้ค่า %THD, ค่า $\% \Delta V_{DC(ripple)}$ และผลตอบสนองทางพลวัตของค่าแรงดันบัสไฟตรงในช่วงที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลง สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 3 ถึง 5 ตามลำดับ จากตารางที่ 3 พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกและโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมให้ค่า %THD_i ของเฟส *a* และเฟส *b* ในแต่ละช่วงเวลาใกล้เคียงกัน โดยโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมให้ค่า %THD_i ต่ำกว่าเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่า $\% \Delta V_{DC(ripple)}$ ในตารางที่ 4 พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถให้ค่า $\% \Delta V_{DC(ripple)}$ น้อยกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกในทุกช่วงเวลา นอกจากนี้ ถ้าเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองทางพลวัต

ของค่าแรงดันบัสไฟตรงในช่วงเวลาที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ ค่าแรงดันตกต่ำสุด ค่าแรงดันพุ่งเกินสูงสุด และค่าเวลาในการเข้าสู่สู่สถานะคงตัว (T_s) ดังตารางที่ 5 จะพบว่า ในช่วงการเปลี่ยนแปลงโหลดที่เวลา 0.25 วินาที และที่เวลา 0.5 วินาที วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมสามารถให้ผลตอบสนองทางพลวัตที่ดีกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก แต่เมื่อโหลดรถไฟฟ้ามมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็นเฟสละ 2 ขบวน ที่เวลา 0.75 วินาที พบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกจะให้ผลตอบสนองทางพลวัตที่ดีกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม ทั้งนี้เนื่องจากวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้างใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดเท่ากันจึงทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมที่มีตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งตัวมีการสูญเสียพลังงานมากกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยกที่มีตัวเก็บประจุ 2 ตัว

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่า %THD_i

โครงสร้าง	ช่วงเวลาที่ 1		ช่วงเวลาที่ 2		ช่วงเวลาที่ 3		ช่วงเวลาที่ 4	
	เฟส <i>a</i>	เฟส <i>b</i>	เฟส <i>a</i>	เฟส <i>b</i>	เฟส <i>a</i>	เฟส <i>b</i>	เฟส <i>a</i>	เฟส <i>b</i>
%THD _i ก่อนการชดเชย								
ไม่มีวงจร								
SAPF	22.16%	ไม่มี	ไม่มี	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%
%THD _i ภายหลังการชดเชย								
แบบตัวเก็บประจุแยก	2.25%	ไม่มี	ไม่มี	2.22%	2.25%	2.22%	2.47%	2.44%
แบบตัวเก็บประจุร่วม	2.24%	ไม่มี	ไม่มี	2.23%	2.20%	2.21%	2.32%	2.31%

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่า $\% \Delta V_{DC(ripple)}$

โครงสร้าง	$\% \Delta V_{DC(ripple)}$							
	ช่วงเวลาที่ 1		ช่วงเวลาที่ 2		ช่วงเวลาที่ 3		ช่วงเวลาที่ 4	
SAPF	เฟส <i>a</i>	เฟส <i>b</i>	เฟส <i>a</i>	เฟส <i>b</i>	เฟส <i>a</i>	เฟส <i>b</i>	เฟส <i>a</i>	เฟส <i>b</i>
แบบตัวเก็บประจุแยก	0.81%	ไม่มี	ไม่มี	0.81%	0.81%	0.80%	1.62%	1.62%
แบบตัวเก็บประจุร่วม	0.8%		0.79%		0.30%		0.58%	

50

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยครินทรวิโรฒ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางพลวัต

โครงสร้าง ตอบสนองทาง พลวัต	ผลการ ตอบสนองทาง พลวัต	การเปลี่ยนแปลงโหลด					
		เวลา 0.25 s		เวลา 0.5 s		เวลา 0.75 s	
		เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b	เฟส a	เฟส b
แบบตัวเก็บ ประจุแยก	แรงดันตกต่ำสุด	-	1515 V	1500 V	-	1520 V	1524 V
	แรงดันพุ่งเกิน	1890 V	-	-	-	-	-
	T_r	0.12 s	0.12 s	0.13 s	-	0.12 s	0.12 s
แบบตัวเก็บ ประจุร่วม	แรงดันตกต่ำสุด	-	1630 V	1560 V	-	1450 V	-
	แรงดันพุ่งเกิน	1775 V	-	-	-	-	-
	T_r	0.03 s	-	0.07 s	-	0.19 s	-

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าโดยใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก และโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วม โดยผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ตแวร์ในรูปพบว่า วงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งสองโครงสร้างสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์มอนิกที่ต่ำที่สุด ซึ่งค่า %THD_i ภายหลังการชดเชยอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE std 519-2014 อย่างไรก็ตาม วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานกรณีโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมมีข้อดีกว่าโครงสร้างแบบประจุแยก คือ สามารถให้สมรรถนะการทำงานของวงจรที่ดีกว่าโดยมีค่าการกระเพื่อมของแรงดันบัสไฟตรงที่น้อยกว่า อีกทั้งยังใช้ตัวเก็บประจุและตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่น้อยกว่า แต่โครงสร้างแบบตัวเก็บประจุร่วมมีข้อเสีย คือ เมื่อขนาดของโหลดรถไฟมีค่าเพิ่มขึ้นจะเกิดผลของค่าแรงดันตกที่ลดลงมากกว่า และใช้เวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่นานกว่าโครงสร้างแบบตัวเก็บประจุแยก

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมถึงให้สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] นคร จันทศร. “ช่วงรถไฟ: ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ”. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระบบขนส่งทางรางแห่งชาติ. หน้า 229-243, (2559).
- [2] ฐานันตร์ ตรงใจ, กองพล อารีรักษ์ และ ทศพร ณรงฤทธิ์, “การเปรียบเทียบวิธีทฤษฎีกำลังรีแอกทีฟขณะหนึ่งและวิธีกรอบอ้างอิงเชิงโครนัสสำหรับการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า eecon ครั้งที่ 40, พัทยา, โรงแรม เดอะ ซายน์, 16 พ.ย. 2560, หน้า 218-221
- [3] Sy-Ruen Huang and Bing-Nan Chen, “Harmonic study of the Le Blanc transformer for Taiwan railway's electrification system,” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 2, pp. 495-499, April 2002.
- [4] A. Luo, C. Wu, J. Shen, Z. Shuai and F. Ma, “Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 10, pp. 2844-2856, Oct. 2011.
- [5] Z. Shu, S. Xie and Q. Li, “Single-Phase Back-To-Back Converter for Active Power Balancing, Reactive Power Compensation, and Harmonic Filtering in Traction Power System,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 2, pp. 334-343, Feb. 2011.
- [6] M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale and A. Miraoui, “Current Harmonic Compensation by a Single-Phase Shunt Active Power Filter Controlled by Adaptive Neural Filtering,”

- in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 8, pp. 3128-3143, Aug. 2009.
- [7] Pee-Chin Tan, Poh Chiang Loh and D. G. Holmes, "A robust multilevel hybrid compensation system for 25-kV electrified railway applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 4, pp. 1043-1052, July 2004.
- [8] M. El-Habrouk and M. K. Darwish, "Design and implementation of a modified Fourier analysis harmonic current computation technique for power active filters using DSPs," in IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 148, no. 1, pp. 21-28, Jan. 2001.
- [9] B. A. Angélico, L. B. G. Campanhol and S. A. Oliveira da Silva, "P-I/P-I-D tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram," IET Power Electron, vol. 7, pp. 2647-2659, Oct 2014.
- [10] H. Hu, Z. He and S. Gao, "Passive Filter Design for China High-Speed Railway With Considering Harmonic Resonance and Characteristic Harmonics," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 1, pp. 505-514, Feb. 2015.
- [11] T. Narongrit, K-L. Areerak and K-N. Areerak "A New Design Approach of Fuzzy Controller for Shunt Active Power Filter," Electric Power Components and Systems, vol. 43, pp. 685-694, Mar 2015.



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.

UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า

Design of a Shunt Active Power Filter for Harmonic Elimination in Electric Railway Systems

ฐานันตร์ ตรงใจ¹ ทศพร ณรงค์ฤทธิ์^{1*} กองพล อารีรักษ์¹

¹ กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

Thanan Trongjai¹ Tosaporn Narongrit^{1*} Kongpol Areerak¹

¹ Power Electronics, Energy, Machines, and Control Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

* Corresponding author.

E-mail: tosaporn@sut.ac.th; Telephone: 0 4422 4402

วันที่รับบทความ 14 พฤษภาคม 2562; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 1 11 กรกฎาคม 2562; วันที่แก้ไขบทความครั้งที่ 2 1 สิงหาคม 2562; วันที่ตอบรับบทความ 16 ตุลาคม 2562

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับใช้กำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรและการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอสำหรับใช้ควบคุมกระแสและแรงดันบัสไฟตรง การออกแบบจะปรับใช้วิธีการดั้งเดิมซึ่งอาศัยการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน การตรวจสอบผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอจะใช้การจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปที่ใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000TM Experimenter Kit ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ได้ยืนยันแล้วว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟและตัวควบคุมพีโอที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอมีสมรรถนะที่ดีสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่า %THDI ภายหลังการชดเชยของกระแสที่แหล่งจ่ายระบบรางไฟฟ้าอยู่ในกรอบมาตรฐาน IEEE Std 519-2014

คำสำคัญ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟ การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า การตรวจจับฮาร์มอนิก ตัวควบคุมพีโอ

Abstract

This paper presents the design of a shunt active power filter for harmonic elimination in electric railway systems. The conventional approach depended on an easy calculation is applied to design the parameters of active power filter and PI controller for the compensating current and DC bus voltage controls. The hardware in the loop (HIL) simulation

technique used Simulink/MATLAB program and TMS320C2000TM Experimenter Kit board is applied to simulate the harmonic elimination in considered electric railway system. The simulation result confirms that the active power filter and PI controller designed by the proposed approach can provide good performance for harmonic elimination. In addition, the %THDi after compensation of the source currents in electric railway system are satisfied under the IEEE Std 519-2014.

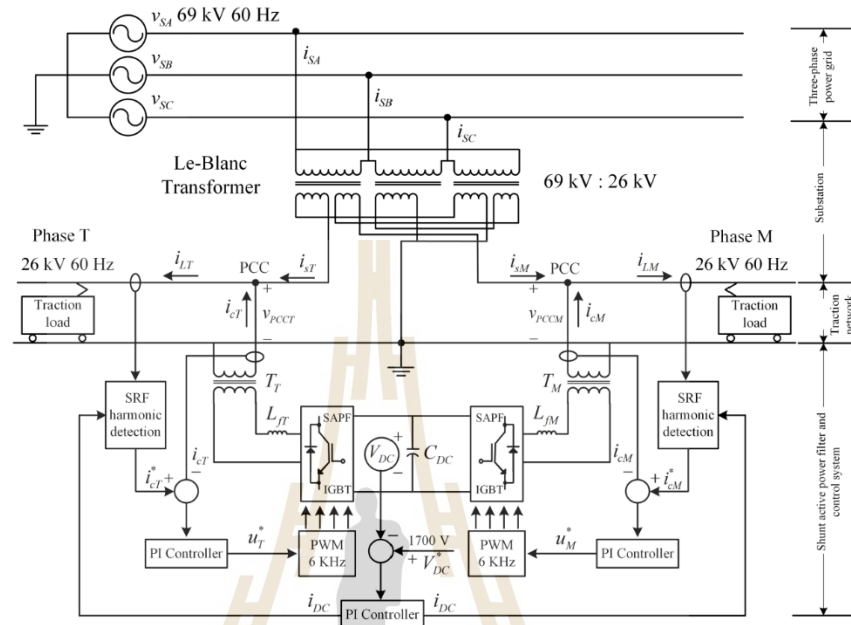
Keywords

active power filter; active power filter design; harmonic elimination in electric railway systems; harmonic detection; PI controller

1. บทนำ

การขนส่งระยะทางไกลด้วยรถไฟทั้งประเภทความเร็วปานกลางและความเร็วสูงในปัจจุบันนิยมใช้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบเฟสร่วม (co-phase power supply systems) [1] ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับชนิดสัมผัสเหนือศีรษะ (overhead contact) ที่มีพิกัดแรงดันประมาณ 25 kV ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz (ขึ้นอยู่กับระบบไฟฟ้าของแต่ละประเทศ) ทั้งนี้เนื่องจากระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบดังกล่าวสามารถช่วยบรรเทาการเกิดปัญหาไม่สมดุลของกระแสไฟฟ้าสามเฟสที่เกิดจากระบบส่งจ่ายหลักได้ [2] โหลดของระบบรางไฟฟ้า ได้แก่ โหลดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ามอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ โหลดเครื่องปรับอากาศ และโหลดอุปกรณ์แสงสว่าง เป็นต้น โดยโหลดังกล่าวล้วนแต่มีพฤติกรรมการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า และส่งผลเสียหลายประการ เช่น เกิดกำลังงานสูญเสียในสายส่ง เกิดสัญญาณรบกวนทำให้ระบบสื่อสารและระบบอาณัติสัญญาณทำงานผิดพลาด เป็นต้น [2,3] ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นต้องแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบให้หมดหรือลดลง วิธีการกำจัดฮาร์มอนิกสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การใช้วงจรกรองกำลังพาสซีฟ (passive power filter) [4] การใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (active power filter) [5] และการใช้วงจรกำลังไฮบริด (hybrid filter) [3] อย่างไรก็ตาม บทความนี้จะนำเสนอการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

แบบขนาน (shunt active power filter: SAPF) [6] เนื่องจากวงจรดังกล่าวสามารถให้ประสิทธิภาพการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่ดี และมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ อีกทั้งยังไม่ต้องประสบปัญหาเรโซแนนซ์เมื่อเทียบกับวงจรกรองแบบพาสซีฟ ระบบการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกคือ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบรางไฟฟ้าที่ประกอบด้วย กริดส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส (three-phase power grid) สถานีส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบรางแบบเฟสร่วม (substation) ที่ใช้หม้อแปลงชนิดเลอบลองก์ (Le-blance transformer) และระบบรางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับโหลดรถไฟฟ้า (traction network) ส่วนที่สองคือ วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (วงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน) และระบบควบคุม (shunt active power filter and control system) โดยระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะประกอบด้วยการตรวจจับฮาร์มอนิก (harmonic detection) ใช้สำหรับคำนวณหากระแสอ้างอิงในการชดเชย (กระแสฮาร์มอนิก) ซึ่งในบทความนี้จะเลือกใช้วิธีกรอบอ้างอิงซิงโครนัส (synchronous reference frame: SRF) [7,8] และการควบคุมกระแสชดเชย (i_c) และแรงดันบัสไฟตรง (V_{DC}) ใช้สำหรับควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟให้สามารถฉีดกระแสชดเชยได้ตามลักษณะของกระแสอ้างอิงได้ โดยบทความนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) [9] เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อน สามารถออกแบบได้ง่าย และมีสมรรถนะ



รูปที่ 1 ระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาการจัดฮาร์โมนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

การควบคุมที่ตีเพียพอ จากระบบดังกล่าวเพื่อให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถลดกระแสชดเชยการจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี จำเป็นจะต้องออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (ค่า V_{dc} ค่า L_f และค่า C_{dc}) และค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ (k_p และ k_i) ของระบบควบคุมให้มีค่าที่เหมาะสม ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวโดยใช้วิธีการดั้งเดิมที่ถูกลำเสนอใช้กับระบบกำลังไฟฟ้าทั่วไป [9–12] มาปรับใช้กับระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งสามารถดูรายละเอียดวิธีการออกแบบทั้งหมดได้จากหัวข้อที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

การนำเสนอเนื้อหาในบทความนี้ประกอบด้วย หัวข้อที่ 2 จะอธิบายขั้นตอนการคำนวณตรวจจบบาร์โมนิกด้วยวิธี SRF หัวข้อที่ 3 จะนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจร

กรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับระบบรางไฟฟ้า หัวข้อที่ 4 จะอธิบายการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับการควบคุมกระแสชดเชยและควบคุมแรงดันบัสไฟตรง หัวข้อที่ 5 จะอธิบายการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์โมนิกด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบที่ใช้โปรแกรม Simulink/MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C 2000TM Experimenter Kit หัวข้อที่ 6 จะนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผลการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา และในหัวข้อสุดท้ายคือการสรุปผลของบทความ

2. การตรวจจบบาร์โมนิกด้วยวิธี SRF

การตรวจจบบาร์โมนิกด้วยวิธี SRF [8] มีขั้นตอนในการคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิง (i_c^*) ในการชดเชยให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานทั้งหมด 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณแปลงค่ากระแสไหลต (i_L) ของระบบไปเป็นค่ากระแสไหลตบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}$) ด้วยสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(\omega t) \\ i_L(\omega t - (\pi/2)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

ขั้นที่ 2 คำนวณค่ากระแสไหลตบนแกนหมุน DQ (i_{Ld}, i_{Lq}) โดยใช้สมการที่ (2) ซึ่ง θ คือ มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (point of common coupling: PCC) ของระบบที่พิจารณา

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) ค่า i_{Ld} จะประกอบด้วยปริมาณมูลฐาน ($\bar{i}_{Ld}$) และปริมาณฮาร์มอนิก (i_{Ld}) แสดงดังสมการที่ (3)

$$i_{Ld} = \bar{i}_{Ld} + \hat{i}_{Ld} \quad (3)$$

ขั้นที่ 3 ใช้วงจรกรอง (filter) แยกปริมาณกระแสฮาร์มอนิก $\hat{i}_{Ld}$ ออกจากปริมาณมูลฐาน (ซึ่งบทความนี้เลือกใช้วงจรกรองผ่านสูง (high pass filter) อันดับ 2 ความถี่ตัดเท่ากับ 50 Hz)

ขั้นที่ 4 คำนวณค่ากระแสอ้างอิงบนแกน $\alpha\beta$ ($i_{c\alpha}^*, i_{c\beta}^*$) โดยใช้สมการที่ (4)

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{i}_{Ld} - i_{DC} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดยที่ i_{DC} คือ ปริมาณกระแสตรงที่ได้จากเอาต์พุตของตัวควบคุมในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc})

ขั้นที่ 5 คำนวณหากระแสอ้างอิงบนแกนเฟส (i_c^*) โดยกำหนดให้เท่ากับค่ากระแส $i_{c\alpha}^*$ แสดงดังสมการที่ (5)

$$i_c^* = i_{c\alpha}^* \quad (5)$$

จากขั้นตอนการตรวจจับฮาร์มอนิกที่ได้อธิบายในข้างต้น จะใช้สำหรับกรณีเฟสใดเฟสหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นกรณีการตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าแบบเฟสรวมที่ประกอบด้วยเฟส T และ M จึงต้องใช้บล็อกการตรวจจับฮาร์

มอนิกด้วยวิธี SRF จำนวน 2 บล็อกเพื่อคำนวณหากระแสอ้างอิง i_{cT}^* และ i_{cM}^* ดังที่ปรากฏในระบบรูปที่ 1

3. การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

3.1 การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง

การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง (L_{fT}, L_{fM}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานจะใช้วิธีการของ D. M. E. Ingram และ S. D. Round [10,12] ซึ่งการออกแบบด้วยวิธีดังกล่าวจะได้ผลเป็นค่าขอบเขตขนาดตัวเหนี่ยวนำสูงสุด (L_{fmax}) จากนั้นจะทำการเลือกใช้ค่าตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ภายในขอบเขต L_{fmax} เนื่องจากโหลดทั้งสองเฟสของระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้มีขนาดเท่ากัน ดังนั้น ค่า L_{fT} และ L_{fM} ที่ได้จากการออกแบบจึงกำหนดให้มีขนาดเท่ากันเท่ากับ L_f โดยรายละเอียดการออกแบบมีขั้นตอนดังนี้

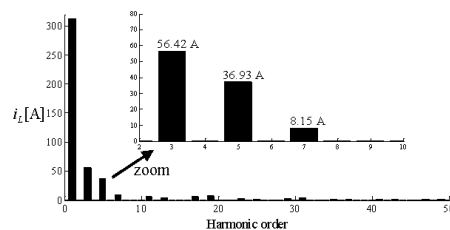
ขั้นที่ 1 คำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสอ้างอิงในการชดเชยสูงสุด ($\max(\frac{di_c^*}{dt})$) โดยจะพิจารณาจากองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิก ($i_h(t)$) ที่ทำให้เกิดค่า $\max(\frac{di_c^*}{dt})$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) และ (7) ดังนี้

$$i_{h(max)}(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

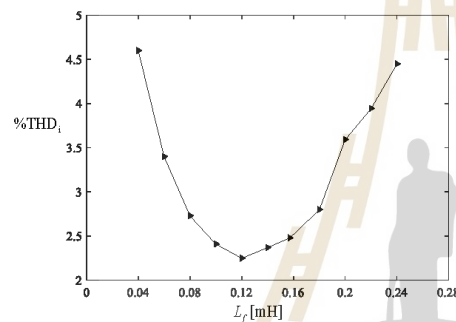
$$\max(\frac{di_c^*}{dt}) = A 2\pi f \quad (7)$$

โดยที่ A คือ แอมพลิจูด และ f คือ ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ทำให้เกิดค่า $\max(\frac{di_c^*}{dt})$

การคำนวณค่า $\max(\frac{di_c^*}{dt})$ จะพิจารณาจากสเปกตรัมของกระแสไหลตในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาที่ปรากฏฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ซึ่งในบทความนี้จะพิจารณาข้อมูลกระแสไหลตในระบบรางไฟฟ้าของประเทศไต้หวัน [13] ซึ่งมีสเปกตรัมแสดงดังรูปที่ 2 จากรูปดังกล่าว พบว่า กระแสฮาร์



รูปที่ 2 สเปกตรัมของกระแสโวลต์ในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณาการจัดฮาร์โมนิก



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า L_f และค่า %THD_i

มอดิฟายด์ที่ 3 ($f = 180$ Hz) มีขนาดแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ 56.42 A ในขณะที่กระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 ($f = 300$ Hz) มีขนาดแอมพลิจูดสูงรองเป็นอันดับสองเท่ากับ 36.93 A จากขนาดกระแสฮาร์โมนิกทั้งสองอันดับดังกล่าว สามารถคำนวณค่า $\max(\frac{di_c}{dt})$ ได้เท่ากับ 63810 A/s และ 69611 A/s ตามลำดับ ดังนั้น การออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำวงจรในขั้นตอนนี้จะเลือกใช้ค่า $\max(\frac{di_c}{dt})$ ที่คำนวณได้จากผลของกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 เนื่องจากมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 69611 A/s อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 1 ระบบกำลังฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานมีการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชิงเส้นหนึ่งเฟส (T_T และ T_M) อัตราส่วน 26 kV: 1 kV เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC

ให้มีค่าต่ำลง จึงส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจรกรองที่อยู่ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดกระแสสูงขึ้นตามอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า (26 เท่าของค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้ชดเชยกำลังฮาร์โมนิก) ดังนั้น จะสามารถคำนวณหาค่า $\max(\frac{di_c}{dt})$ ใหม่ที่คิดผลของหม้อแปลงได้เท่ากับ 1809886 A/s แสดงได้ดังนี้

$$\max(\frac{di_c}{dt}) = (26)(69611) = 1809886 \text{ A/s}$$

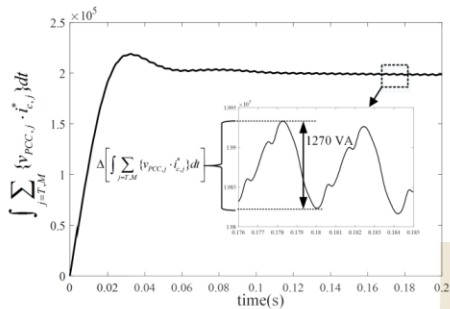
ขั้นที่ 2 คำนวณค่า $L_{f\max}$ จากสมการที่ (8)

$$L_{f(\max)} = \frac{V_{dc} - V_{PCC}}{\max(\frac{di_c}{dt})} \quad (8)$$

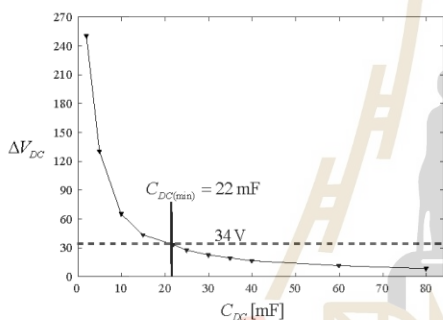
โดยที่ V_{PCC} คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับ 1414 V (พิจารณาที่ฝั่งแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า) และ V_{dc} คือ ค่าแรงดันบัลไฟตรงของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ ซึ่งควรออกแบบให้มีค่ามากกว่า V_{PCC} [14] สำหรับบทความนี้ได้ออกแบบให้ V_{dc} มีค่าเท่ากับ 1700 V ดังนั้น จะสามารถคำนวณค่า $L_{f\max}$ ได้เท่ากับ 0.157 mH ดังนี้

$$L_{f(\max)} = \frac{1700 - 1414}{1809896} = 0.157 \text{ mH}$$

ขั้นที่ 3 กำหนดเลือกใช้ค่า L_f ที่อยู่ภายใต้ขอบเขต $L_{f\max}$ ซึ่งในบทความนี้จะใช้วิธีการทดสอบปรับเปลี่ยนค่า L_f ที่ขนาดต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบผลสมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ และเลือกค่า L_f ที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา โดยผลการทดสอบดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า ค่า L_f ที่ขนาดต่าง ๆ ส่งผลต่อสมรรถนะการกำจัดฮาร์โมนิกที่แตกต่างกัน (ค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายหลังการชดเชยมีค่าแตกต่างกัน) โดยค่า L_f ที่ส่งผลให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยกำจัดฮาร์โมนิกในระบบที่พิจารณาได้ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.12 mH (ให้ผลค่า %THD_i น้อยที่สุด) ดังนั้น จึงเลือกใช้ค่า L_f (L_{fT}, L_{fM}) ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟเท่ากับ 0.12 mH



รูปที่ 4 ค่าปริพันธ์ของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมกับกระแสฮาร์มอนิกของระบบที่พิจารณา



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า \$C_{DC}\$ และค่า \$\Delta V_{DC}\$

3.2 การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซี

การออกแบบค่าตัวเก็บประจุดีซีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (\$C_{DC}\$) จะใช้วิธีการของ T. Thomas และคณะ [11,12] โดยผลการคำนวณที่ได้จะเป็นค่าขอบเขตต่ำสุดของขนาดตัวเก็บประจุ (\$C_{DC(min)}\$) สำหรับใช้เป็นแหล่งสะสมพลังงานให้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ การออกแบบค่า \$C_{DC}\$ ด้วยวิธีการดังกล่าวมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณหาค่า \$C_{DC(min)}\$ จากสมการที่ (9)

$$C_{DC(min)} = \frac{\Delta \left[\int \sum_{j=T,M} \{v_{PCC,j} \cdot i_{c,j}\} dt \right]}{\Delta V_{DC} \times V_{DC}^*} \quad (9)$$

โดย \$V_{DC}^*\$ คือ ค่าแรงดันอ้างอิงที่ได้จากการออกแบบ ส่วนค่า \$\Delta V_{DC}\$ คือ ขนาดแรงดันกระเพื่อมของแรงดัน \$V_{DC}\$ และค่า \$\Delta \left[\int \sum_{j=T,M} \{v_{PCC,j} \cdot i_{c,j}\} dt \right]\$ คือ ขนาดการกระเพื่อมของเทอมปริพันธ์ผลรวมของผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (\$v_{PCC,j}\$) กับกระแสฮาร์มอนิกหรือกระแสอ้างอิง (\$i_{c,j}\$) ที่ได้จากการตรวจจับฮาร์มอนิกทั้งสองเฟส (\$j=T,M\$) ซึ่งสำหรับระบบที่พิจารณาสามารถแสดงการหาค่า \$\Delta \left[\int \sum_{j=T,M} \{v_{PCC,j} \cdot i_{c,j}\} dt \right]\$

ได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1270 VA

จากสมการที่ (9) ถ้ากำหนดให้ \$\Delta V_{DC}\$ เท่ากับ 34 V (2% ของค่า \$V_{DC}^*\$) [11] จะสามารถคำนวณค่า \$C_{DC(min)}\$ ได้เท่ากับ 22 mF ดังนี้

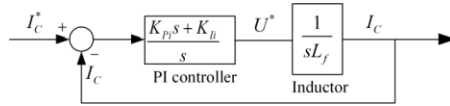
$$C_{DC(min)} = \frac{1270}{34 \times 1700} = 22 \text{ mF}$$

ขั้นที่ 2 กำหนดเลือกใช้ค่า \$C_{DC}\$ ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่อยู่ในขอบเขตของ \$C_{DC(min)}\$ ซึ่งในบทความนี้จะใช้วิธีการทดสอบปรับเปลี่ยนค่า \$C_{DC}\$ ที่ขนาดต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบผลกระทบที่มีต่อค่า \$\Delta V_{DC}\$ และเลือกใช้ค่า \$C_{DC}\$ ที่เหมาะสมกับระบบที่พิจารณา โดยผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อค่า \$C_{DC}\$ มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของ \$\Delta V_{DC}\$ มีค่าลดลง โดยที่ค่า \$C_{DC}\$ เท่ากับ 22 mF (\$C_{DC(min)}\$) พบว่า \$\Delta V_{DC}\$ มีค่าประมาณ 34 V ตามเงื่อนไขการออกแบบ อย่างไรก็ตาม ในบทความนี้จะเลือกใช้ \$C_{DC}\$ ที่มีค่ามากกว่า \$C_{DC(min)}\$ ที่ค่าเท่ากับ 30 mF ทั้งนี้เพื่อให้สมรรถนะการฉีดกระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟมีความคงทนและมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบที่พิจารณาได้มากยิ่งขึ้น

4. การออกแบบระบบควบคุมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

4.1 การออกแบบตัวควบคุมกระแสชดเชย

ระบบควบคุมกระแสชดเชย (\$i_c\$) ด้วยตัวควบคุมพีไอได้ตั้งปรากฏในรูปที่ 1 สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับใช้



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมกระแสขดลวด

ออกแบบตัวควบคุมได้ดังรูปที่ 6 จากรูปดังกล่าว ค่าผลต่างระหว่างกระแสอ้างอิง (I_C^*) ที่ได้จากการตรวจจับสนิทฮาร์มอนิกและค่ากระแสขดลวด (I_C) จะถูกป้อนเป็นอินพุตให้ตัวควบคุมพีไอ และกำหนดให้เอาต์พุตของตัวควบคุม คือ ค่าแรงดันอ้างอิง U^* สำหรับนำไปผ่านพลานต์ (plant) ตัวเหนี่ยวนำ L_f ของวงจรเครื่องกำลังแม่เหล็กเพื่อจำลองการมีดกระแสขดลวด I_C ดังปรากฏในรูป จากบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมดังกล่าว สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิด (closed-loop transfer function) ได้ดังสมการที่ (10)

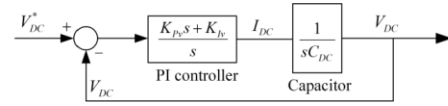
สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_P และ K_I ของตัวควบคุมพีไอสำหรับใช้ควบคุมกระแสขดลวดของวงจรเครื่องกำลังแม่เหล็กจะใช้วิธีการประมาณ [9] โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับสองมาตรฐานดังสมการที่ (11) ซึ่งผลการเปรียบเทียบบ่งชี้ได้ว่าสมการสำหรับใช้ออกแบบค่า K_P และ K_I ของตัวควบคุมพีไอ ซึ่งแสดงผลได้ดังสมการที่ (12) และ (13) ตามลำดับ

$$\frac{I_C}{I_C^*} = \frac{\left(\frac{K_P s + K_I}{L_f} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_P}{L_f} \right) s + \frac{K_I}{L_f}} \quad (10)$$

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_s \omega_n s + \omega_n^2} \quad (11)$$

$$K_P = 2\zeta_s \omega_n L_f \quad (12)$$

$$K_I = \omega_n^2 L_f \quad (13)$$



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

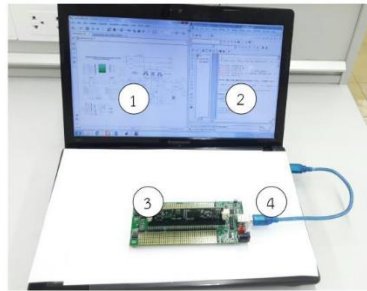
โดยที่ ζ_s คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) และ ω_n คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของการควบคุมกระแสขดลวด

จากสมการที่ (12) และ (13) กำหนดให้ค่า ω_n เท่ากับ $2\pi \times 3000$ rad/s และค่า ζ_s เท่ากับ 0.707 จะสามารถคำนวณค่า K_P ได้เท่ากับ 5.33 และ K_I ได้เท่ากับ 71061

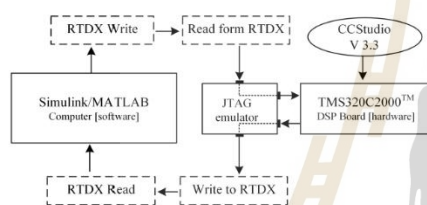
หมายเหตุ: ค่า ω_n จะพิจารณาจากค่าความถี่ของฮาร์มอนิกสูงสุดที่ต้องการกำจัด ซึ่งในบทความนี้พิจารณากำจัดฮาร์มอนิกสูงสุดที่อันดับ 50 ซึ่งมีความถี่เท่ากับ 3000 Hz ดังนั้นค่า ω_n จึงกำหนดเท่ากับ $2\pi \times 3000$ rad/s และนอกจากนี้ การออกแบบให้ค่า ζ_s เท่ากับ 0.707 เนื่องจากการต้องการให้การควบคุมกระแสขดลวดมีผลการตอบสนองที่รวดเร็วและไม่เกิดการพุ่งเกิน (overshoot) ที่สูงจนเกินไป

4.2 การออกแบบตัวควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

ระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ที่ใช้ตัวควบคุมพีไอ ดังปรากฏในรูปที่ 1 สามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมได้ดังรูปที่ 7 โดยอินพุตของระบบ คือ ผลต่างระหว่างค่าแรงดันอ้างอิง V_{DC}^* และค่าแรงดัน V_{DC} ซึ่งจะถูกนำไปผ่านตัวควบคุมพีไอเพื่อกำหนดให้เป็นค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_{DC} (I_{DC}) และจากนั้นจะนำค่า I_{DC} ที่ได้ไป ผ่านพลานต์ตัวเก็บประจุ C_{DC} ของวงจรเครื่องกำลังแม่เหล็กเพื่อจำลองเป็นค่าแรงดัน V_{DC} ต่อไป จากบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงดังรูปที่ 7 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดได้ดังสมการที่ (14)



รูปที่ 8 การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink กับบอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experiment Kit



รูปที่ 9 โครงสร้างการทำงานของระบบจำลองแบบฮาร์ดแวร์ในลูป

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{Fv} และ K_{Fv} ของตัวควบคุมที่ใช้สำหรับการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะใช้วิธีการประมาณเช่นกัน [9] โดยผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์พหุนามลักษณะเฉพาะของฟังก์ชันถ่ายโอนสมการที่ (14) กับฟังก์ชันถ่ายโอนมาตรฐานในสมการที่ (11) จะได้สมการสำหรับใช้คำนวณออกแบบค่า K_{Fv} และ K_{Fv} แสดงดังสมการที่ (15) และ (16) ตามลำดับ โดยที่ค่า ζ_v คือ อัตราส่วนการหน่วงของลูประดัน และค่า ω_m คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง ซึ่งควรออกแบบให้มีค่าน้อยกว่า ω_m ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมของลูประดันจำเป็นต้องมีความไวช้ากว่าลูประกระแส

จากสมการที่ (15) และ (16) กำหนดให้ค่า ω_m เท่ากับ 10π และค่า ζ_v เท่ากับ 0.707 จะสามารถคำนวณออกแบบค่า K_{Fv} ได้เท่ากับ 0.666 และค่า K_{Fv} ได้เท่ากับ 7.40

$$\frac{V_{DC}}{V_{DC}^*} = \frac{\left(s + \frac{K_{Fv}}{K_{Fv}}\right)}{s^2 + \left(\frac{K_{Fv}}{C_{DC}}\right)s + \frac{K_{Fv}}{C_{DC}}} \quad (14)$$

$$K_F = 2\zeta_v \omega_m C_{DC} \quad (15)$$

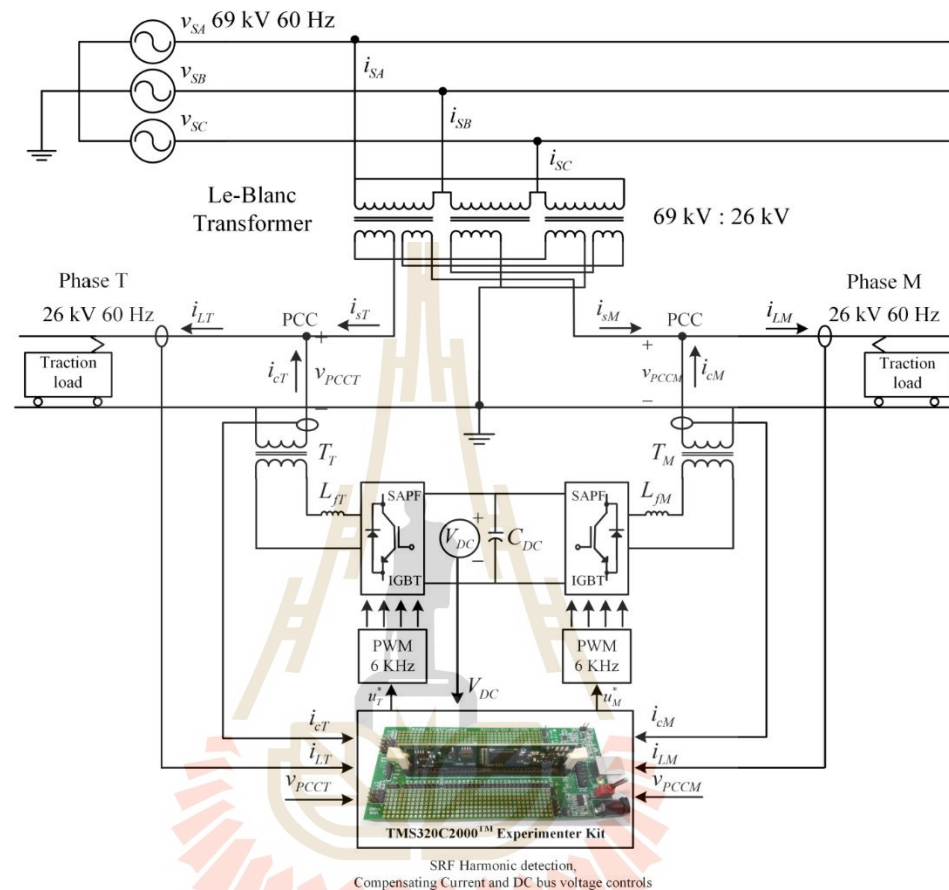
$$K_I = \omega_m^2 C_{DC} \quad (16)$$

จากผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3 และ 4 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

5. การจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์ดแวร์ในระบบรางไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

การทดสอบสมรรถนะการกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าของบทความนี้จะใช้วิธีการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (hardware in the loop: HIL) [15] โดยเครื่องมือที่ใช้จะประกอบด้วยซอฟต์แวร์ (software) โปรแกรม Simulink/MATLAB และอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ (hardware) บอร์ด DSP รุ่น TMS320C2000™ Experiment Kit ที่อาศัยการควบคุมผ่านโปรแกรม CCStudio V3.3 โดยการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม Simulink และบอร์ด DSP ดังกล่าวจะเชื่อมต่อผ่านคอมพิวเตอร์ด้วยสาย (USB JTAG emulator) ดังแสดงในรูปที่ 8

ขั้นตอนการทำงานของระบบจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 9 โดยจะเริ่มต้นจากการใช้บล็อก RTDX Write บนโปรแกรม Simulink สำหรับทำหน้าที่ส่งข้อมูลอินพุตของระบบที่ใช้ในการคำนวณไปยังบอร์ด DSP ผ่านทางพอร์ต USB JTAG emulator ในขณะที่บอร์ด DSP จะรับข้อมูลดังกล่าวด้วยการใช้คำสั่ง Read From RTDX ซึ่งจะต้องเขียนคำสั่งที่โปรแกรม CCStudio V3.3 (โปรแกรมควบคุมการทำงานของบอร์ด DSP) จากนั้นเมื่อบอร์ด DSP ดำเนินการคำนวณหรือประมวลผลแล้ว ข้อมูลเอาต์พุตจากบอร์ด DSP จะถูกส่งกลับไปยังโปรแกรม Simulink ด้วยคำสั่ง Write to RTDX ก่อนที่บล็อก RTDX



รูปที่ 10 ระบบจำลองสถานการณ์การจัดฮาร์มอนิกในระบบแรงไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

Read บนโปรแกรม Simulink จะทำหน้าที่รับข้อมูลเอาต์พุตที่ได้ไปใช้งานต่อ การอธิบายหลักการส่งและรับข้อมูลดังกล่าว เป็นเพียงการคำนวณจำลองสถานการณ์ในหนึ่งรอบช่วงเวลาการซิกตัวอย่าง (sampling time) เท่านั้น สำหรับในรอบถัด ๆ ไป จะดำเนินการซ้ำเดิมเพียงแต่ค่าอินพุตที่ใช้ในการคำนวณจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของระบบการจำลองสถานการณ์

จากระบบที่พิจารณาการจัดฮาร์มอนิกดังรูปที่ 1 สามารถสร้างเป็นระบบการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ใน

รูปแสดงได้ดังรูปที่ 10 จากรูปดังกล่าว ส่วนของระบบแรงไฟฟ้าและวงจรกรองกำลังแอกทีฟจะถูกสร้างขึ้นที่โปรแกรม Simulink ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Simscape/Power System) ในขณะที่ส่วนของการคำนวณตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธี SRF และระบบควบคุมกระแสชดเชยและค่าแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอจะถูกโปรแกรมสร้างที่บอร์ด DSP สำหรับข้อมูลอินพุตที่ส่งให้กับบอร์ด DSP ประกอบด้วย ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC (v_{PCC} , v_{PCCM}) ค่าแรงดันบัสไฟตรง

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและระบบควบคุมสำหรับระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา

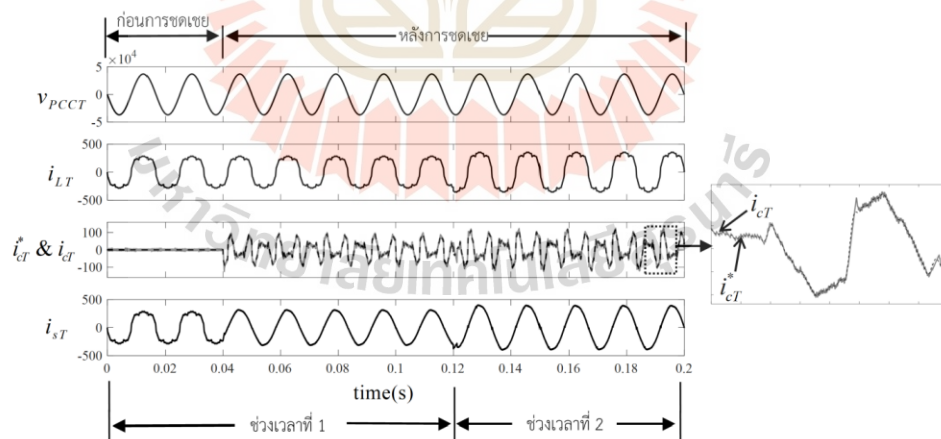
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ	$L_{fT}, L_{fM} = 0.12 \text{ mH}$ $V_{DC} = 1700 \text{ V},$ $C_{DC} = 30 \text{ mF}$
ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมกระแสชดเชย	$K_{Pi} = 5.33,$ $K_{Ii} = 71061$
ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมแรงดันบัสโดยตรง	$K_{Pv} = 0.666,$ $K_{Iv} = 7.40$

(V_{DC}) ค่ากระแสโหลด (i_{LT}, i_{LM}) และค่ากระแสชดเชยของวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (i_{CT}, i_{CM}) ส่วนข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากบอร์ด DSP คือ ค่าแรงดันอ้างอิง (u_T^*, u_M^*) สำหรับนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะรูปสามเหลี่ยม (triangular carrier) เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ตามเทคนิคการสวิตช์แบบ pulse width modulation (PWM) โดยสัญญาณพัลส์ที่ได้จะถูกนำไปใช้ควบคุมสวิตช์อุปกรณ์ไอจีบีทีของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่เป็นวงจรมอนิเตอร์ เพื่อให้สามารถฉีดกระแสชดเชยการจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่สร้างอยู่บนโปรแกรม Simulink ต่อไป

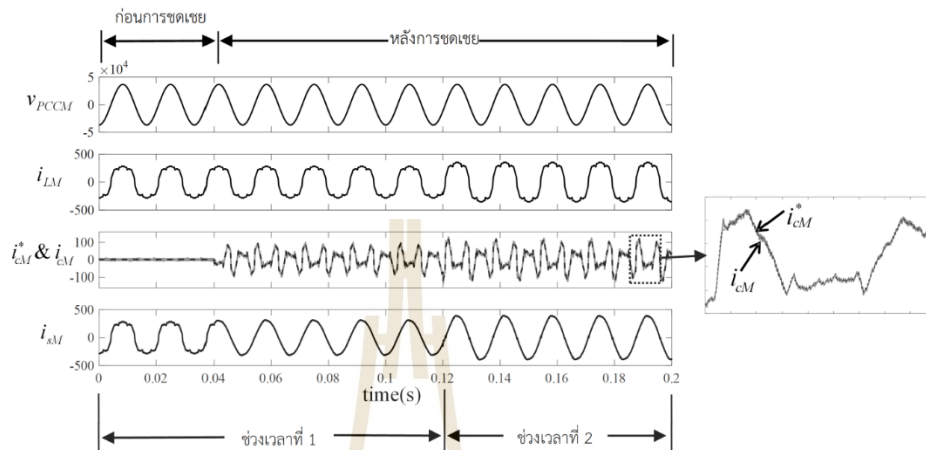
6. ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

การจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูปดังรูปที่ 10 ร่วมกับค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟและตัวควบคุมพีไอที่ได้จากออกแบบไว้ในตารางที่ 1 สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 11 ถึง 13 โดยการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวได้พิจารณาแทนโหลดรางไฟฟ้า (traction load) ด้วยแหล่งจ่ายกระแสโหลดทางอุดมคติที่ประกอบด้วยองค์ประกอบมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่กำหนดตามข้อมูลอ้างอิงจากการตรวจวัดปริมาณฮาร์มอนิกเฉลี่ยของระบบรางไฟฟ้าในประเทศไต้หวัน [13]

จากผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าของเฟส T และ M ในรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ ในช่วงเวลาที่ 1 ก่อนมีการชดเชยตั้งแต่เวลา 0 ถึง 0.04 วินาทีสังเกตได้ว่า กระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายทั้งสองเฟส (i_{sT}, i_{sM}) มีลักษณะผิดเพี้ยนไม่เป็นรูปไซน์ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับกระแสโหลด (i_{LT}, i_{LM}) ทุกประการ โดยสามารถวัดค่า %THD_i ที่คำนวณตามสมการที่ (17) ทั้งสองเฟสได้เท่ากัน



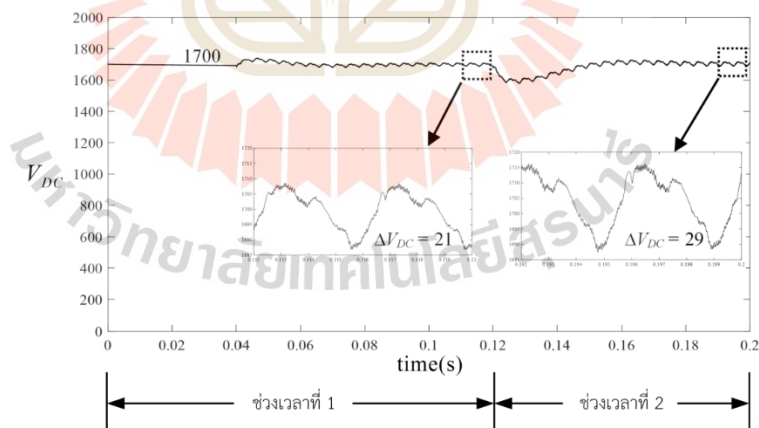
รูปที่ 11 ผลการจำลองสถานการณ์กำจัดฮาร์มอนิกของเฟส T ในระบบรางไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์การกำจัดฮาร์มอนิกของเฟส M ในระบบแรงไฟฟ้าที่พิจารณา

เท่ากับร้อยละ 22.16 อย่างไรก็ตาม ตั้งแต่เวลา 0.04 ถึง 0.12 วินาที เมื่อวงจรรองกำลังแอกที่พิดกระแสชดเชย (i_{cT}, i_{cM}) ที่มีลักษณะรูปสัญญาณคล้ายตามกระแสอ้างอิง (i_{cT}^*, i_{cM}^*) เข้าสู่ระบบแรงไฟฟ้า จะสังเกตเห็นว่าค่ากระแส i_{cT} และ i_{cM} กลับมามีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์เพิ่มมากขึ้น โดยวัดค่า %THD ได้เท่ากับ

ร้อยละ 2.23 และ 2.24 ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 ต่อมาในช่วงเวลาที่ 2 ตั้งแต่เวลา 0.12 วินาทีเป็นต้นไป เมื่อโหลดตรงไฟฟ้าของทั้งสองเฟสมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกระแสโหลดเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่า วงจรรองกำลังแอกที่พร้อมับระบบควบคุมที่ได้จากการออกแบบยังคงมีความยืดหยุ่นสามารถชดเชย



รูปที่ 13 ผลการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอ

(i_{LT}, i_{LM}) กำหนดฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปได้ดีเช่นกัน โดยวัดค่า %THD_i ของกระแส i_{LT} และ i_{LM} ได้เท่ากับร้อยละ 2.31 และ 2.32 ตามลำดับ ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 2

$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (17)$$

โดยที่ I_1 คือ ขนาดกระแสที่มีความถี่มูลฐาน 60 Hz

I_n คือ ขนาดกระแสที่มีความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่

2 ถึง 50

นอกจากนี้ผลของการควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) ของวงจรรอกกำลังแอคทีฟแบบขนานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบมีประสิทธิภาพที่ดีที่สามารถควบคุมค่าแรงดันบัสไฟตรงให้มีค่าเท่ากับ 1700 V ได้ตลอดทุกช่วงเวลาถึงแม้โหลดตรงไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง โดยขนาดของแรงดันกระแสเฟรม (ΔV_{dc}) ในช่วงเวลาที่ 1 มีค่าเท่ากับ 21 V และ ในช่วงเวลาที่ 2 มีค่าเท่ากับ 29 V ซึ่งค่า ΔV_{dc} ดังกล่าวยังคงอยู่ภายใต้ขอบเขตของแรงดันกระแสเฟรมที่ได้ออกแบบไว้ (34 V)

จากผลการจำลองสถานการณ์กึ่งฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าดังกล่าวทั้งหมดในข้างต้น หมายความว่า ค่าพารามิเตอร์ของวงจรรอกกำลังแอคทีฟและค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการออกแบบตามวิธีการที่ได้นำเสนอมีความเหมาะสมกับระบบ ส่งผลให้วงจรรอกกำลังแอคทีฟสามารถฉีดกระแสชดเชยกึ่งฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบรางไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี และค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5 ตามมาตรฐาน IEEE Std 519-2014

7. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบวงจรรอกกำลังแอคทีฟแบบขนานและระบบควบคุมสำหรับใช้กึ่งฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้า โดยการออกแบบดังกล่าวได้ปรับใช้วิธีการ

ดังเดิมเพื่อให้เหมาะสมกับระบบรางไฟฟ้า ผลการจำลองสถานการณ์กึ่งฮาร์มอนิกด้วยเทคนิคฮาร์ตแวร์ในรูปพบว่า วงจรรอกกำลังแอคทีฟร่วมกับระบบควบคุมที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอสามารถชดเชยกึ่งฮาร์มอนิกในระบบรางไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่า %THD_i ของกระแสที่แหล่งจ่ายภายหลังการชดเชยมีค่าอยู่ภายในขอบมาตรฐานของ IEEE Std 519-2014

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมถึงให้สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shu Z, Xie S, Li Q. 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*. 2011; 26(2): 334–343.
- [2] Luo A, Wu C, Shen J, Shuai Z, Ma F. Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2011; 26(10): 2844–2856.
- [3] Tan P-C, Loh PC, Holmes DG. A robust multilevel hybrid compensation system for 25-kV electrified railway applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2004; 19(4): 1043–1052.
- [4] Hu H, He Z, Gao S. Passive Filter Design for China High-Speed Railway with Considering Harmonic Resonance and Characteristic Harmonics. *IEEE*

- Transactions on Power Delivery*. 2015; 30(1): 505–514.
- [5] Jou H-L, Wu J-C, Chu H-Y. New single-phase active power filter. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*. 1994; 141(3): 129–134.
- [6] Cirrincione M, Pucci M, Vitale G, Miraoui A. Current harmonic compensation by a single-phase shunt active power filter controlled by adaptive neural filtering. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009; 56(8): 3128–3143.
- [7] Gonzalez M, Cardenas V, Pazos F. DQ Transformation Development for Single - Phase Systems to Compensate Harmonic Distortion and Reactive Power. In: 9th IEEE Int. Power Electron. Congress. 2004.
- [8] Padungsin M, Narongrit T, Areerak KL. The Comparison Study of Harmonic Detection Algorithms for Single-Phase Power Systems. In: 5th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems. Kitakyushu. 2018. p. 1–6.
- [9] Rahmani S, Mendalek N, Al-Haddad K. Experimental Design of a Nonlinear Control Technique for Three-Phase Shunt Active Power Filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010; 57: 3364–3375.
- [10] Ingram DME, Round SD. A novel digital hysteresis current controller for an active power filter. In: *Proceedings of Second International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. 1997; 2: p. 744–749.
- [11] Thomas T, Haddad K, Joos G, Jaafari A. Design and performance of active power filters. In *IEEE Industry Applications Magazine*. 1998; 4(5): p. 38–46.
- [12] ฐานันดร ตรงใจ, ทศพร ณรงฤทธิ์, กองพล อารีรักษ์. การออกแบบวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสำหรับการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบรางไฟฟ้า. ใน: *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 41 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 2561. หน้า 197–200.
- [13] Huang S-R, Chen B-N. Harmonic study of the Le Blanc transformer for Taiwan railway's electrification system. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2002; 17(2): 495–499.
- [14] Routimo M, Salo M, Tuusa H. Comparison of Voltage-Source and Current-Source Shunt Active Power Filters. *IEEE Transactions on Power Electronics, Power Electronics*. 2007; 22: 636–643.
- [15] Narongrit T, Areerak K-L, Areerak K-N. A New Design Approach of Fuzzy Controller for Shunt Active Power Filter. *Electric Power Components and Systems*. 2015; 43: 685–694.

The Comparison of Three-Phase and Co-Phase Shunt Active Power Filters for Harmonic Elimination in AC Electric Railway Systems

Thanan Trongjai¹, Tosaporn Narongrit²
and Kongpol Areerak³

PEMC research Group, School of Electrical Engineering
Institute of Engineering, Suranaree University of
Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND
¹thanantj@gmail.com, ²tosaporn@sut.ac.th,
³kongpol@sut.ac.th

Sarawut Janpong
Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering,
Rangsit University, RSU
Pathum Thani, THAILAND
sarawut@rsu.ac.th

Abstract—This paper presents the comparison of harmonic elimination in AC electric railway system using two different active power filters, a three-phase shunt active power filter (TP-SAPF) and a co-phase shunt active power filter (CP-SAPF). The indicator for performance evaluation of two shunt active power filters is the total current harmonic distortion (%THD_i) on the three-phase and two-phase sides of the AC electric railway system. Simulink/MATLAB program is used to simulate the harmonic elimination in the considered AC electric railway system. The simulation results show that the TP-SAPF can compensate harmonic only the three-phase side of the system. On the other hand, the CP-SAPF can provide good performance to eliminate harmonic on both the three-phase and two-phase sides of the system. Furthermore, the %THD_i values of the source currents after compensation are followed by the IEEE std 519-2014.

Keywords—active power filter, harmonic elimination, electric railway system, power quality improvement

I. INTRODUCTION

Electrical railway transportation systems have been adopted in many countries around the world because of its efficient and safety compared with other transportation mode and technology. The 25 kV - 27.5 kV AC power supply systems are widely used for the long distance electrified railway because of a stability reason. The traction loads connect into AC power supply systems produce power quality problems such as harmonics, reactive powers, and unbalance currents on a three-phase grid. However, the harmonics problem has been considered in this paper. The harmonics cause a lot of disadvantages, such as loss in transmission line and transformers [1],[2], interference in railway signaling system and the communication device [3], failure in protective and measurement devices [4], and short-life electronic equipment [1]. Therefore, it is very important to eliminate or reduce harmonics in AC electric railway systems for power quality improvement. In this paper, the shunt active power filter is selected to compensate harmonic currents because it is an effective method and more flexible compared with a passive power filter [5]. There are three fundamental types of shunt active power filters for harmonic elimination in AC electric railway systems such as a three-phase shunt active power filter (TP-SAPF), a co-phase shunt active

power filter (CP-SAPF), and a single-phase shunt active power filter (SP-SAPF). However, SP-SAPF and CP-SAPF are the similar types for eliminating harmonic on two-phase in the AC electric railway systems. Therefore, the TP-SAPF and CP-SAPF are considered to compare the performance of harmonic elimination in this paper.

The harmonic elimination in AC electric railway system using TP-SAPF and CP-SAPF can be shown in Fig. 1 and 2, respectively. According to these figures, the considered system is the substation of the AC railway system which receives 69 kV 60 Hz from a three-phase (*ABC*) grid and generated 26 kV 60 Hz two-phase (*M* and *T*) to be the power supply by the balanced Le-blanc transformer. The traction loads are connected into phase *M* and *T* of the power supply by the train running status. For this reason, the actual traction load data of the Taiwan railway system [6] is adopted as the reference case study in this paper. In Fig 1, the TP-SAPF is installed with 1 kV : 69 kV Δ - Δ transformer to inject the compensating currents at the PCC of three-phase side for harmonic elimination. On the other hand, the CP-SAPF with 1 kV : 26 kV linear transformer is used to compensate harmonic at the PCC of two-phase side as shown in Fig 2. The TP-SAPF and CP-SAPF control systems consist of the same three mainly parts. The harmonic detection is the first part, where the synchronous reference frame (SRF) algorithm is used to calculate the reference currents of TP-SAPF and CP-SAPF. The difference between the SRF for TP-SAPF [7] and SRF for CP-SAPF [8] can be seen in section II. The second part is the compensating currents control for TP-SAPF and CP-SAPF. The PI controllers with the PWM switching technique are applied for this paper [9]. The last part is the DC bus voltage (V_{dc}) control of TP-SAPF and CP-SAPF. The PI controller is also used to regulate this voltage [9].

The paper is structured as follows: the SRF harmonic detection for TP-SAPF and CP-SAPF will be explained in section II. The simulation results and performance comparison of harmonic elimination in AC electric railway system between using TP-SAPF and CP-SAPF are presented in section III. Finally, section IV is the conclusion for this paper.

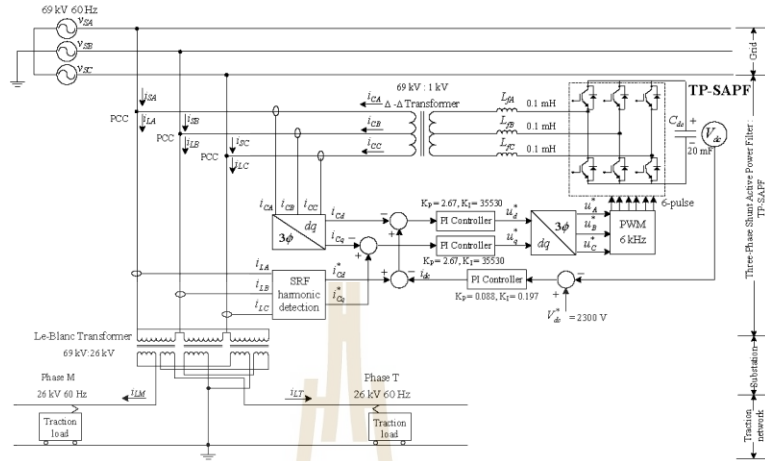


Fig. 1 The harmonic elimination in AC electric railway system using TP-SAPF

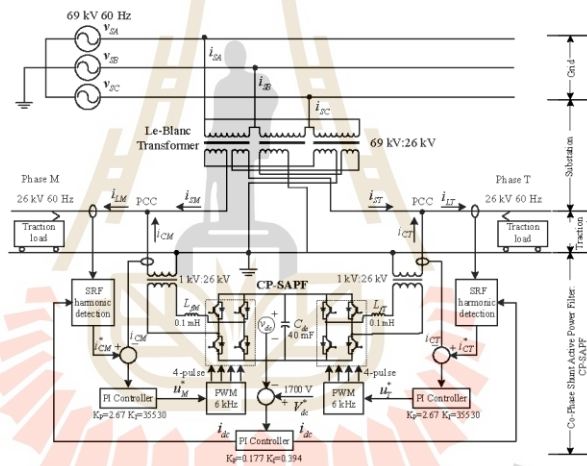


Fig. 2 The harmonic elimination in AC electric railway system using CP-SAPF

II. THE SRF HARMONIC DETECTION

A. The SRF Harmonic Detection for TP-SAPF

In Fig. 1, the synchronous reference frame or called SRF harmonic detection for TP-SAPF [7] uses the rotational frame (dq -axis) technique by angular velocity at the fundamental frequency of PCC voltage on the three-phase side. This algorithm consists of four steps to compute the reference currents on dq -axis ($i_{d\alpha}^*$, $i_{d\beta}^*$) are as follow:

Step 1: Calculate the load currents on $\alpha\beta$ -axis ($i_{L\alpha}$, $i_{L\beta}$) using (1). Where i_{LA} , i_{LB} , i_{LC} are the three-phase load currents.

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{LA} \\ i_{LB} \\ i_{LC} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Step 2: Calculate the load currents on dq -axis ($i_{d\alpha}^*$, $i_{d\beta}^*$) by (2). Where θ is the phase angle of the PCC voltage which it can be obtained by phase-locked loop (PLL) technique.

$$\begin{bmatrix} i_{d\alpha}^* \\ i_{d\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

From (2), the i_{Ld} and i_{Lq} consist of the fundamental currents ($\tilde{i}_{Ld}, \tilde{i}_{Lq}$) and the harmonic currents ($\tilde{i}_{Ld}, \tilde{i}_{Lq}$) components as appeared in (3) and (4), respectively. However, the $\tilde{i}_{Ld}$ and $\tilde{i}_{Lq}$ are selected to calculate the reference current of TP-SAPF for harmonic compensation.

$$i_{Ld} = \tilde{i}_{Ld} + \tilde{i}_{Ld} \quad (3)$$

$$i_{Lq} = \tilde{i}_{Lq} + \tilde{i}_{Lq} \quad (4)$$

Step 3: Determine the $\tilde{i}_{Ld}$ and $\tilde{i}_{Lq}$ using high pass filter. The second order high pass filter with 100 Hz cutoff frequency is used for this paper.

Step 4: Set the reference current on dq -axis for TP-SAPF as (5).

$$\begin{bmatrix} i_{Cd}^* \\ i_{Cq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_{Ld} \\ \tilde{i}_{Lq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

B. The SRF Harmonic Detection for CP-SAPF

The SRF harmonic detection for a single-phase systems [8] amount of two blocks are used to calculate the reference currents for phase M and T of CP-SAPF as shown in Fig. 2. In each SRF harmonic detection block, the algorithm has the following calculations:

Step 1: Calculate the load current on $\alpha\beta$ -axis ($i_{La,x}, i_{L\beta,x}$) using (6). Where $i_{L,x}$ is the load current of phase M or phase T ($x=M$ or T).

$$\begin{bmatrix} i_{La,x} \\ i_{L\beta,x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{L,x}(\alpha) \\ i_{L,x}(\alpha - (\pi/2)) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Step 2: Calculate the load current on dq -axis ($i_{Ld,x}, i_{Lq,x}$) by (2). Where θ_x is the phase angle of PCC voltage on phase M or phase T .

$$\begin{bmatrix} i_{Ld,x} \\ i_{Lq,x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_x) & \sin(\theta_x) \\ -\sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{La,x} \\ i_{L\beta,x} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Step 3: Determine $\tilde{i}_{Ld,x}$ and $\tilde{i}_{Lq,x}$ using high pass filter (second order and 100 Hz cutoff frequency).

Step 4: Calculate the reference current on α -axis by (8).

$$i_{C\alpha,x} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{i}_{Ld,x} \\ \tilde{i}_{Lq,x} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Step 5: Set the phase reference current (i_{Cx}^*) for CP-SAPF equal to the current on α -axis as (9). Note that the $x=M$ for i_{CM}^* and $x=T$ for i_{CT}^* computations.

$$i_{Cx}^* = i_{C\alpha,x} \quad (9)$$

III. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

From the considered systems with parameters as appeared in Fig.1 and 2, the simulation results of the harmonic elimination in AC electric railway system using TP-SAPF and CP-SAPF by MATLAB/Simulink can be shown in Fig 3 and 4, respectively.

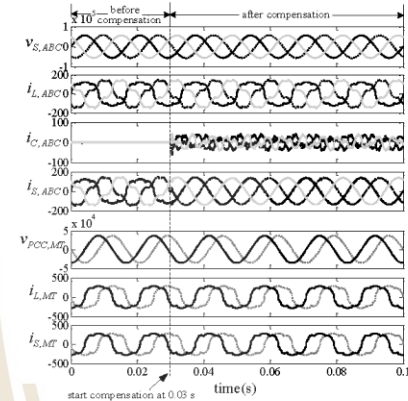


Fig. 3 The harmonic elimination result using TP-SAPF

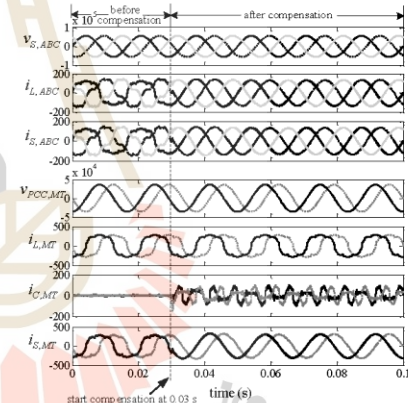


Fig. 4 The harmonic elimination result using CP-SAPF

According to Fig. 3 and 4, the waveforms of the source currents on three-phase ($i_{S,ABC}$) and two-phase ($i_{S,MT}$) sides during before compensation time (0 s to 0.03 s) are as same as the waveform of load currents $i_{L,ABC}$ and $i_{L,MT}$, respectively. These waveforms were distorted from the effect of harmonics. The %THD_I before compensation of both the $i_{S,ABC}$ and $i_{S,MT}$ are the same value equal to 22.16%.

The shunt active power filters start at time equal to 0.03 s. In Fig. 3, after the TP-SAPF injects the compensating currents ($i_{C,ABC}$) into the electric railway

system (on the three-phase side) at the interval time 0.03 s to 0.1 s. It can be seen that the $i_{S,ABC}$ after compensation becomes nearly sinusoidal waveforms. The %THD₁ of source currents in each phase (i_{SA} , i_{SB} and i_{SC}) are equal to 2.21%, 2.24% and 2.18%, respectively. However, the $i_{S,MT}$ waveforms are still distorted and the %THD₁ equal to 22.16%.

Fig. 4 at the time 0 s to 0.03 s, the waveforms of the $i_{S,ABC}$ and $i_{S,MT}$ after compensation by $i_{C,MT}$ of CP-SAPF are almost sinusoidal too (compensate on the two-phase side). The %THD₁ after compensation of source currents on the three-phase and two-phase sides (i_{SA} , i_{SB} , i_{SC} and i_{SM} , i_{ST}) are reduced equal to 1.85%, 1.86%, 1.83% and 1.87%, 1.87%, respectively. These %THD₁ values can be looked at in table I. According to this table, the %THD₁ values of source currents after compensation using CP-SAPF are better than the TP-SAPF.

From the result, it confirms that the CP-SAPF can eliminate harmonic on both the two-phase and three-phase sides of the AC electric railway systems. On the other hand, the TP-SAPF can compensate harmonic only the three-phase side of the system. Note that the remaining harmonic quantity on the two-phase side will be a cause of loss increasing in the Le-blanc transformer [1],[2].

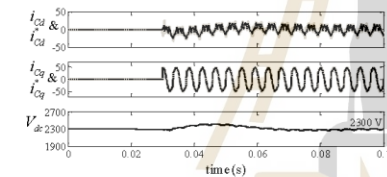


Fig. 5 The results of currents and DC voltage controls for TP-SAPF

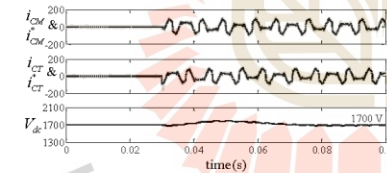


Fig. 6 The results of currents and DC voltage controls for CP-SAPF

In addition, the results of the compensating current and DC bus voltage controls for the TP-SAPF and CP-SAPF can be seen in Fig. 5 and 6, respectively. Where the compensating currents of TP-SAPF have been controlled on dq -axis (i_{Cd} , i_{Cq}). From these figures, it shows that the PI controllers designed by the conventional method [9] can control the compensating current i_{Cd} , i_{Cq} and i_{CM} , i_{CT} track to the reference current i_{Cd}^* , i_{Cq}^* and i_{CM}^* , i_{CT}^* , respectively. Moreover, the DC bus voltages (V_{dc}) of TP-SAPF and CP-SAPF are regulated by PI controllers equal to 2300 V and 1700 V. These PI controllers are also designed by the conventional method [9].

TABLE I. THE %THD₁ VALUES OF THE SOURCE CURRENTS IN AC ELECTRIC RAILWAY SYSTEM

SAPF Types	%THD ₁ on Three-Phase Side			%THD ₁ on Two-Phase Side	
	i_{SA}	i_{SB}	i_{SC}	i_{SM}	i_{ST}
before compensation					
no SAPF	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%	22.16%
after compensation					
TP-SAPF	2.21%	2.24%	2.18%	22.16%	22.16%
CP-SAPF	1.85%	1.86%	1.83%	1.87%	1.87%

IV. CONCLUSION

The comparison of TP-SAPF and CP-SAPF for harmonic elimination in AC electric railway systems is proposed in the paper. The simulation results by MATLAB/Simulink program confirm that the TP-SAPF has good compensated only the three-phase side, while the CP-SAPF can provide good performance and efficiency for harmonic elimination on both the two-phase and three-phase sides of AC electric railway systems. Moreover, the %THD₁ values of the source currents after compensation are satisfied under the IEEE std 519-2014.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) and by the office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand.

REFERENCES

- [1] IEEE std 519-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.
- [2] Robert D. Henderson, and Patrick J. Rose, "Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers," IEEE Trans. on Ind. Appl., May/June 1994, vol. 30, No. 3, pp. 528-532
- [3] A. Luo, C. Wu, J. Shen, Z. Shuai and F. Ma, "Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers," in IEEE Transactions on Power Electronics, Oct. 2011, vol. 26, no. 10, pp. 2844-2856.
- [4] J.P. Brozek, "The Effect of Harmonics on Over current Protection Devices," IEEE Conference on Industry Applications Society Annual Meeting, Seattle, WA, USA, 7-12 oct. 1990, pp.1965-1967.
- [5] M. Izhar, C.M. Hadzer, M. Syafrudin, S. Taib, and S. Idris, "Performance for Passive and Active Power Filter in Reducing Harmonics in The Distribution system," Proceedings of Power and Energy Conference, PECon, Kuala Lumpur, Malaysia, 29-30 November 2004, pp. 104-108.
- [6] Huang and B.-N. Chen, "Harmonic study of the Le Blanc transformer for Taiwan railway's electrification system," IEEE Transactions on Power Delivery, Apr 2002, vol. 17, no. 2, pp. 495-499.
- [7] R. Hao and et al., "A Novel Harmonic Currents Detection Method Based on Rotating d-q Reference Frame for Active Power Filter", IEEE conference on Power Electronics Specialists, PESC 04, 2004, vol. 4, pp. 3034-3038.
- [8] M. Padungsin, T. Narongrit and K.-L. Areearak, "The Comparison Study of Harmonic Detection Algorithms for Single-Phase Power Systems", 5th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Kitakyushu, Japan : April 23-25, 2018, pp.1-6.
- [9] S. Rahmani, N. Mendalek, and K. Al-Haddad, "Experimental Design of a Nonlinear Control Technique for Three-Phase Shunt Active Power Filter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, pp. 3364-3375, 2010.

ประวัติผู้เขียน

นายฐานันตร์ ตรงใจ เกิดเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2536 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ จบการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนหนองโคง "สุรวิทยาคม" ระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสุรวิทยาคาร เมื่อจบการศึกษาในปี พ.ศ. 2555 ได้เข้าศึกษาต่อที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับสอง ในปี พ.ศ. 2559 และในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนการศึกษากิตติบัณฑิตและได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า ปฏิบัติการระบบควบคุม ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า และปฏิบัติการดิจิทัลลอจิก

