

แบบจำลองในโดเมนความถี่และวงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอด
สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก



นายชาติ สรรคอนุรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

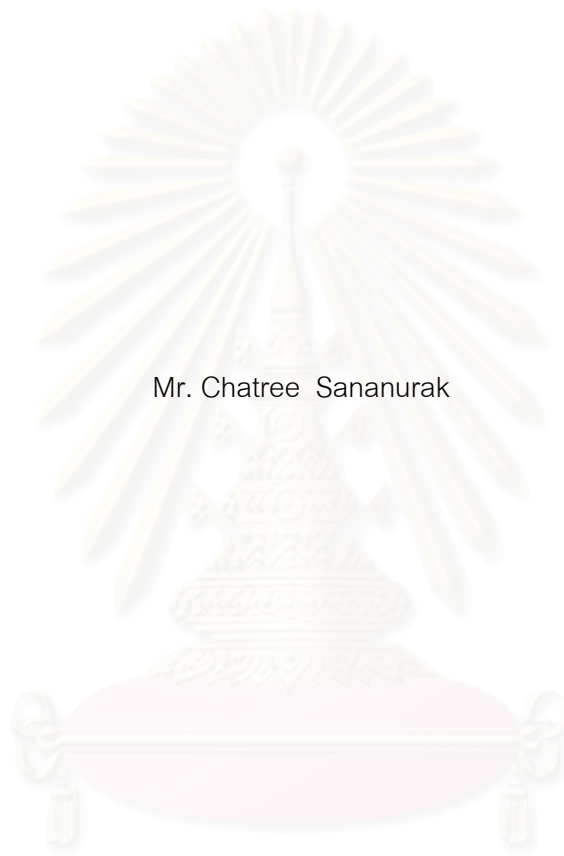
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1186-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FREQUENCY DOMAIN MODEL AND EQUIVALENT CIRCUIT OF A THREE-PHASE
DIODE RECTIFIER FOR HARMONIC ANALYSIS



Mr. Chatree Sananurak

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1186-3

นายชาติรี สรรคอนุรักษ์ : แบบจำลองในโดเมนความถี่และวงจรมุมูลของวงจรเรียงกระแส 3 เฟส แบบไดโอดสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (FREQUENCY DOMAIN MODEL AND EQUIVALENT CIRCUIT OF A THREE-PHASE DIODE RECTIFIER FOR HARMONIC ANALYSIS) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.สมบุญณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 112 หน้า. ISBN 974-53-1186-3.

การวิเคราะห์ผลของการมีปฏิริยาต่อกันของระบบส่งจ่ายไฟ วงจรกรองฮาร์มอนิกกับโหลดไม่เชิงเส้น ชนิดวงจรเรียงกระแส 3 เฟส เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทำความเข้าใจพฤติกรรมของระบบเมื่อมีการออกแบบและติดตั้งวงจรกรอง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโดเมนความถี่ของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอด วิธีการที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองจะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟสลับของวงจรเรียงกระแส โดยจะอาศัยฟังก์ชันการสวิตช์และทฤษฎีการมอดูเลตช่วยในการเชื่อมโยงสัญญาณ งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองที่มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันเอาไว้ 2 แบบ เพื่อให้เกิดทางเลือกในการนำไปใช้กับวงจรเรียงกระแสที่มีโครงสร้างแบบต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม และได้มีการอธิบายกลไกการเกิดการเชื่อมร่วมนกันทางความถี่ด้วยเมตริกซ์อินยัยเชิงฮาร์มอนิก เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการเชื่อมร่วมนกันทางความถี่ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของโหลดชนิดวงจรเรียงกระแสได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทำให้สามารถแสดงแบบจำลองในรูปของวงจรมุมูลในโดเมนความถี่ได้ และเนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีวงจรมุมูลเป็นที่คุ้นเคยดั่งนั้นเพื่อความสะดวกจึงได้ใช้วงจรมุมูลที่พัฒนาขึ้นมาในการอธิบายปรากฏการณ์และคาดการณ์พฤติกรรมของระบบล่วงหน้าเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพสัญญาณไฟฟ้าของระบบส่งจ่ายและชี้ให้เห็นสาเหตุของการมีปฏิริยาต่อกัน โดยได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาและผลจากการทดลอง และได้ทำการวิเคราะห์วงจรมุมูลที่นำเสนอเปรียบเทียบกับวงจรมุมูลที่ใช้กันอยู่ทั่วไปด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2547.....

4570288521 : MAJOR POWER ELECTRONICS

KEY WORD: DIODE RECTIFIER / HARMONIC ANALYSIS / EQUIVALENT CIRCUIT / FREQUENCY DOMAIN MODEL

CHATREE SANANURAK : FREQUENCY DOMAIN MODEL AND EQUIVALENT CIRCUIT OF A THREE-PHASE DIODE RECTIFIER FOR HARMONIC ANALYSIS. THESIS ADVISOR : DR. SOMBOON SANGWONGWANICH, D.Eng ,112 pp. ISBN 974-53-1186-3.

Analysis of the interaction among the power system, the harmonic filters and the nonlinear loads of three-phase diode rectifier type, is necessary for understanding the behavior of the overall system when the filters are designed and installed. The purpose of this thesis is to develop an analytic frequency domain model of the three-phase diode rectifier for harmonic analysis. A method which is used for developing the model is to relate in a systematic way the ac current with the ac voltage using the switching function and the modulation theory. This thesis presents two models having different characteristics to provide suitable choice of the models compatible with several structures of rectifier circuits. Also, the harmonic transfer function matrix is used to represent the proposed model because presenting in matrix form can show evidently the frequency coupling mechanism which is the important characteristic of rectifier converters. Furthermore, because analysis from the circuit viewpoint is more familiar and convenient, the proposed models have been presented as equivalent circuits in frequency domain so as to describe the interaction phenomenon and to predict the behavior of the overall system which is changed by the installation of the power conditioners. The proposed models have also been compared with the conventional models, and the accuracy of the proposed models is confirmed by comparison with the results of both time-domain simulation and experiment.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department..... Electrical Engineering..... Student's signature.....

Field of study..... Electrical Engineering..... Advisor's signature.....

Academic year 2004.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลือและเอาใจใส่อย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร.สมบุญณ์ แสงวงศ์วณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาต่างๆ ในด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ดร.ยุทธนา กุลวิฑิต และ ดร.เจตกุล ไสภวานิตย์ อาจารย์ประจำห้องวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ให้ความรู้ในด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบคุณ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณภักดิ์ รุ่นพี่ที่เอาใจใส่ เป็นกำลังใจและให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ ต่องานวิจัยเสมอมา ขอขอบคุณ คุณประจวบ เขี่ยมสำอางค์ และ คุณอนุชา หริรักษ์ รุ่นพี่ผู้ให้ความช่วยเหลือในด้านการทดลอง แลกเปลี่ยนความรู้ และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ ขอขอบคุณ คุณสาคร โพธิ์งาม รุ่นพี่ผู้ให้คำแนะนำและชักชวนให้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทและแนะนำให้ทำวิจัยกับ ดร.สมบุญณ์ แสงวงศ์วณิชย์ ณ ห้องวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นอกจากนี้ได้ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่อการศึกษาในระหว่างที่ทำการศึกษาในระดับปริญญาโท ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ห้องวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจกันด้วยดีเสมอมา สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษา นอกจากนี้เป็นผู้ที่แนะนำให้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคอยเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ญ
รายการสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตโครงการวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 การวิเคราะห์ปัญหาทางฮาร์มอนิก	4
2.1 วงจรกรองพาสซีฟแบบขนาน	5
2.2 วงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน	6
2.3 แหล่งจ่ายฮาร์มอนิก.....	7
2.3.1 แหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก.....	7
2.3.2 แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก.....	7
2.4 แบบจำลองและวงจรสมมูลสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางฮาร์มอนิก	9
3 แบบจำลองในโดเมนความถี่ของวงจรเรียงกระแส 3 เฟส.....	16
3.1 การหาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสแบบแอดมิตแทนซ์.....	18
3.2 ผลการทดสอบแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์.....	28
3.3 การหาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสแบบอิมพีแดนซ์.....	37
3.4 ผลการทดสอบแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์.....	45
3.5 การหาผลตอบสนองของระบบโดยอาศัยวงรอบป้อนกลับ	52
4 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางฮาร์มอนิกของวงจรเรียงกระแสด้วยวงจรสมมูล.....	60

บทที่	หน้า
4.1 วงจรสมมูลที่สร้างจากแบบจำลองประเภทแอดมิตแทนซ์.....	60
4.2 การวิเคราะห์ระบบด้วยวงจรสมมูลแบบแอดมิตแทนซ์.....	63
4.2.1 ระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหลดแบบอินดักทีฟเมื่อไม่มีการติดตั้งวงจรรอง.....	63
4.2.2 ระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหลดแบบอินดักทีฟเมื่อมีการติดตั้งวงจรรองพาสซีฟแบบขนาน.....	67
4.2.3 ระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหลดแบบอินดักทีฟเมื่อมีการติดตั้งวงจรรองแอกทีฟแบบขนาน.....	71
4.2.4 ระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหลดความต้านทานเมื่อมีการติดตั้งวงจรรองแอกทีฟแบบขนาน.....	76
4.3 วงจรสมมูลที่สร้างจากแบบจำลองประเภทอิมพีแดนซ์.....	84
4.4 การวิเคราะห์ระบบด้วยวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์.....	89
4.4.1 ระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหลดแบบคาปาทีฟเมื่อไม่มีการติดตั้งวงจรรอง.....	89
4.4.2 ระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหลดแบบคาปาทีฟเมื่อมีการติดตั้งวงจรรองพาสซีฟแบบขนาน.....	92
4.4.3 ระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหลดแบบคาปาทีฟเมื่อมีการติดตั้งวงจรรองแอกทีฟแบบขนาน.....	96
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	105
5.1 บทสรุปผลการวิจัย.....	105
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในลำดับถัดไป.....	105
รายการอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก.....	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	112

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบแอดมิตแทนซ์ของระบบในรูปแบบที่ 4.4.....	66
4.2 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบแอดมิตแทนซ์ของระบบในรูปแบบที่ 4.10.....	70
4.3 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบแอดมิตแทนซ์ของระบบในรูปแบบที่ 4.16.....	76
4.4 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์เมื่อคำนวณแบบประมาณของระบบในรูปแบบที่ 4.42	91
4.5 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์เมื่อคำนวณแบบละเอียดของระบบในรูปแบบที่ 4.42	92
4.6 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปแบบที่ 4.47.....	94
4.7 ผลการคำนวณแบบทำซ้ำจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปแบบที่ 4.47.....	95
4.8 ผลการคำนวณอย่างละเอียดแบบทำซ้ำจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปแบบที่ 4.47	96
4.9 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปแบบที่ 4.52.....	99
4.10 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปแบบที่ 4.50 ของระบบในรูปแบบ 4.52 เมื่อมีการติดตั้งวงจรกรอง แยกที่ฟัลต์ดับที่ 5.....	101

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 สัญญาณกระแสและแรงดันด้านเข้าของโหลดชนิดวงจรเรียงกระแส	4
2.2 โครงสร้างของวงจรกรองพาสซีฟแบบขนาน	5
2.3 โครงสร้างของวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน	6
2.4 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่เป็นวงจรกรอง(โหลดแบบอินดักทีฟ)	7
2.5 รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันและกระแสโหลดจากวงจรเรียงกระแสชนิดโหลดอินดักทีฟ	7
2.6 วงจรสมมูลต่อเฟสของวงจรเรียงกระแสชนิดโหลดอินดักทีฟ	8
2.7 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เป็นวงจรกรอง(โหลดแบบคาปาซิทีฟ)	8
2.8 รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันและกระแสโหลดจากวงจรเรียงกระแสชนิดโหลดคาปาซิทีฟ	8
2.9 วงจรสมมูลต่อเฟสของวงจรเรียงกระแสชนิดโหลดคาปาซิทีฟ	9
2.10 วงจรสมมูลขององค์ประกอบฮาร์มอนิกของโหลดแบบอินดักทีฟ	9
2.11 วงจรสมมูลขององค์ประกอบฮาร์มอนิกของโหลดแบบคาปาซิทีฟ	9
2.12 วงจรกรองแอกทีฟแบบขนานที่ติดตั้งสำหรับโหลดแบบอินดักทีฟ	10
2.13 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด กระแสด้านแหล่งจ่ายและกระแสที่วงจรกรอง หลังจากติดตั้งวงจร กรองแอกทีฟแบบขนานจากการจำลองเชิงเวลา	10
2.14 วงจรสมมูลขององค์ประกอบฮาร์มอนิกของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรอง	11
2.15 วงจรสมมูลขององค์ประกอบฮาร์มอนิกของระบบเมื่อติดตั้งวงจรกรอง	11
2.16 ระบบส่งจ่าย 3 เฟสมีโหลดแบบคาปาซิทีฟและมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน	12
2.17 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด กระแสด้านแหล่งจ่ายและกระแสที่วงจรกรอง ก่อนและหลังวงจร กรองทำงานจากการจำลองเชิงเวลา	13
2.18 วงจรสมมูลขององค์ประกอบฮาร์มอนิกของเมื่อติดตั้งวงจรกรอง	14
2.19 วงจรสมมูลขององค์ประกอบฮาร์มอนิก	15
3.1 โครงสร้างของวงจรเรียงกระแส 3 เฟส แบบไดโอด	16
3.2 ฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอด	17
3.3 สัญญาณแรงดันด้านเข้าและฟังก์ชันการสวิตช์	18
3.4 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสด้านไฟตรงสำหรับแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์	19
3.5 สัญญาณกระแสไฟสลับเฟส a ที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณไฟตรงกับฟังก์ชันการสวิตช์เฟส a	20
3.6 แผนภาพแสดงแนวคิดและกระบวนการในการหาแบบจำลองวงจรเรียงกระแสแบบแอดมิตแทนซ์	20
3.7 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดซึ่งมีโหลดความต้านทาน.	28
3.8 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลอง เชิงเวลาของรูป 3.7	29
3.9 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลอง	

รูปที่	หน้า
เชิงเวลาของรูป 3.7	29
3.10 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอของรูป 3.7	30
3.11 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L จากการทดลอง ของรูป 3.7	30
3.12 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.7	30
3.13 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็น วงจรกรองกับโหลดความต้านทาน	31
3.14 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลอง เชิงเวลาของรูป 3.13	31
3.15 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลอง เชิงเวลาของรูป 3.13	32
3.16 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอของรูป 3.13	32
3.17 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L จากการทดลอง ของรูป 3.13.	33
3.18 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.13	33
3.19 ระบบส่งจ่าย 3 เฟสมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองกับโหลด ความต้านทาน.....	33
3.20 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลอง เชิงเวลาของรูป 3.19	34
3.21 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลอง เชิงเวลาของรูป 3.19	34
3.22 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอของรูป 3.19	35
3.23 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอของรูป 3.19	35
3.24 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L จากการทดลอง ของรูป 3.19	36
3.25 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.19	36
3.26 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส แบบไดโอดสำหรับการพัฒนาแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์	37
3.27 แผนภาพแสดงแนวคิดและกระบวนการในการหาแบบจำลองวงจรเรียงกระแสแบบอิมพีแดนซ์.....	37
3.28 สัญญาณกระแสไฟสลับ ฟังก์ชันการสวิตช์ และสัญญาณกระแสไฟตรง	38
3.29 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสด้านไฟตรงสำหรับแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์.....	39
3.30 ตัวอย่างรูปแบบการเชื่อมต่อกันระหว่างวงจรด้านไฟตรงกับทางด้านไฟสลับ	39
3.31 รูปคลื่นสัญญาณฟังก์ชันการสวิตช์.....	41
3.32 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดมีโหลดความต้านทาน	45

รูปที่	หน้า
3.33 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 3.32	46
3.34 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการคำนวณของรูป 3.32	46
3.35 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.32.....	47
3.36 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็น วงจรรองกับโหลดความต้านทาน	47
3.37 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 3.36	48
3.38 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการคำนวณของรูป 3.36.....	48
3.39 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.36.....	49
3.40 ระบบส่งจ่าย 3 เฟสมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรรองกับโหลด ความต้านทาน.....	49
3.41 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 3.40	50
3.42 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการคำนวณของรูป 3.40.....	50
3.43 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.40.....	51
3.44 ระบบส่งจ่ายไฟ 3 เฟส ที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส	52
3.45 บล็อกไดอะแกรมของระบบในรูปที่ 3.44.....	53
3.46 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็น วงจรรองต่อกับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	54
3.47 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสเฟส i_L จากการทดลองของ รูป 3.46	55
3.48 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.46	55
3.49 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอของรูป 3.46	55
3.50 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองทางเวลาของรูป 3.46.....	56
3.51 ตัวอย่างระบบส่งจ่ายไฟ 3 เฟส ที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส.....	56
3.52 บล็อกไดอะแกรมของระบบในรูปที่ 3.51	56
3.53 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็น วงจรรองต่อกับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง	58
3.54 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสเฟส i_L จากการทดลองของ รูป 3.53	58
3.55 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.53	58
3.56 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอของรูป 3.53	59
3.57 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองทางเวลาของรูป 3.53.....	59
4.1 วงจรสมมูลของแบบจำลองประเภทแอดมิตแทนซ์	61
4.2 โครงสร้างของแอดมิตแทนซ์สมมูล Y_{nk}	61

รูปที่	หน้า
4.3 วงจรสมมูลที่ประมาณจากเทอมที่สำคัญของความถี่มูลฐาน และความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 ตามลำดับ	62
4.4 ตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรรองกับโหลดความต้านทาน	63
4.5 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.4.....	64
4.6 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.4.....	64
4.7 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด และกระแสโหลด จากการทดลองของรูป 4.4.....	65
4.8 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด i_L จากการทดลองของรูป 4.4	65
4.9 วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 4.4.....	66
4.10 ตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรรองกับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานลำดับที่ 7	67
4.11 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.10	68
4.12 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.10.....	68
4.13 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด และกระแสโหลด จากการทดลองของรูป 4.10.....	69
4.14 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด i_L จากการทดลองของรูป 4.10	69
4.15 วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 4.10.....	70
4.16 ตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรรองกับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งวงจรกรองแยกที่ฟแบบขนาน.....	71
4.17 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสที่วงจรกรองที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาตามลำดับของรูป 4.16.....	71
4.18 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S ตามลำดับ จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 4.16.....	72
4.19 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.16.....	73
4.20 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด และกระแสโหลดและกระแสแหล่งจ่าย จากการทดลองของรูป 4.16	73
4.21 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลดและกระแสแหล่งจ่ายและกระแสจากวงจรกรองจากการทดลองของรูป 4.16	74
4.22 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S ที่ได้จากการทดลองตามลำดับของรูป 4.16	74
4.23 วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 4.16.....	75
4.24 โครงสร้างของความต้านทานสมมูล R_{Nk}	76
4.25 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสที่มีโหลดเป็นความต้านทาน	77
4.26 ตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่มีโหลดความต้านทาน.....	78

รูปที่	หน้า
4.27 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสไหลต i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.26 ก่อนติดตั้ง วงจรกรอง	78
4.28 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันไหลต v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.26 ก่อนติดตั้ง วงจรกรอง	79
4.29 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันไหลต และกระแสไหลต จากการทดลองของรูป 4.26 ก่อนติดตั้ง วงจรกรอง	79
4.30 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสไหลต i_L จากการทดลอง ของรูป 4.26 ก่อนติดตั้งวงจรกรอง.....	80
4.31 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสที่มีไหลตเป็นความต้านทานก่อนติดตั้งวงจรกรอง.....	80
4.32 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสไหลต i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S และรูปคลื่น สัญญาณของกระแสที่วงจรกรอง ของรูป 3.26 หลังจากติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน.....	81
4.33 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสไหลต i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสด้าน แหล่งจ่าย i_S ของรูป 3.26 หลังจากติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานจากการจำลองเชิงเวลา	81
4.34 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสที่มีไหลตเป็นความต้านทานของรูป 3.26 หลังติดตั้งวงจรกรอง.....	82
4.35 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสไหลต i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S และรูปคลื่น สัญญาณของกระแสที่วงจรกรองของรูป 3.26 หลังจากติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานจากการ ทดลอง.....	82
4.36 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสไหลต i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสด้าน แหล่งจ่าย i_S ของรูป 3.26 หลังจากติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานจากการทดลอง	83
4.37 วงจรสมมูลของแบบจำลองประเภทอิมพีแดนซ์	84
4.38 โครงสร้างของอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{THK}	84
4.39 วงจรสมมูลในโดเมนความถี่ที่ความถี่มูลฐาน ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ตามลำดับ.....	86
4.40 วงจรสมมูลโดยประมาณที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7.....	87
4.41 วงจรสมมูลโดยประมาณที่มีการลดทอนความซับซ้อน.....	88
4.42 ตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีไหลตเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง ต่อกับไหลตความต้านทาน	89
4.43 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสไหลต i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.42.....	90
4.44 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันฟิลเตอร์ v_f และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.42.....	90
4.45 วงจรสมมูลโดยประมาณของระบบในรูปที่ 4.42.....	91
4.46 วงจรสมมูลโดยละเอียดของระบบในรูป 4.42.....	92
4.47 ตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีไหลตเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง ต่อกับไหลตความต้านทาน และมีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานอันดับที่ 7.....	92
4.48 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสไหลต i_L ของรูป 4.47	93

รูปที่	หน้า
4.49 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของแรงดันที่วงจรรอง v_f ของรูป 4.47	93
4.50 วงจรสมมูลโดยประมาณของระบบในรูป 4.47	94
4.51 วงจรสมมูลที่มีความละเอียดมากขึ้นของระบบในรูป 4.47	95
4.52 ตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรรอง กับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งวงจรรองแยกที่ฟแบบขนาน.....	96
4.53 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S และรูปคลื่น สัญญาณของกระแสที่วงจรรอง i_{AF7} ตามลำดับของรูป 4.52	97
4.54 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 4.52.....	97
4.55 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_S^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 4.52.....	97
4.56 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิง เวลาของรูป 4.52	98
4.57 วงจรสมมูลโดยประมาณของระบบในรูปที่ 4.52 เมื่อมีการติดตั้งวงจรรองแยกที่ฟที่ฮาร์โมนิก อันดับที่ 7.....	100
4.58 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S และรูปคลื่น สัญญาณของกระแสที่วงจรรอง i_{AF5} ของรูปที่ 4.52 เมื่อมีการติดตั้งวงจรรองลำดับที่ 5	100
4.59 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูปที่ 4.52 เมื่อมีการติดตั้งวงจรรอง ลำดับที่ 5	100
4.60 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_S^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูปที่ 4.52 เมื่อมีการติดตั้งวงจรรอง ลำดับที่ 5	101
4.61 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูปที่ 4.52 เมื่อมีการติดตั้ง วงจรรองลำดับที่ 5.....	101
4.62 วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 4.36 เมื่อมีการติดตั้งวงจรรองแยกที่ฟลำดับที่ 5.....	103
4.63 รูปแบบการมีปฏิริยาต่อกันระหว่างคู่ฮาร์โมนิกลำดับใกล้เคียง.....	103
4.64 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S และรูปคลื่น สัญญาณของกระแสที่วงจรรอง i_{AF} ตามลำดับ เมื่อมีการติดตั้งวงจรรองลำดับที่ 5 และ 7.....	104
4.65 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L และ i_S ตามลำดับ เมื่อมีการติดตั้งวงจรรองลำดับที่ 5 และ 7.....	104

รายการสัญลักษณ์

i_a, i_b, i_c	: กระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสเฟส a, b และ c ตามลำดับ
v_a, v_b, v_c	: แรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสเฟส a, b และ c ตามลำดับ
v_{Sa}, v_{Sb}, v_{Sc}	: แหล่งจ่ายแรงดันไฟสลับในเฟส a, b และ c ตามลำดับ
v_{fa}, v_{fb}, v_{fc}	: แรงดันที่วงจรกรองในเฟส a, b และ c ตามลำดับ
$S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$: ฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดตัวที่ 1 ถึง 6 ตามลำดับ
s_a, s_b, s_c	: ฟังก์ชันการสวิตช์ เฟส a, b และ c ตามลำดับ
$\tilde{s}_a, \tilde{s}_b, \tilde{s}_c$: ฟังก์ชันการสวิตช์คอมพลีเมนต์ เฟส a, b และ c ตามลำดับ
$[v_\phi] = [v_a \ v_b \ v_c]^T$: เวกเตอร์ของแรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
$[i_\phi] = [i_a \ i_b \ i_c]^T$: เวกเตอร์ของกระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
$[s_\phi] = [s_a \ s_b \ s_c]^T$: เวกเตอร์ของฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแส
$[\tilde{s}_\phi] = [\tilde{s}_a \ \tilde{s}_b \ \tilde{s}_c]^T$: เวกเตอร์ของฟังก์ชันการสวิตช์คอมพลีเมนต์ของวงจรเรียงกระแส
$[v_{ac}] = [v_\alpha \ v_\beta]^T$: เวกเตอร์ของแรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส (ปริมาณสเปซเวกเตอร์)
$[i_{ac}] = [i_\alpha \ i_\beta]^T$: เวกเตอร์ของกระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส (ปริมาณสเปซเวกเตอร์)
$[S] = [s_\alpha \ s_\beta]^T$: เวกเตอร์ของฟังก์ชันการสวิตช์ ของวงจรเรียงกระแส (ปริมาณสเปซเวกเตอร์)
$\hat{V}_L = [V_L \ V_L^*]^T$: เวกเตอร์ของแรงดันโหลดในองค์ประกอบฮาร์มอนิก
$\hat{V}_S = [V_S \ V_S^*]^T$: เวกเตอร์ของแหล่งจ่ายแรงดันในองค์ประกอบฮาร์มอนิก
$\hat{I}_L = [I_L \ I_L^*]^T$: เวกเตอร์ของกระแสโหลดในองค์ประกอบฮาร์มอนิก
$Y_{Load} = \begin{bmatrix} Y_F & Y_B \\ Y_B^* & Y_F^* \end{bmatrix}$: เมตริกซ์แอดมิตแทนซ์ของแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์
$\hat{Y}_{filter} = \begin{bmatrix} Y_{filter} & 0 \\ 0 & Y_{filter}^* \end{bmatrix}$: เมตริกซ์แอดมิตแทนซ์วงจรกรองฮาร์มอนิก
$\hat{Z}_S = \begin{bmatrix} Z_S & 0 \\ 0 & Z_S^* \end{bmatrix}$: เมตริกซ์อิมพีแดนซ์ด้านแหล่งจ่าย
$Z_{Load} = \begin{bmatrix} Z_F & Z_B \\ Z_B^* & Z_F^* \end{bmatrix}$: เมตริกซ์อิมพีแดนซ์ของแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์
$\hat{S} = \begin{bmatrix} S_F & S_B \\ S_B^* & S_F^* \end{bmatrix}$: เมตริกซ์ฟังก์ชันการสวิตช์ของแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์

- i_d : กระแสด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแส
 v_d : แรงดันด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแส
 T : เมตริกซ์การแปลงสเปซเวกเตอร์
 C_f : เมตริกซ์การแปลงไปหน้าและย้อนหลัง
 A_n, B_n, C_n : สัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ลำดับที่ n ของฟังก์ชันการสวิตช์
 V_k : สัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ลำดับที่ k ของ แรงดันไฟสลับของวงจรเรียงกระแสใน ปริมาณสเปซเวกเตอร์
 I_k : สัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ลำดับที่ k ของกระแสไฟสลับของวงจรเรียงกระแสใน ปริมาณสเปซเวกเตอร์
 i^+ : สเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
 v^+ : สเปซเวกเตอร์ของแรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส
 s^+ : สเปซเวกเตอร์ในรูปจำนวนเชิงซ้อนของประกอบไปหน้า
 I : เวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ของ i^+
 V : เวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์ของ v^+
 Y_F, Y_B : แอดมิตแทนซ์เมตริกซ์ของแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์
 Z_F, Z_B : อิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์
 $\frac{N(s)}{D(s)}$: แอดมิตแทนซ์ด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแส
 $\frac{D(s)}{N(s)}$: อิมพีแดนซ์ด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแส
 $R_{Nk}^{(m)}$: ตัวต้านทานสมมูลด้านไฟสลับลำดับที่ k ของวงจรสมมูลแบบแอดมิตแทนซ์
 $L_{Nk}^{(m)}$: ตัวเหนี่ยวนำสมมูลด้านไฟสลับลำดับที่ k ของวงจรสมมูลแบบแอดมิตแทนซ์
 $C_{Nk}^{(m)}$: ตัวเก็บประจุสมมูลด้านไฟสลับลำดับที่ k ของวงจรสมมูลแบบแอดมิตแทนซ์
 I_{Nk} : แหล่งจ่ายกระแสควบคุมลำดับที่ k
 $R_{THk}^{(m)}$: ตัวต้านทานสมมูลด้านไฟสลับลำดับที่ k ของวงจรสมมูลแบบ อิมพีแดนซ์
 $C_{THk}^{(m)}$: ตัวเก็บประจุสมมูลด้านไฟสลับลำดับที่ k ของวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์
 V_{THk} : แหล่งจ่ายแรงดันควบคุมลำดับที่ k
 Y_{load} : แอดมิตแทนซ์ด้านไฟสลับ
 Z_{load} : อิมพีแดนซ์ด้านไฟสลับ
 θ : มุมเริ่มนำกระแสของไดโอด
 Z_s : อิมพีแดนซ์ด้านแหล่งจ่าย
 Z_f : อิมพีแดนซ์วงจรกรอง
 Z_l : อิมพีแดนซ์สายส่ง
 I_{Sk} : กระแสแหล่งจ่ายในองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ k

- I_{Lk} : กระแสไหลตในองค้ประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ k
 I_{AFk} : กระแสวงจรกรองฮาร์มอนิกในองค้ประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ k
 V_{Lk} : แรงดันไหลตในองค้ประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ k
 V_{fk} : แรงดันวงจรกรองฮาร์มอนิกในองค้ประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ k
 V_{Sk} : แหล่งจ่ายแรงดันในองค้ประกอบฮาร์มอนิกอันดับที่ k



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มากในปัจจุบันเนื่องจากเรานำมาใช้ร่วมกับกับเครื่องจักรและอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ใช้กำเนิด ส่งและจ่ายไฟฟ้าจำนวนมาก อีกทั้งสามารถนำมาใช้ในการแปลงผันและควบคุมพลังงานไฟฟ้า ควบคุมกระบวนการผลิตตลอดจนสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามผลข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์ซึ่งเกิดขึ้นจากการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังคือการสร้างสัญญาณฮาร์มอนิก ย้อนกลับไฟสู่ระบบส่งจ่าย ซึ่งสัญญาณฮาร์มอนิกนี้เป็นมลภาวะทางไฟฟ้าที่จะสร้างปัญหาให้กับอุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบเช่น ทำให้อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้ารุ่นใหม่หรืออุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาด เกิดแรงดันหรือกระแสเกินพิกัดของอุปกรณ์เนื่องจากการเรโซแนนซ์ หรืออาจทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่หม้อแปลง สายเคเบิล (Cables) และมอเตอร์ ซึ่งปัญหาที่กล่าวมาสามารถส่งผลให้อุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบเกิดความเสียหายได้

เนื่องจากการปรับปรุงคุณภาพของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังเป็นประเด็นที่ได้รับความสำคัญมากขึ้นในปัจจุบัน จึงมีการนำอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น วงจรกรองแอกทีฟ วงจรกรองพาสซีฟและตัวเก็บประจุที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง มาติดตั้งในระบบเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบให้ดีขึ้นโดยอาศัยศักยภาพของเทคโนโลยีด้านเครื่องมือวัด คอมพิวเตอร์และสวิตซ์กำลังที่มีประสิทธิภาพสูงพัฒนาอุปกรณ์ดังกล่าวขึ้นมา ซึ่งปกติแล้วอุปกรณ์เหล่านี้สามารถปรับปรุงคุณภาพสัญญาณไฟฟ้าได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน จึงทำให้เกิดการประยุกต์ในการนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

แต่อย่างไรก็ตามประเด็นสำคัญอยู่ที่วงจรเรียงกระแสแบบไดโอดซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์รุ่นใหม่และอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับกันมากขึ้น ซึ่งโหลดประเภทวงจรเรียงกระแสนี้จะสร้างปัญหาให้กับแหล่งจ่ายไฟด้วยการสร้างกระแสฮาร์มอนิกย้อนกลับไปสู่ระบบ ซึ่งผลกระทบต่อระบบเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกจึงมีมากตามการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานและวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานจึงถูกนำมาใช้ในการขจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความเชื่อในหลักการทำงานที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดแบบไม่เชิงเส้นว่ามีประสิทธิภาพที่สามารถขจัดกระแสฮาร์มอนิกได้ตามต้องการ แต่ในหลายครั้งจะพบว่าเกิดปัญหาหลังจากการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าว เช่น มีการเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกทางด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานเพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิก จากปัญหาที่เกิดขึ้นการวิเคราะห์ผลกระทบของการมีปฏิสัมพันธ์กัน (Interaction) ระหว่างระบบส่งจ่ายกับโหลดจึงเป็นสิ่งที่จะต้องได้รับการพิจารณา การหาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอดเพื่อใช้วิเคราะห์ถึงสาเหตุของปัญหาจึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญมาก ถึงแม้ว่าในงานวิจัยที่ผ่านมาจะมีการนำเสนอแบบจำลองเป็นวงจรมุมลั่วไว้บ้างแล้ว แต่ที่มานั้นยังคลุมเครือเนื่องจากไม่มีรายละเอียดของวงจรมุมลั่วในเชิงทฤษฎีแต่เป็นเพียงการอ้างอิงจากพฤติกรรมโดยรวมของวงจรเท่านั้น [1] และในการวิเคราะห์ผลกระทบของการ

มีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างระบบส่งจ่ายกับโหลดยังขาดการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์อย่างละเอียด[2],[3] อีกทั้งยังละเลยผลของการเชื่อมร่วมระหว่างความถี่ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของโหลดประเภทวงจรเรียงกระแส งานวิจัยในระยะหลังจึงได้มีการนำเสนอแบบจำลองโดยใช้เทคนิคทางโดเมนความถี่ในการวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสแบบไดโอด แต่ส่วนใหญ่จะเป็นการวิเคราะห์ที่ในวงจรเรียงกระแสแบบเฟสเดียว [4],[5] และไม่มีการนำเสนอเป็นวงจรสมมูล[6]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะหาแบบจำลองอย่างละเอียดในโดเมนความถี่และวงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาต่างๆในเชิงฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

หาแบบจำลองในโดเมนความถี่และวงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอดบริดจ์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟหรือพาสซีฟเพื่อลดทอนกระแสฮาร์มอนิก

1.3 ขอบเขตโครงการวิทยานิพนธ์

1.3.1 หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโดเมนความถี่และวงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอดบริดจ์

1.3.2 วิเคราะห์พฤติกรรมของระบบในแง่การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสฮาร์มอนิกของวงจรเรียงกระแสเมื่อติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนาน

1.3.3 วิเคราะห์พฤติกรรมของวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน เมื่อถูกนำไปใช้ในการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากวงจรเรียงกระแส

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาการทำงานของวงจรกรองแอกทีฟและพาสซีฟรวมถึงปัญหาที่เกิดจากการประยุกต์ใช้กับโหลดที่ไม่เชิงเส้น

1.4.2 วิเคราะห์ระบบเพื่อหาสาเหตุของปัญหา

1.4.3 หาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแส

1.4.4 ตรวจสอบความถูกต้องและวิเคราะห์แบบจำลองแล้วแสดงเป็นวงจรสมมูล

1.4.5 วิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของกระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟและพาสซีฟ

1.4.6 หาแนวทางแก้ไขปัญหา

1.4.7 เก็บข้อมูลและสรุปผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ช่วยในการวิเคราะห์พฤติกรรมของกระแสด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส ซึ่งจะส่งผลถึงการกำหนดพิกัดของวงจรกรองแอกทีฟหรือพาสซีฟเพื่อใช้ในการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกส์

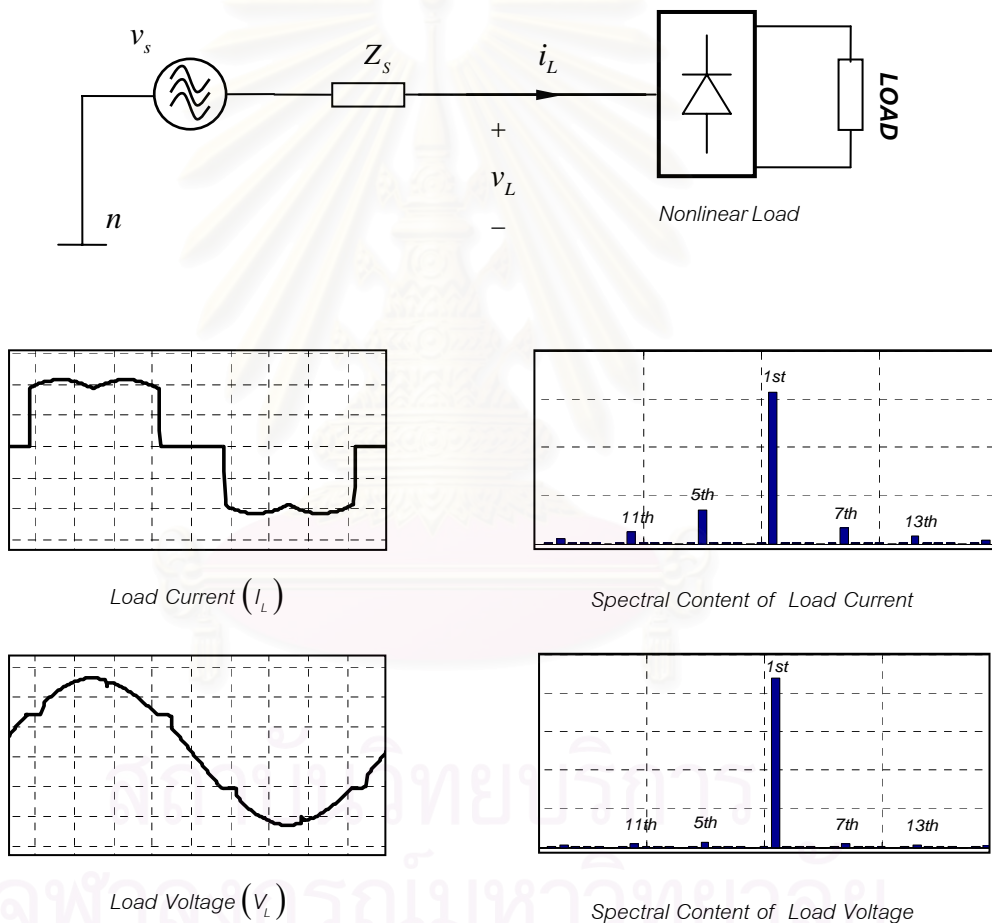


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การวิเคราะห์ปัญหาทางฮาร์มอนิก

วงจรเรียงกระแส 3 เฟสเป็นโหลดชนิดหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลังที่สัญญาณของกระแสและแรงดันด้านเข้ามีความสัมพันธ์กันเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีสาเหตุเนื่องมาจากการทำงานของสวิตช์กำลัง จึงทำให้โหลดชนิดนี้สร้างปัญหาด้วยการสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกย้อนกลับไปสู่ระบบส่งจ่ายไฟได้ ในรูปที่ 2.1 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสซึ่งสังเกตเห็นความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเชิงเส้นและมีฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น



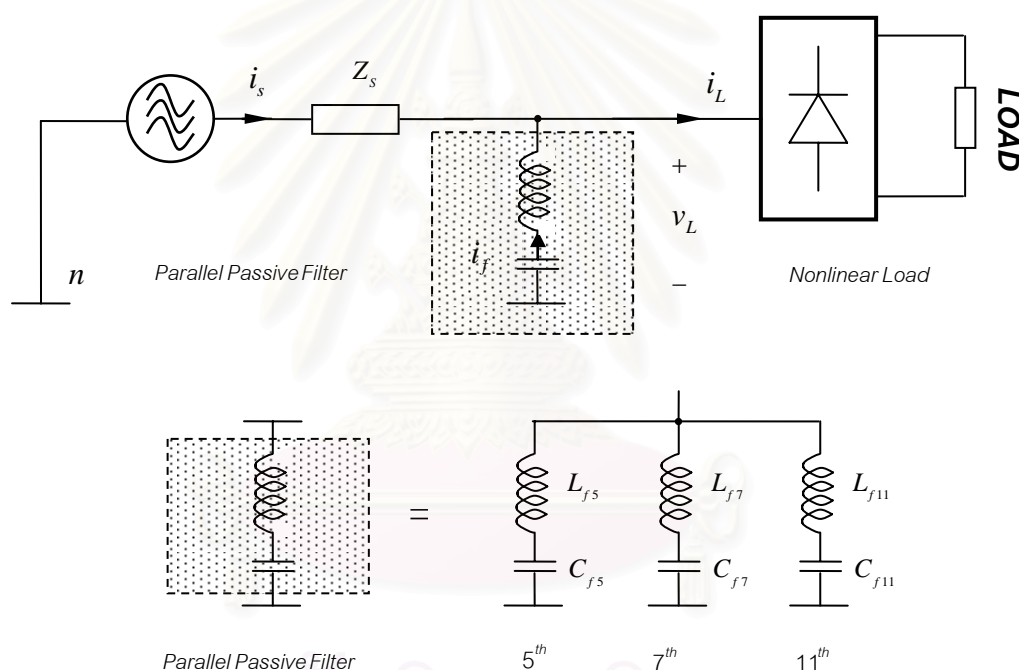
รูปที่ 2.1 สัญญาณกระแสและแรงดันด้านเข้าของโหลดชนิดวงจรเรียงกระแส

วงจรกรองแบบขนานเป็นอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพสัญญาณไฟฟ้าของระบบส่งจ่ายที่ผู้ใช้งานจะทำการติดตั้งเข้าไปในระบบเพื่อกำจัดสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งวงจรกรองแบบขนานมีนิยามใช้อยู่ด้วยกัน 2 ชนิดคือวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานและวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน โดยวงจรกรองทั้ง 2 ชนิดจะ

กำจัดกระแสฮาร์มอนิกไม่ให้ไปรบกวนระบบทางด้านแหล่งจ่ายด้วยการสร้างทางไหลของกระแสให้กับแหล่งจ่าย ฮาร์มอนิกวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานและวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานจะใช้หลักการทำงานที่แตกต่างกันดังนี้

2.1 วงจรกรองพาสซีฟแบบขนาน

วงจรกรองพาสซีฟแบบขนานที่แสดงได้ในรูปที่ 2.2 โครงสร้างของวงจรแต่ละกิ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุ โดยแต่ละกิ่งจะเป็นเส้นทางไหลให้กับกระแสฮาร์มอนิกด้วยการทำให้ขนาดของอิมพีแดนซ์ในกิ่งของวงจรกรองพาสซีฟให้มีค่าต่ำกว่าขนาดของอิมพีแดนซ์ทางด้านแหล่งจ่ายมากเพื่อลดทอนกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลไปทางด้านแหล่งจ่าย การปรับขนาดของอิมพีแดนซ์ในกิ่งของวงจรกรองพาสซีฟจะอาศัยการปรับขนาดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในแต่ละกิ่งเพื่อให้ความถี่เรโซแนนซ์ ดังแสดงในสมการที่ (2.1) ตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัด



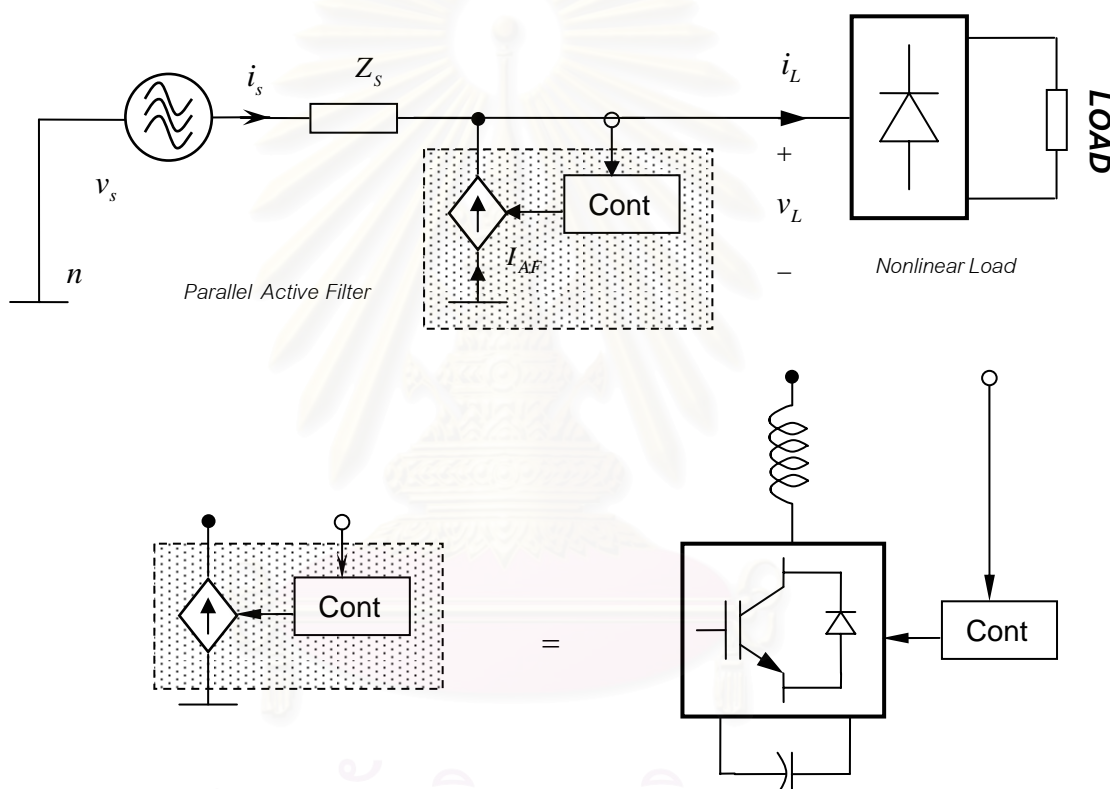
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของวงจรกรองพาสซีฟแบบขนาน

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (2.1)$$

อย่างไรก็ตามขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ต่ำจะส่งผลให้กระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายอื่นๆ ในระบบส่งจ่ายไหลมารวมกันที่วงจรกรองพาสซีฟ เป็นเหตุเกิดกระแสเกินพิกัดได้ ซึ่งปัญหาดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นกับวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน

2.2 วงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน

วงจรกรองแอกทีฟแบบขนานเป็นอุปกรณ์ชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยอาศัยเทคโนโลยีทางด้านสวิตซ์กำลัง ร่วมกับเทคนิคการควบคุม ซึ่งมีหลักการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.3 กระแสโหลด I_L จะถูกตรวจจับเข้ามาแล้วส่วนควบคุม *Cont* สั่งให้ฉีดกระแสชดเชย I_{AF} เฉพาะองค์ประกอบฮาร์มอนิกซึ่งมีขนาดเท่ากับกระแสที่ตรวจจับ ดังนั้นกระแสจากแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกทั้งหมดจะไหลผ่านวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานส่งผลให้ไม่มีกระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่าย หลักการทำงานที่กล่าวข้างต้นเป็นการตรวจจับกระแสทางด้านโหลด แต่อย่างไรก็ตามสามารถใช้วิธีการตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่ายได้ในทำนองเดียวกัน ด้วยการทำงานของวงรอบปิดควบคุมให้กระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายที่ตรวจจับมาลดลงจนเป็นศูนย์แอมป์



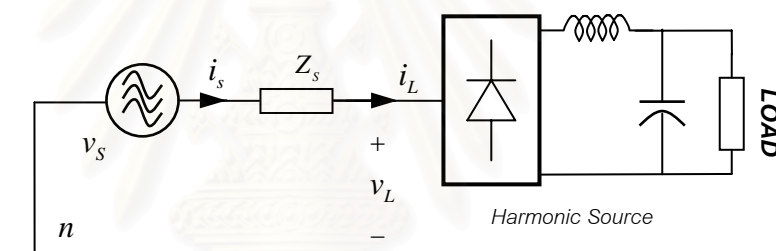
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน

จากหลักการการทำงานของวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานและวงจรกรองพาสซีฟแบบขนาน ทำให้ทราบว่า เพื่อให้การกำจัดกระแสฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองมีประสิทธิภาพสูงสุด วงจรกรองควรจะมีพิกัดกระแสที่เพียงพอต่อความต้องการในการใช้ชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบ ดังนั้นการที่จะช่วยให้การออกแบบพิกัดกระแสของวงจรกรองทำได้ง่ายขึ้น จึงควรใช้งานวงจรกรองแต่ละชนิดให้เหมาะสมกับพฤติกรรมของโหลดชนิดวงจรเรียงกระแสแต่ละประเภท เช่น วงจรกรองแบบขนานจะเหมาะสำหรับกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่มีขนาดก่อนและหลังการติดตั้งวงจรกรองค่อนข้างคงที่ เปลี่ยนแปลงไม่มาก ซึ่งเป็นพฤติกรรมของวงจรเรียงกระแสที่มีคุณสมบัติเป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกประเภทแหล่งจ่ายกระแส โดยประเภทของแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกสามารถจำแนกออกได้ 2

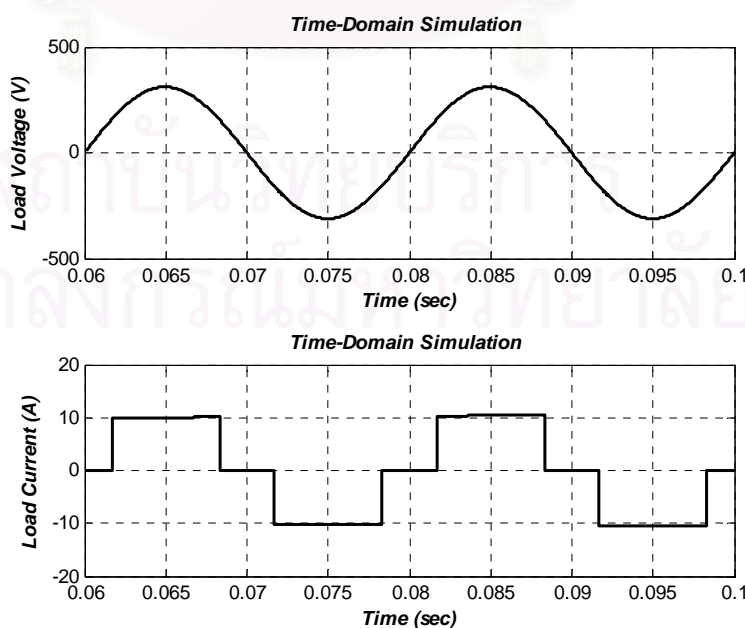
ประเภทคือแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกและแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก ทำการจำแนกตามโครงสร้างของวงจรเรียงกระแสซึ่งวงจรเรียงกระแสที่ใช้กันอยู่มีโครงสร้างของวงจรโหลดด้านไฟตรงหลากหลาย แต่อย่างไรก็ตามสามารถแบ่งได้เป็นโหลดแบบอินดักทีฟและโหลดแบบคาปาซิทีฟ [2] ซึ่งแต่ละประเภทแสดงคุณสมบัติของการเป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกแตกต่างกันดังนี้

2.3 ลักษณะแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกของวงจรเรียงกระแส

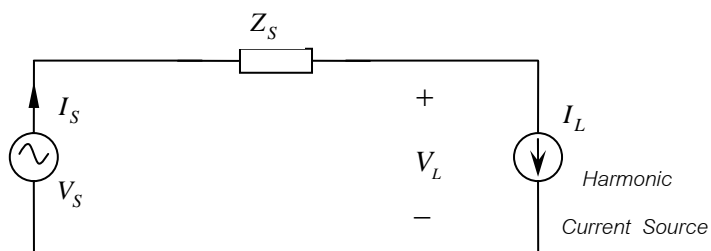
2.3.1 แหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก วงจรเรียงกระแสควบคุม (Controlled Rectifier) หรือวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่วงจรทางด้านไฟตรงมีตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่พอ (โหลดแบบอินดักทีฟ) ที่ทำให้กระแสไฟตรงมีลักษณะคงตัวที่แสดงในรูปที่ 2.4 ถูกจัดว่าเป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกชนิดแหล่งจ่ายกระแส พิจารณารูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดันในรูปที่ 2.5 พบว่าในขณะที่รูปคลื่นแรงดันนั้นไม่มีฮาร์มอนิก แต่รูปคลื่นสัญญาณของกระแสมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ มากซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีกระแสฮาร์มอนิกสร้างโดยวงจรเรียงกระแส นอกจากนี้กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นยังมีลักษณะที่ขนาดและเฟสไม่ขึ้นอยู่กับการมีเตอร์ทางด้านไฟสลับอีกด้วย ดังนั้นวงจรเรียงกระแสที่มีโหลดแบบอินดักทีฟจึงมีพฤติกรรมที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก และสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลต่อเฟสกรณีที่มีตัวเหนี่ยวนำมีขนาดใหญ่มากได้ดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.4 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่เป็นวงจรกรอง(โหลดแบบอินดักทีฟ)

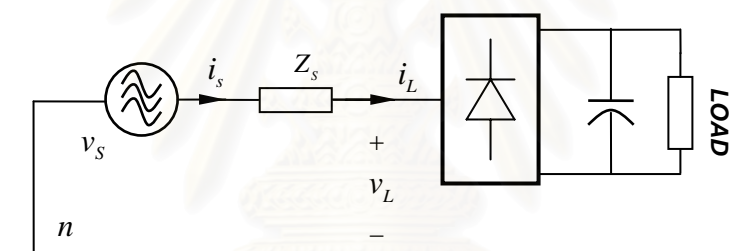


รูปที่ 2.5 รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันและกระแสโหลดจากวงจรเรียงกระแสชนิดโหลดอินดักทีฟ

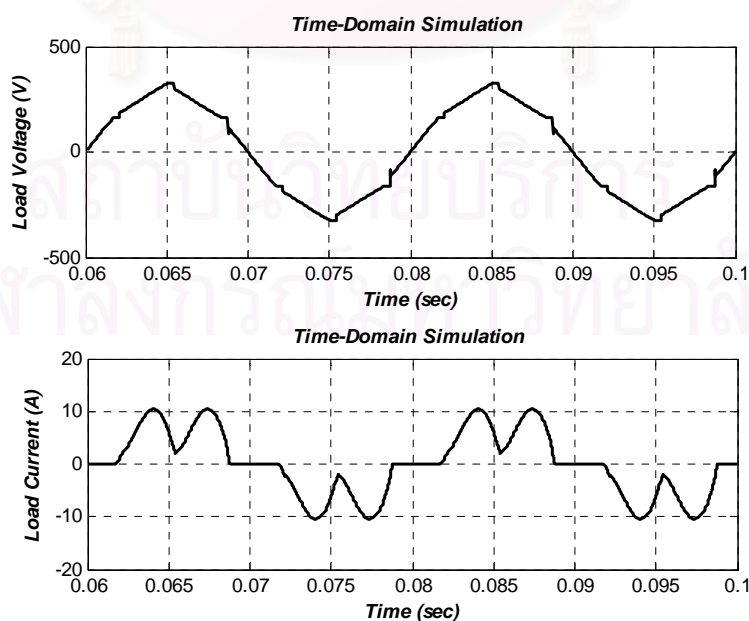


รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลต่อเฟสของวงจรเรียงกระแสที่มีโหลดแบบอินดักทีฟ

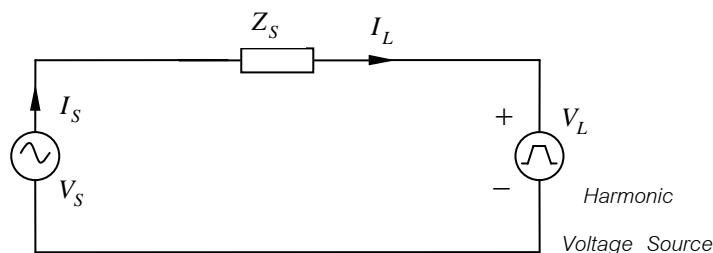
2.3.2 แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก แหล่งจ่ายฮาร์มอนิกอีกชนิดหนึ่งคือวงจรเรียงกระแสแบบไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ที่วงจรทางด้านไฟตรงมีตัวเก็บประจุขนาดใหญ่พอ (โหลดแบบคาปาซิทีฟ) ที่ทำแรงดันบัลต์ไฟตรง (DC Bus) มีค่าคงตัว พิจารณารูปคลื่นสัญญาณของกระแสและแรงดันในรูปที่ 2.8 ถึงแม้ว่ารูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลดจะมีฮาร์มอนิกอยู่ก็ตาม แต่พบว่าขนาดของกระแสขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ด้านไฟสลับ Z_S ค่อนข้างมาก ในขณะที่ขนาดของรูปคลื่นแรงดันโหลดขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ด้านไฟสลับน้อยมาก ดังนั้นวงจรเรียงกระแสประเภทนี้จึงมีพฤติกรรมเป็นแหล่งจ่ายแรงดันมากกว่าแหล่งจ่ายกระแส และสามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลต่อเฟสในกรณีที่มีตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่มากได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.7 วงจรเรียงกระแสที่ใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เป็นวงจรกรอง(โหลดแบบคาปาซิทีฟ)



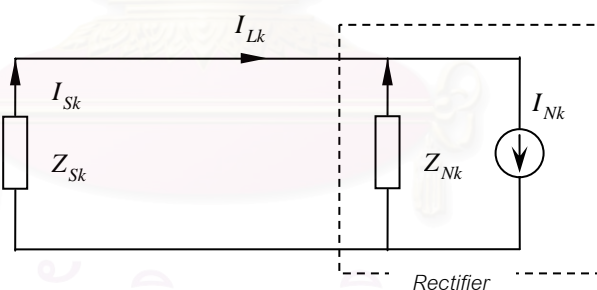
รูปที่ 2.8 รูปคลื่นของสัญญาณแรงดันและกระแสโหลดจากวงจรเรียงกระแสชนิดโหลดคาปาซิทีฟ



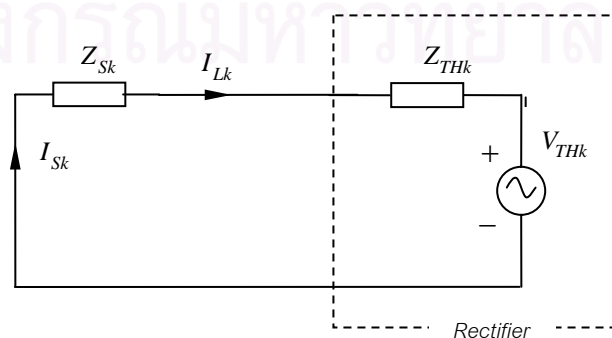
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลต่อเฟสของวงจรเรียงกระแสชนิดโหลดคาปาซิทีฟ

2.4 แบบจำลองและวงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางฮาร์มอนิก

จากการจำแนกประเภทของแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกตามพฤติกรรมของสัญญาณกระแสและแรงดันข้างต้น ทำให้สามารถนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมของวงจรเรียงกระแสได้ โดยงานวิจัยในอดีต [1],[3] ได้เสนอแนวคิดการหาวงจรสมมูลในโดเมนความถี่โดยอ้างอิงจากพฤติกรรมโดยรวมของวงจรเรียงกระแส โดยวงจรสมมูลที่ได้นำเสนอแบ่งได้เป็น 2 แบบคือวงจรสมมูลของโหลดแบบอินดักทีฟซึ่งมีองค์ประกอบดังในรูปที่ 2.10 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกประเภทแหล่งจ่ายกระแส I_{Nk} และอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{Nk} ที่มีขนาดใหญ่ตามค่าของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้เป็นวงจรกรองด้านไฟตรง แบบที่ 2 เป็นวงจรสมมูลของโหลดแบบคาปาซิทีฟดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกประเภทแหล่งจ่ายแรงดันและอิมพีแดนซ์สมมูลที่มีขนาดเล็กเนื่องจากผลของตัวเก็บประจุด้านไฟตรง



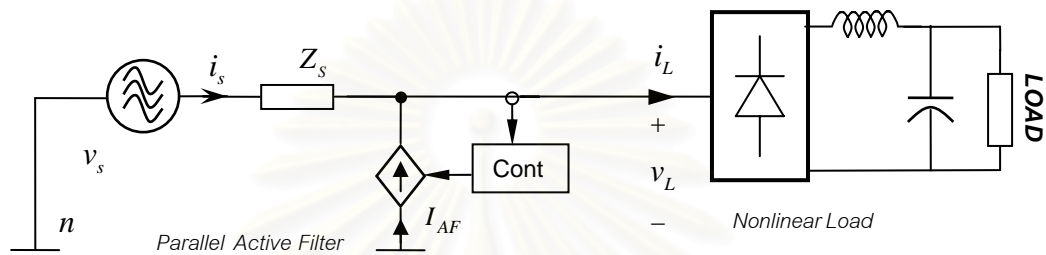
รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลขององค์ประกอบฮาร์มอนิกของโหลดแบบอินดักทีฟ



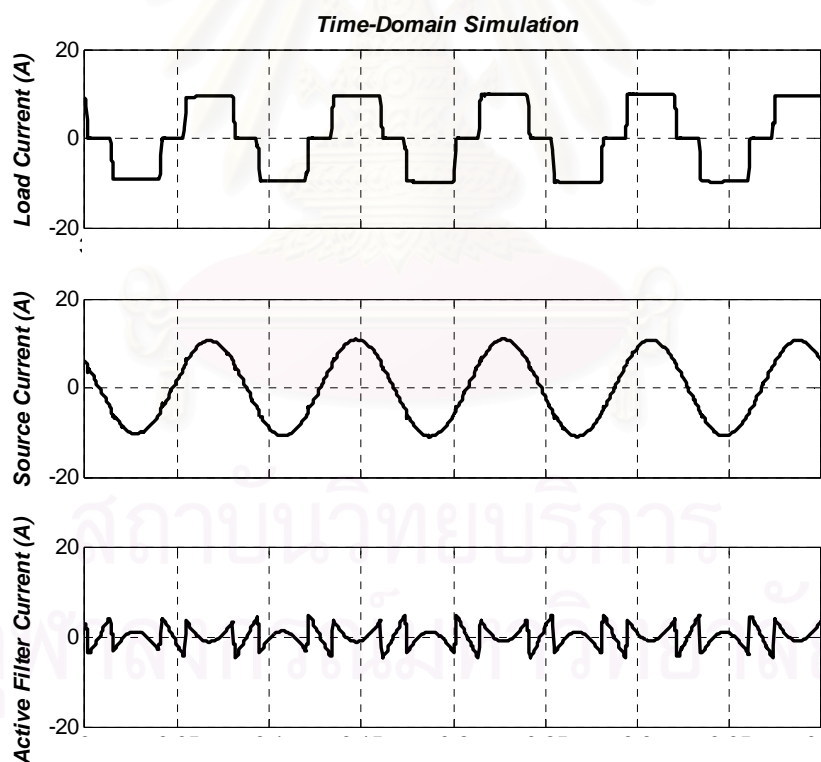
รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลขององค์ประกอบฮาร์มอนิกของโหลดแบบคาปาซิทีฟ

จากวงจรมุมของวงจรเรียงกระแสทั้ง 2 แบบ จะเห็นว่าที่มาของวงจรมุมนั้น ได้มาจากพฤติกรรมของวงจรเรียงกระแส โดยแนวคิดนี้สามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของวงจรเรียงกระแสของโหลดแบบอินดักทีฟได้ ดังแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ห้ด้วยวงจรมุมดังต่อไปนี้

จากระบบในรูปที่ 2.4 เมื่อทำการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน ซึ่งตำแหน่งการติดตั้งวงจรกรองแสดงในรูปที่ 2.12 จะได้รูปคลื่นของสัญญาณกระแสและแรงดันหลังการติดตั้งวงจรกรองดังในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 วงจรกรองแอกทีฟแบบขนานที่ติดตั้งสำหรับโหลดแบบอินดักทีฟ

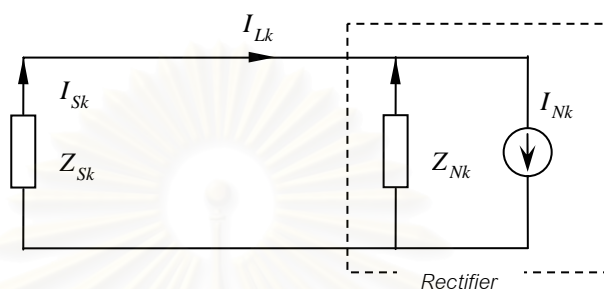


รูปที่ 2.13 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด กระแสด้านแหล่งจ่ายและกระแสที่วงจรกรอง หลังจากติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานจากการจำลองเชิงเวลา

วงจรมุมขององค์ประกอบฮาร์มอนิกของโหลดแบบอินดักทีฟดังแสดงในรูปที่ 2.14 จะพบว่ากระแสจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก I_{Nk} จะแบ่งไหลโดยส่วนหนึ่งจะไหลผ่านอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{Nk} ซึ่งอยู่ภายใน

วงจรเรียงกระแส และอีกส่วนหนึ่งจะไหลออกมาด้านนอกซึ่งก็คือกระแสไหลต I_{Lk} นั้นเอง โดยสัดส่วนของกระแสแต่ละส่วนจะขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{Nk} และอิมพีแดนซ์ภายนอกดังแสดงในสมการที่ (2.2)

$$I_{Sk} = I_{Lk} = \frac{Z_{Nk}}{Z_{Nk} + Z_{Sk}} I_{Nk} \tag{2.2}$$

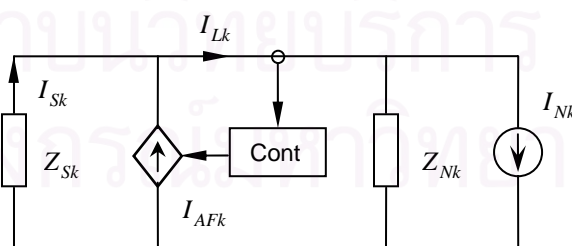


รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลขององค์ประกอบฮาร์มอนิกของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรอง

ระบบในรูปที่ 2.12 เมื่อติดตั้งวงจรกรองแยกที่ฟแล้ว สามารถแสดงเป็นวงจรสมมูลในโดเมนความถี่ขององค์ประกอบฮาร์มอนิกเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบได้ดังรูปที่ 2.15 กระแสด้านแหล่งจ่ายและกระแสไหลตแสดงได้ดังในสมการที่ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก I_{Nk} และกระแสจากวงจรกรอง I_{AFk}

$$I_{Sk} = \frac{Z_{Nk}}{Z_{Nk} + Z_{Sk}} I_{Nk} - \frac{Z_{Nk}}{Z_{Nk} + Z_{Sk}} I_{AFk} \tag{2.3}$$

$$I_{Lk} = \frac{Z_{Nk}}{Z_{Nk} + Z_{Sk}} I_{Nk} + \frac{Z_{Sk}}{Z_{Nk} + Z_{Sk}} I_{AFk} \tag{2.4}$$



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลขององค์ประกอบฮาร์มอนิกของระบบเมื่อติดตั้งวงจรกรอง

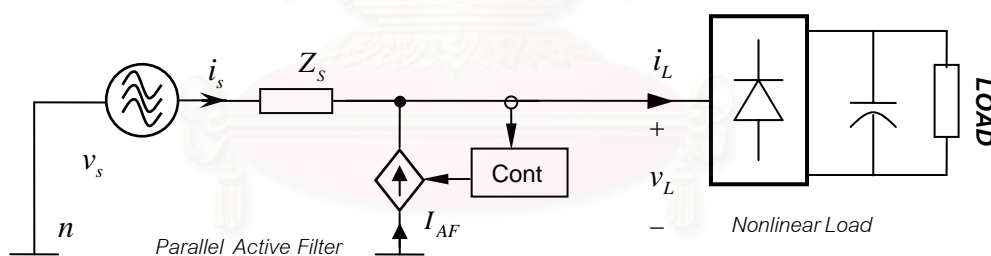
ตามหลักการทำงานของวงจรกรองแบบขนานจะได้ว่าขนาดของกระแสที่วงจรกรองจ่ายออกมาจะมีขนาดเท่ากับกระแสฮาร์มอนิกทางด้านไหลตดังแสดงในสมการที่ (2.5)

$$I_{AFk} = I_{Lk} \quad (2.5)$$

แทนสมการที่ (2.5) ลงในสมการที่ (2.4) จะได้ว่าสุดท้ายแล้วกระแสที่วงจรกรองต้องจ่ายจะมีขนาดเท่ากับกระแสจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก จากสมการที่ (2.6) ซึ่งให้เห็นว่ากระแสจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดจะไหลผ่านวงจรกรอง ทำให้กระแสด้านแหล่งจ่ายเหลือเพียงกระแสในความถี่มูลฐานเท่านั้น

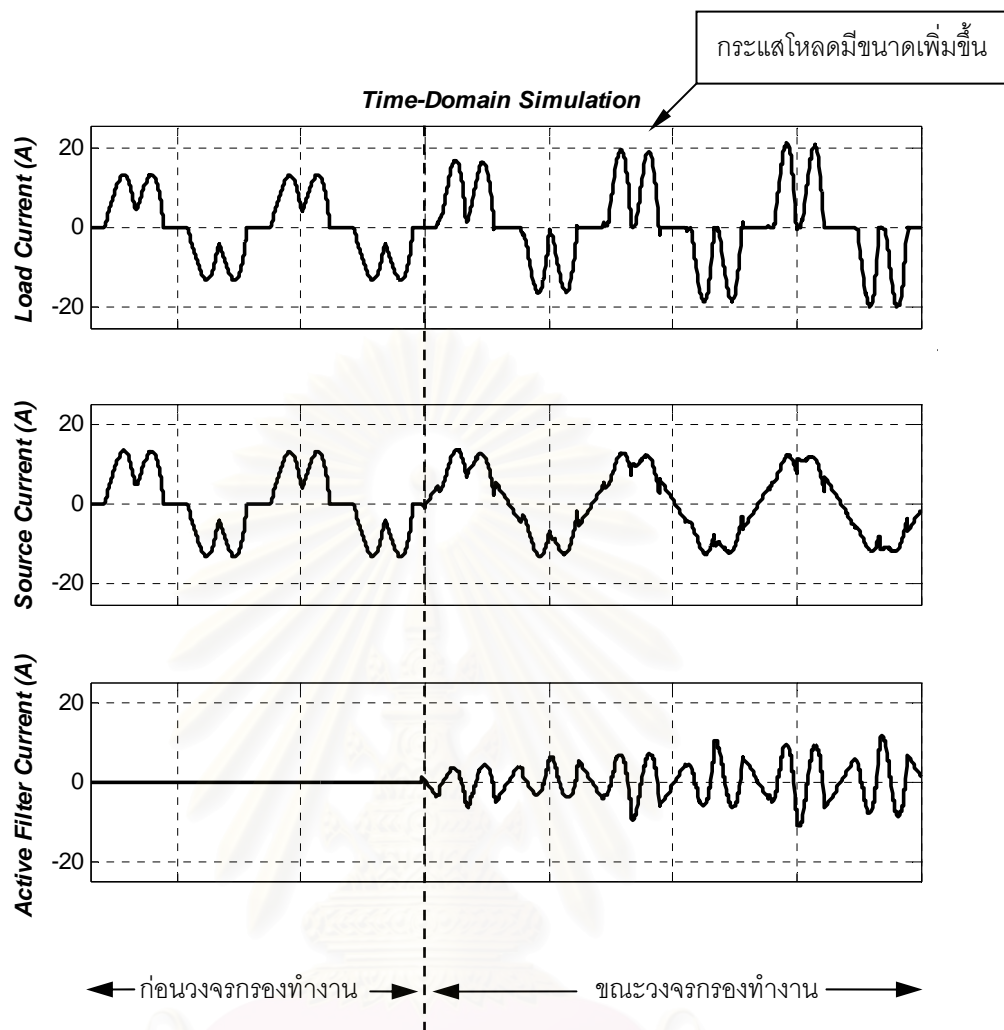
$$I_{AFk} = I_{Lk} = I_{Nk} \quad (2.6)$$

เมื่อพิจารณากระแสไหลโดยใช้วงจรสมมูล พบว่าเนื่องจากวงจรสมมูลของโหลดแบบอินดักทีฟ อิมพีแดนซ์สมมูลจะมีขนาดใหญ่มาก ทำให้ก่อนติดตั้งวงจรกรองกระแสจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก โดยส่วนใหญ่ไหลออกมาภายนอก ปรากฏที่กระแสไหล และเมื่อติดตั้งวงจรกรองแล้วกระแสไหลจะเปลี่ยนแปลงไม่มากจากก่อนติดตั้ง โดยกระแสไหลที่ปรากฏภายนอกจะเท่ากับกระแสที่แหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกตั้งในสมการที่ (2.6) ขนาดของกระแสไหลที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากติดตั้งวงจรกรองจะมีขนาดเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์สมมูลภายในวงจรเรียงกระแสเมื่อก่อนติดตั้งวงจรกรอง (ซึ่งมีขนาดใหญ่ทำให้กระแสที่ไหลผ่านมีขนาดเล็ก) ทำให้กระแสเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นจะว่าวงจรสมมูลในรูปที่ 2.9 สามารถใช้อธิบายของโหลดแบบอินดักทีฟได้ แต่ไม่สามารถใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของวงจรเรียงกระแสที่เป็นโหลดแบบคาปาทีฟได้ ดังแสดงในตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 2.16 ระบบส่งจ่าย 3 เฟสมีโหลดแบบคาปาซีทีฟและมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน

การใช้วงจรกรองแอกทีฟแบบขนานเพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดคาปาซีทีฟดังแสดงในรูปที่ 2.16 พบว่าจะมีปัญหาเกิดขึ้นกล่าวคือพบว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของกระแสไหลหลังการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานดังแสดงในรูปที่ 2.17 จากปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าวงจรเรียงกระแสแบบคาปาซีทีฟมีพฤติกรรมเป็นแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกมากกว่าที่จะเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก [1] จึงทำให้เกิดปัญหาเมื่อใช้วงจรกรองแอกทีฟแบบขนานซึ่งถูกสร้างขึ้นสำหรับขจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นจะแทนโหลดชนิดวงจรเรียงกระแสด้วยวงจรสมมูลในการวิเคราะห์พฤติกรรม



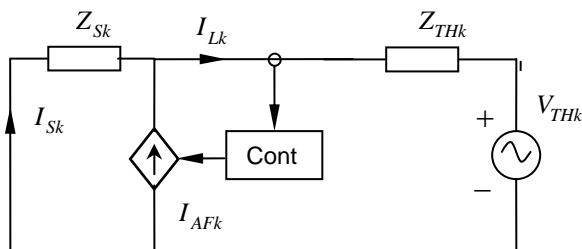
รูปที่ 2.17 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสไหลค กระแสด้านแหล่งจ่ายและกระแสที่วงจรกรอง ก่อนและหลังวงจรกรองทำงานจากการจำลองเชิงเวลา

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.18 จะได้ว่าก่อนติดตั้งวงจรกรองแยกที่ฟกระแสไหลคขึ้นอยู่กับขนาดของอิมพีแดนซ์ด้านแหล่งจ่ายและอิมพีแดนซ์สมมูลซึ่งมีขนาดเล็ก [1],[3]

$$I_{Lk} = I_{Sk} = -\frac{V_{THk}}{Z_{THk} + Z_{Sk}} \quad (2.7)$$

แต่เมื่อติดตั้งวงจรกรองแล้วกระแสไหลคจะเป็นตามสมการที่ (2.8)

$$I_{Lk} = -\frac{V_{THk}}{Z_{THk}} \quad (2.8)$$



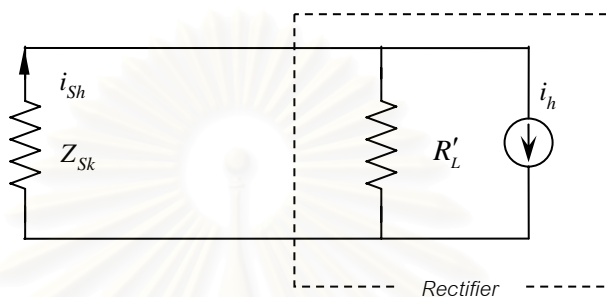
รูปที่ 2.18 วงจรสมมูลขององค์ประกอบฮาร์มอนิกของเมื่อติดตั้งวงจรกรอง

จากสมการที่ (2.8) จะเห็นว่าหลังจากติดตั้งวงจรกรองแยกที่ฟแบบขนานกระแสไหลดจะถูกควบคุมด้วยอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{THk} เท่านั้น ดังนั้นค่าของอิมพีแดนซ์สมมูลจึงมีความสำคัญมากในการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ เนื่องจากอิมพีแดนซ์สมมูลในสมการที่ (2.8) เป็นจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นนอกจากขนาดและเฟสของอิมพีแดนซ์สมมูลแล้วผลตอบสนองทางความถี่ของตัวอิมพีแดนซ์เองก็มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน ซึ่งงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาแล้วยังคงคลุมเครือในเรื่องนี้ นอกจากนี้ยังขาดการกล่าวถึงการเชื่อมร่วมกันระหว่างความถี่ฮาร์มอนิกอีกด้วย ซึ่งจะทำให้วงจรมูลในแต่ละความถี่ไม่เป็นอิสระต่อกัน ส่วนค่าขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกนั้นงานวิจัยในอดีตได้กล่าวถึงเอาไว้เล็กน้อยและถือว่าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่มีขนาดคงที่ อย่างไรก็ตามงานวิจัยในระยะหลัง [7] พบว่าขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกมีความไว (Sensitive) ต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันและกระแสภายนอก และมีการนำเสนอการหาแบบจำลองในโดเมนความถี่ของวงจรเรียงกระแสที่มีทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ ทำให้สามารถระบุพฤติกรรมของวงจรเรียงกระแสได้ละเอียดมากขึ้น มีการกล่าวถึงผลกระทบจากการเชื่อมร่วมทางความถี่ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่สำคัญของวงจรเรียงกระแส ทำให้สามารถใช้ในการหาผลตอบสนองของวงจรเรียงกระแสได้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่นำเสนอขึ้นส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสแบบ 1 เฟสและไม่มีการนำเสนอเป็นวงจรมูล

งานวิจัยที่เสนอแนวคิดในการคำนวณกระแสของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอด [5],[6] ได้นำเสนอแนวคิดการใช้ฟังก์ชันการสวิตช์และทฤษฎีการมอดูเลตในการคำนวณค่าของกระแสไฟสลับทั้ง 3 เฟสทำให้สามารถหาผลตอบสนองของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสในสภาวะคงตัวได้ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของวงจรเรียงกระแสได้ เนื่องจากเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความยุ่งยากในการนำไปใช้งาน ทำให้ไม่สามารถชี้ให้เห็นพฤติกรรมการเชื่อมร่วมทางความถี่ได้ และไม่มีการนำเสนอเป็นวงจรมูล

นอกจากนี้งานวิจัยที่นำเสนอแบบจำลองของวงจรมูลของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอดที่มีทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ [10] งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวงจรมูลดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งวงจรมูลนี้มีความชัดเจนในส่วนขององค์ประกอบวงจรมูล ความต้านทานสมมูลและแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก สามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (2.9) และ (2.10) แต่วงจรมูลนี้มีข้อจำกัดด้านโครงสร้างของวงจร จะเห็นว่าค่าของความต้านทานสมมูล และแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของวงจรด้านไฟสลับด้วย

เมื่อวงจรด้านไฟสลับมีความซับซ้อนมากขึ้น เช่นเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า จะทำให้ไม่สามารถกำหนดค่าที่แน่นอนของความต้านทานสมมูล และแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกได้ และวงจรสมมูลนี้สามารถใช้ได้เฉพาะกับวงจรเรียงกระแสที่เป็นโหลดความต้านทานที่ไม่มีวงจรกรองด้านไฟตรง เนื่องจากการใช้งานค่อนข้างมีข้อจำกัดด้านโครงสร้างวงจร ไม่มีความหลากหลาย ทำให้ไม่สามารถใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโหลดแบบอินดักทีฟ และโหลดแบบคาปาซิทีฟได้



รูปที่ 2.19 วงจรสมมูลขององค์ประกอบฮาร์มอนิก

$$R'_L = \frac{1}{1 + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}} \left(R_L + \left(1 - \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} r \right) \right) \quad (2.9)$$

$$i_h = \frac{-(r + R'_L)}{R'_L} \frac{3\sqrt{2}V_s}{2\pi(2r + R_L)} \left(-\frac{1}{2} \cos 5\omega t + \frac{1}{4} \cos 7\omega t + \dots \right) \quad (2.10)$$

โดยที่ R_L คือความต้านทานด้านไฟตรง

r คือความต้านทานด้านแหล่งจ่าย

จากงานวิจัยในอดีตพบว่า ยังคงมีข้อจำกัดหลายประการในการนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของวงจรเรียงกระแสเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของการมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างโหลดชนิดวงจรเรียงกระแส วงจรกรอง และระบบส่งจ่ายจำเป็นต้องใช้แบบจำลองที่มีความละเอียดเพื่อสะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริงของวงจรเรียงกระแสให้มากที่สุด

บทที่ 3

แบบจำลองในโดเมนความถี่ของวงจรเรียงกระแส 3 เฟส

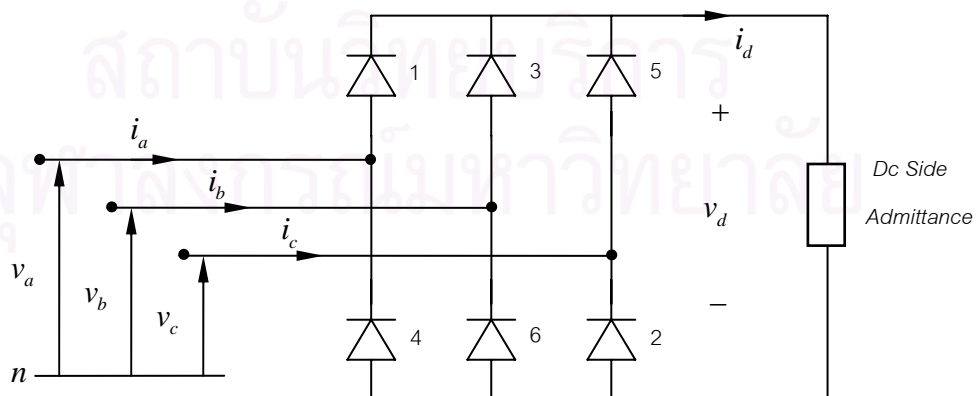
การหาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสคือการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส ซึ่งมีรูปแบบอยู่ 2 แบบ แบบแรกคือการกำหนดให้ตัวแปรด้านเข้าของแบบจำลองเป็นเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟสลับ $[v_\phi]$ และกำหนดให้ตัวแปรด้านออกของแบบจำลองเป็นเวกเตอร์ของกระแสไฟฟสลับ $[i_\phi]$ การทำแบบนี้จะทำให้ได้วงจรเรียงกระแส 3 เฟสอยู่ในรูปของแอดมิแตนซ์ด้านไฟฟสลับ Y_{load} ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

$$[i_\phi] = Y_{load} [v_\phi] \quad (3.1)$$

อีกแบบหนึ่งคือการกำหนดให้ตัวแปรด้านเข้าของแบบจำลองเป็นเวกเตอร์ของกระแสไฟฟสลับ $[i_\phi]$ และกำหนดให้ตัวแปรด้านออกของแบบจำลองเป็นเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟสลับ $[v_\phi]$ การทำแบบนี้จะทำให้ได้วงจรเรียงกระแส 3 เฟสอยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์ด้านไฟฟสลับ Z_{load} ดังแสดงในสมการที่ (3.2)

$$[v_\phi] = Z_{load} [i_\phi] \quad (3.2)$$

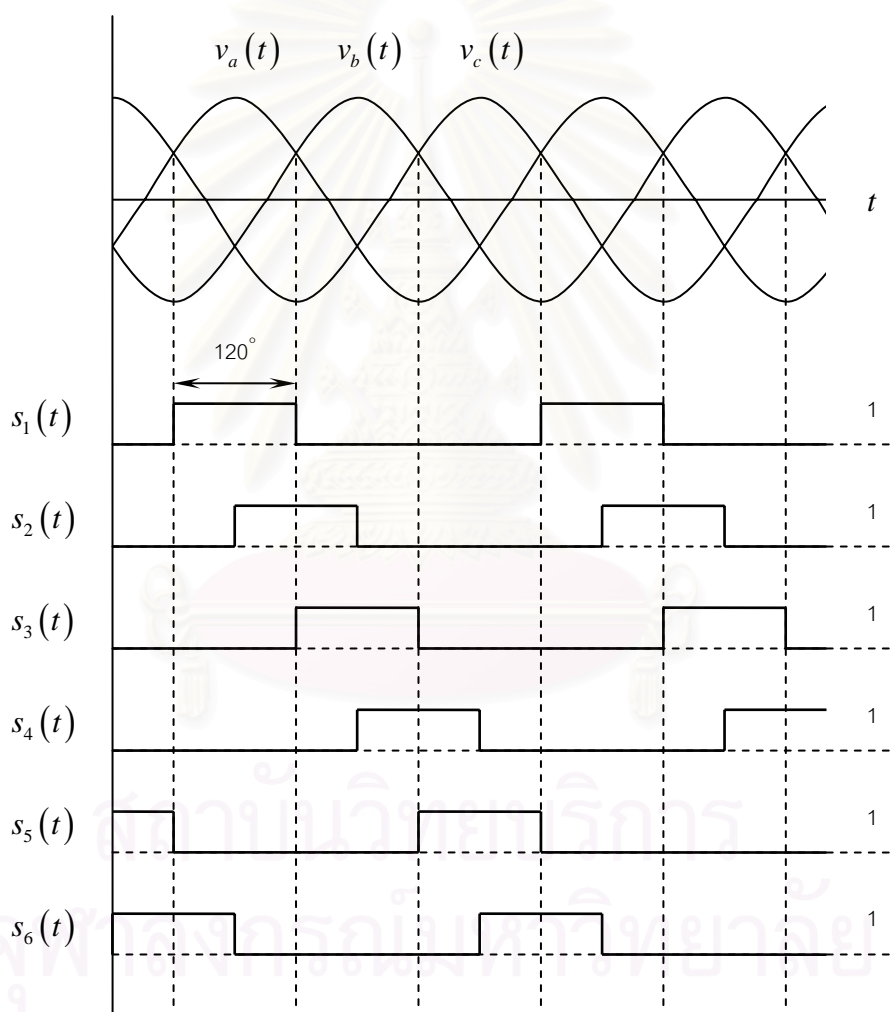
การเลือกใช้วิธีการแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับโครงสร้างของวงจร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการหาแบบจำลองทั้ง 2 แบบและจะชี้ให้เห็นความแตกต่างและข้อดีข้อเสียของแบบจำลองแต่ละแบบ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการนำแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสไปวิเคราะห์ปัญหาทางฮาร์มอนิก ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการอธิบายถึงพฤติกรรมของสัญญาณในระบบจะทำการแปลงแบบจำลองที่ได้ให้ไปอยู่บนโดเมนความถี่ (Frequency Domain) [6],[7]



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของวงจรเรียงกระแส 3 เฟส แบบไดโอด

วงจรเรียงกระแส 3 เฟสในรูปที่ 3.1 เป็นวงจรแปลงผันที่อาศัยการทำงานของสวิตช์ไดโอดส่งผลให้มีพฤติกรรมที่ไม่เชิงเส้นซึ่งอาจจะพิจารณาว่าเป็นวงจรเชิงเส้นที่มีลักษณะทางพลวัตแปรผันกับเวลา (Linear Time Varying) ก็ได้ โดยลักษณะของวงจรจะแปรผันกับเวลาในลักษณะระยาคาบ (Periodic) สัมพันธ์กับการทำงานของสวิตช์ ดังนั้นในการพัฒนาแบบจำลองในที่นี้เราจะใช้ฟังก์ชันการสวิตช์ (Switching Function) [5],[6],[7] และทฤษฎีการมอดูเลต (Modulation) ในการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของสัญญาณทางด้านไฟตรงกับทางด้านไฟสลับ เพื่อให้ได้มาซึ่งความสัมพันธ์ที่เป็นแบบจำลองของวงจรเรียงกระแส

ฟังก์ชันการสวิตช์



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอด

หน้าที่ของวงจรเรียงกระแสที่แสดงในรูปที่ 3.1 คือการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณด้านเข้า (50 Hz) ไปเป็นไฟกระแสตรง (0 Hz) การจะทำแบบนี้ได้จะอาศัยการทำงานของสวิตช์ (ไดโอด) โดยการเปิด-ปิดวงจรของไดโอดแต่ละตัวจะเป็นลำดับ ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟสลับและแรงดันไฟตรงทำให้ไดโอดมีลักษณะเป็นสัญญาณระยาคาบตามแรงดันไฟสลับดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเราเรียกว่าฟังก์ชันการสวิตช์ โดยฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดแต่

ละตัว s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 และ s_6 จะมีค่าเป็นหนึ่งซึ่งแทนช่วงเวลาขณะที่ไดโอดปิดวงจรและจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อไดโอดเปิดวงจร ในวิทยานิพนธ์นี้เราจะพิจารณาเฉพาะกรณีการทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่องซึ่งช่วงเวลาปิดวงจรแต่ละครั้งจะนานเป็นหนึ่งในหกของคาบเวลาการทำงาน อย่างไรก็ตามเราสามารถหาฟังก์ชันการสวิตช์ของแต่ละเฟส s_a, s_b, s_c ได้จากฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดแต่ละตัว โดยแสดงความสัมพันธ์ที่ได้ในสมการที่ (3.3) ถึง (3.5) ซึ่งฟังก์ชันการสวิตช์ของแต่ละเฟสนี้จะนำไปใช้ในการหาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสทั้ง 2 แบบ

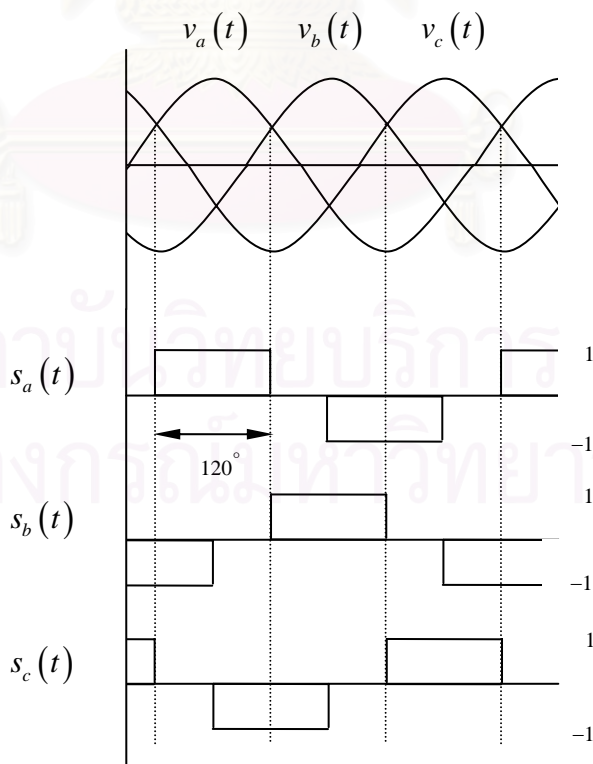
$$s_a(t) = s_1(t) - s_4(t) \quad (3.3)$$

$$s_b(t) = s_3(t) - s_6(t) \quad (3.4)$$

$$s_c(t) = s_5(t) - s_2(t) \quad (3.5)$$

3.1 การหาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสแบบแอดมิตแทนซ์

เริ่มต้นการหาแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ด้วยการมอดูเลตสัญญาณแรงดันไฟสลับ ($v_a(t), v_b(t), v_c(t)$) ซึ่งเป็นสัญญาณด้านเข้าของแบบจำลองกับฟังก์ชันการสวิตช์แต่ละเฟสที่แสดงในรูปที่ 3.3 ไปเป็นสัญญาณแรงดันไฟตรง ($v_d(t)$) ทางด้านไฟตรง ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันการสวิตช์สัญญาณแรงดันไฟสลับและสัญญาณแรงดันด้านไฟตรง จึงแสดงได้ดังสมการที่ (3.6)



รูปที่ 3.3 สัญญาณแรงดันด้านเข้าและฟังก์ชันการสวิตช์

$$v_d(t) = s_a(t)v_a(t) + s_b(t)v_b(t) + s_c(t)v_c(t) \quad (3.6)$$

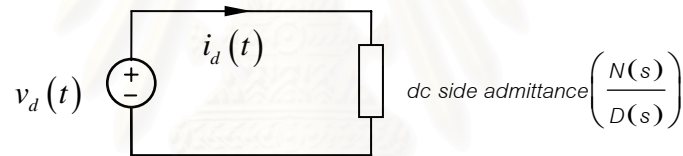
กำหนดให้ $[S_\phi] = [s_a \ s_b \ s_c]^T$ และ $[v_\phi] = [v_a \ v_b \ v_c]^T$ จากสมการที่ (3.6) จึงแสดงเชิงเวกเตอร์ได้เป็น

$$v_d = [S_\phi]^T [v_\phi] \quad (3.7)$$

สัญญาณแรงดัน $v_d(t)$ ในสมการที่ (3.7) จะทำให้เกิดกระแส $i_d(t)$ ซึ่งคำนวณได้จากค่าแอดมิตแทนซ์ทางด้านไฟตรง $N(s)/D(s)$ แสดงในรูปที่ 3.4 และสมการที่ (3.8)

$$i_d(s) = \frac{N(s)}{D(s)} v_d(s) \quad (3.8)$$

โดยที่ $\frac{N(s)}{D(s)} = \frac{n_0 + n_1s + n_2s^2 + \dots}{d_0 + d_1s + d_2s^2 + \dots}$ เป็นผลการแปลงลาปลาซของฟังก์ชันอินยัย $\frac{i_d}{v_d}$



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสด้านไฟตรงสำหรับแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์

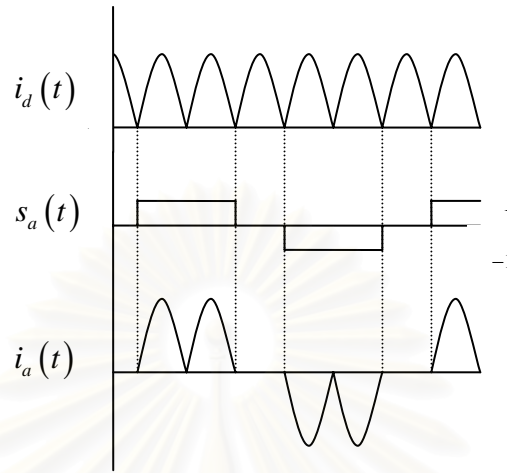
กระแสไฟตรง $i_d(t)$ ทางด้านไฟตรงจะถูกมอดูเลตกลับไปทางด้านไฟสลับผ่านฟังก์ชันการสวิตช์ กลายเป็นกระแสไฟสลับทางด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสแสดงตัวอย่างการหาสัญญาณกระแสไฟสลับในรูปที่ 3.5 และมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.9)

$$[i_\phi] = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_a(t) \\ s_b(t) \\ s_c(t) \end{bmatrix} i_d(t) \quad (3.9)$$

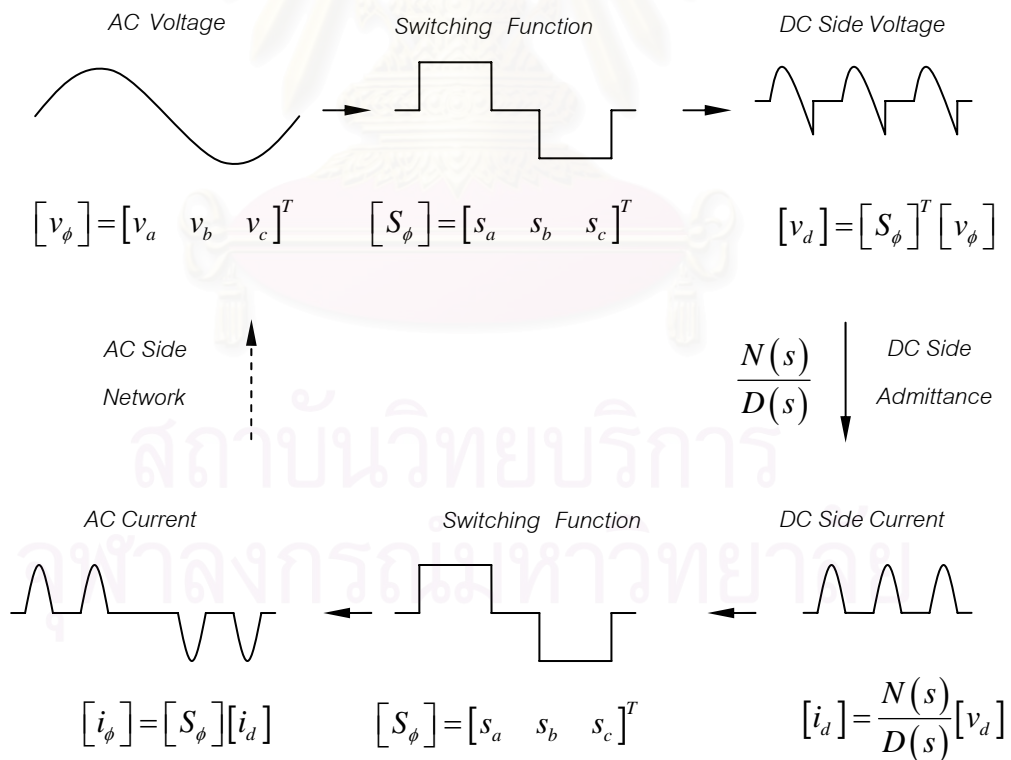
ความสัมพันธ์ของสัญญาณแรงดันและกระแสในวงจรเรียงกระแส 3 เฟสที่แสดงในสมการที่ (3.6)-(3.9) นำไปใช้หาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสในโดเมนความถี่ได้ โดยมีข้อกำหนดว่า

- (1) ลักษณะสัญญาณแรงดันและกระแสทั้ง 3 เฟสมีรูปร่างเหมือนกันเพียงแต่มุมเฟสต่างกัน 120° เท่านั้น
- (2) กระแส i_d มีความต่อเนื่อง

- (3) ผลที่เกิดจากการเหลื่อมกันของกระแสสามารถละเลยได้
- (4) ฟังก์ชันการสวิตช์จะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะมุมเริ่มนำกระแสเท่านั้นโดยมีรูปร่างเหมือนเดิม



รูปที่ 3.5 สัญญาณกระแสไฟสลับเฟส a ที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณไฟตรงกับฟังก์ชันการสวิตช์เฟส a



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงแนวคิดและกระบวนการในการหาแบบจำลองวงจรรีจิงกระแสแบบแอดมิตแทนซ์

รูปที่ 3.6 เป็นแผนภาพสรุปกระบวนการทั้งหมดของการหาแบบจำลองตั้งแต่แรงดันไฟสลับด้านเข้าจนได้กระแสไฟสลับที่ด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส จากแผนภาพนี้สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันทางด้านไฟสลับได้เป็นสมการที่ (3.10)

$$[i_\phi] = [S_\phi] \frac{N(s)}{D(s)} [S_\phi]^T [v_\phi] \quad (3.10)$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงเปลี่ยนปริมาณ 3 เฟสเป็นปริมาณสเปซเวกเตอร์โดยใช้เมตริกซ์การแปลง T ดังนิยามดังต่อไปนี้

นิยามสเปซเวกเตอร์

$$[i_{ac}] = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T [i_\phi], \quad [v_{ac}] = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T [v_\phi]$$

โดยที่

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad T'' = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

$$T' = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad T'^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

จากนิยามข้างต้นและสมการที่ (3.10) จะได้ว่า

$$[i_{ac}] = T [i_\phi] = T [S_\phi] \frac{N(s)}{D(s)} [S_\phi]^T T'^{-1} T' [v_\phi]$$

$$[i_{ac}] = T [S_\phi] \frac{N(s)}{D(s)} [S_\phi]^T T'' [v_{ac}]$$

(3.11)

$$[i_{ac}] = \frac{2}{3} [S] \frac{N(s)}{D(s)} [S]^T [v_{ac}]$$

โดยที่ $[S] = T [S_\phi]$

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์เชิงความถี่เราจะแปลงปริมาณสเปซเวกเตอร์องค์ประกอบ $\alpha\beta$ ไปเป็นปริมาณสเปซเวกเตอร์ในรูปจำนวนเชิงซ้อน 2 องค์ประกอบ โดยใช้เมตริกซ์การแปลง C_f (Forward-Backward Transformation Matrix) ดังนิยามต่อไปนี้

นิยาม

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i^+ \\ i^- \end{bmatrix} &= C_f [i_{ac}] = \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} v^+ \\ v^- \end{bmatrix} &= C_f [v_{ac}] = \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} S^+ \\ S^- \end{bmatrix} &= C_f [S] = \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} \end{aligned}$$

โดยที่

$$C_f = \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix}, \quad C_f^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix}$$

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.11) ซึ่งเป็นปริมาณในองค์ประกอบ $\alpha\beta$ เมื่อทำการแปลงด้วย C_f จะได้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.13) ซึ่งเป็นปริมาณจำนวนเชิงซ้อน 2 องค์ประกอบ

$$C_f [i_{ac}] = \frac{2}{3} C_f [S] \frac{N(s)}{D(s)} [S]^T C_f^{-1} C_f [v_{ac}] \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} i^+ \\ i^- \end{bmatrix} = \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{1}{2}\right) \begin{bmatrix} S^+ \\ S^- \end{bmatrix} \frac{N(s)}{D(s)} \begin{bmatrix} S^+ \\ S^- \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} v^+ \\ v^- \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

โดยที่ * คือ Conjugated Transpose

เนื่องจากต้องการนำแบบจำลองที่ได้ในสมการที่ (3.13) ไปใช้วิเคราะห์ปัญหาทางฮาร์มอนิก ดังนั้นในการคำนวณจะแปลงสัญญาณไปอยู่ในรูปของอนุกรมฟูริเยร์ ในที่นี้เรากำหนดให้สัญญาณของฟังก์ชันการสวิตช์ในรูปที่ 3.3 แสดงในรูปของอนุกรมฟูริเยร์ได้เป็น

$$s_a = \sum_{n=1,5,7,\dots}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (3.14)$$

$$s_b = \sum_{n=1,5,7,\dots}^{\infty} (A_n \cos n(\omega t - 120^\circ) + B_n \sin n(\omega t - 120^\circ)) \quad (3.15)$$

$$s_c = \sum_{n=1,5,7,\dots}^{\infty} (A_n \cos n(\omega t + 120^\circ) + B_n \sin n(\omega t + 120^\circ)) \quad (3.16)$$

และเมื่อแปลงเป็นสเปซเวกเตอร์จากความสัมพันธ์ $[S] = T[S_\phi]$ จะได้

$$[S] = \sum_{n=1,-5,7,-11,\dots} \frac{3}{2} \begin{bmatrix} A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t \\ A_n \sin n\omega t - B_n \cos n\omega t \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$[S^+ \ S^-]^T$ สามารถคำนวณจาก $[S]$ ในสมการที่ (3.17) ได้เป็น

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} S^+ \\ S^- \end{bmatrix} &= \sum_{n=1,-5,7,-11,\dots} \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t \\ A_n \sin n\omega t - B_n \cos n\omega t \end{bmatrix} \\ &= \sum_{n=1,-5,7,-11,\dots} 3 \begin{bmatrix} C_n e^{jn\omega t} \\ C_n^* e^{-jn\omega t} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\text{โดยที่ } C_n = \frac{A_n - jB_n}{2}$$

จากสมการที่ (3.13) และ (3.18) จะได้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i^+ \\ i^- \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \sum_n 3 \begin{bmatrix} C_n e^{jn\omega t} \\ C_n^* e^{-jn\omega t} \end{bmatrix} \frac{N(s)}{D(s)} \sum_m 3 \begin{bmatrix} C_m^* e^{-jm\omega t} & C_m e^{jm\omega t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^+ \\ v^- \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{3} \sum_n 3 \begin{bmatrix} C_n e^{jn\omega t} \\ C_n^* e^{-jn\omega t} \end{bmatrix} \sum_m 3 \begin{bmatrix} C_m^* e^{-jm\omega t} & C_m e^{jm\omega t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{N(s-jm\omega)}{D(s-jm\omega)} & 0 \\ 0 & \frac{N(s+jm\omega)}{D(s+jm\omega)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^+ \\ v^- \end{bmatrix} \\ &= 3 \sum_n \sum_m \begin{bmatrix} C_n C_m^* e^{j(n-m)\omega t} & C_n C_m e^{j(n+m)\omega t} \\ C_n^* C_m^* e^{-j(n+m)\omega t} & C_n^* C_m e^{-j(n-m)\omega t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{N(s-jm\omega)}{D(s-jm\omega)} & 0 \\ 0 & \frac{N(s+jm\omega)}{D(s+jm\omega)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^+ \\ v^- \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.19)$$

จากสมการที่ (3.19) จะพบว่า i^+ และ i^- เป็นคอนจูเกต (Conjugate) กัน เพราะฉะนั้นจะพิจารณาเฉพาะ i^+ เท่านั้นซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ (3.20)

สมการที่ (3.20) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแส 3 เฟส ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันทางด้านไฟสลับในโดเมนความถี่

$$i^+ = 3 \left[\sum_n \sum_m C_n C_m^* e^{j(n-m)\omega t} \frac{N(s-jm\omega)}{D(s-jm\omega)} \quad \sum_n \sum_m C_n C_m e^{j(n+m)\omega t} \frac{N(s+jm\omega)}{D(s+jm\omega)} \right] \begin{bmatrix} v^+ \\ v^- \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

สังเกตว่าในสมการความสัมพันธ์มีเทอม $e^{j(n-m)\omega t}$ และ $e^{j(n+m)\omega t}$ ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากส่วนของระบบที่แปรผันกับเวลาในลักษณะของสัญญาณรายคาบ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวก็คือฟังก์ชันการสวิตช์นั่นเอง โดยบทบาทที่สำคัญของเทอม $e^{j(n-m)\omega t}$ และ $e^{j(n+m)\omega t}$ คือการเชื่อมร่วมความถี่ (Frequency Coupling) ระหว่างองค์ประกอบของแรงดัน v^+ กับองค์ประกอบของกระแส i^+ ทางด้านไฟสลับซึ่งเป็นสัญญาณด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส เพื่อดูผลการเชื่อมร่วมความถี่ที่เกิดขึ้นจึงแสดงตัวแปรด้านเข้าของแบบจำลองทั้ง v^+ และ v^- ให้อยู่ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ดังที่แสดงในสมการที่ (3.21) และ (3.22)

$$v^+ = \sum_k V_k e^{jk\omega t}; k = 1, -5, 7, -11, \dots \quad (3.21)$$

$$v^- = \sum_k V_k^* e^{-jk\omega t}; k = 1, -5, 7, -11, \dots \quad (3.22)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.21) และ (3.22) ลงในสมการ (3.20) จะได้ผลตอบสนองของแบบจำลองที่มีต่อตัวแปรด้านเข้าซึ่งเป็นแรงดันไฟสลับดังสมการที่ (3.23)

$$i^+ = 3 \sum_n \sum_m \sum_k C_n C_m^* V_k e^{j(n-m+k)\omega t} \frac{N(j(k-m)\omega)}{D(j(k-m)\omega)} + 3 \sum_n \sum_m \sum_k C_n C_m V_k^* e^{j(n+m-k)\omega t} \frac{N(j(m-k)\omega)}{D(j(m-k)\omega)} \quad (3.23)$$

สังเกตว่า i^+ สามารถแสดงเป็นผลรวมเชิงเส้น (Linear Combination) ของเทอม $\{e^{j(n-m+k)\omega t}; n, m, k = 1, -5, 7, \dots\}$ และ $\{e^{j(n+m-k)\omega t}; n, m, k = 1, -5, 7, \dots\}$ ได้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโดยทั่วไปแล้ว เนื่องจากความถี่ของกระแส i^+ ที่เกิดขึ้นนั้นจะถูกกำหนดด้วยความถี่ฮาร์มอนิกของแรงดัน $\{k\omega\}$ และความถี่ฮาร์มอนิกของฟังก์ชันการสวิตช์ $\{n\omega, m\omega\}$ ซึ่งเป็นเทอมสำคัญที่ทำให้ความถี่ของกระแสสามารถเกิดขึ้นได้หลากหลายและแตกต่างจากความถี่ของแรงดัน กระแสของวงจรเรียงกระแสในสภาวะคงตัวจะมีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากที่หลายความถี่แม้ว่าแหล่งจ่ายแรงดันจะไม่มีฮาร์มอนิกก็ตาม นอกจากนี้จากสมการที่ (3.23) สามารถสรุปได้ว่าขนาดและเฟสในแต่ละความถี่ฮาร์มอนิกของกระแส i^+ ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ของฟังก์ชันการสวิตช์ $\{C_n, C_m\}$, ค่าแอดมิตแทนซ์ $N(s)/D(s)$ และสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ของแรงดัน $\{V_k\}$

หากพิจารณากระแสและแรงดันเป็นสัญญาณรายคาบแสดงในรูปอนุกรมฟูรีเยร์ดังสมการที่ (3.24) และ (3.25)

$$v^+ = V_1 e^{j\omega t} + V_5 e^{-j5\omega t} + V_7 e^{j7\omega t} + V_{11} e^{-j11\omega t} + \dots \quad (3.24)$$

$$i^+ = I_1 e^{j\omega t} + I_5 e^{-j5\omega t} + I_7 e^{j7\omega t} + I_{11} e^{-j11\omega t} + \dots \quad (3.25)$$

เราสามารถแสดงแทนกระแส i^+ และแรงดัน v^+ ได้ด้วยเวกเตอร์องค์ประกอบฮาร์มอนิกดังสมการที่ (3.26) และ (3.27)

$$I = [I_1 \quad I_5 \quad I_7 \quad \dots]^T \quad (3.26)$$

$$V = [V_1 \quad V_5 \quad V_7 \quad \dots]^T \quad (3.27)$$

$$I = [Y_F \quad Y_B] \begin{bmatrix} V \\ V^* \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

โดยที่

$$Y_F = \begin{bmatrix} Y_{F1,1} & Y_{F1,5} & Y_{F1,7} & \dots \\ Y_{F5,1} & Y_{F5,5} & Y_{F5,7} & \dots \\ Y_{F7,1} & Y_{F7,5} & Y_{F7,7} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad Y_B = \begin{bmatrix} Y_{B1,1} & Y_{B1,5} & Y_{B1,7} & \dots \\ Y_{B5,1} & Y_{B5,5} & Y_{B5,7} & \dots \\ Y_{B7,1} & Y_{B7,5} & Y_{B7,7} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

สมการที่ (3.28) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์ของแรงดันกับกระแสซึ่งจะแสดงกลไกการเชื่อมร่วมความถี่ผ่านทางแอดมิตแทนซ์เมตริกซ์ Y_F และ Y_B โดยจากความสัมพันธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการหาผลตอบสนองของโหลดชนิดวงจรเรียงกระแส 3 เฟสในสภาวะคงตัวและสร้างวงจรสมมูล (Norton's Equivalent Circuit) เพื่อจะนำไปสู่การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาต่างๆในเชิงฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส

แอดมิตแทนซ์เมตริกซ์ในสมการที่ (3.28) เรียกอีกอย่างได้เป็นเมตริกซ์ฮอนย้ายเชิงฮาร์มอนิกของระบบ (Harmonic Transfer Function Matrices : HTFM) [8] Y_F และ Y_B หาได้จากแบบจำลอง โดยมีองค์ประกอบ $Y_{F(l,k)}$ และ $Y_{B(l,k)}$ ดังต่อไปนี้

$$Y_{F(l,k)} = \sum_m \sum_n 3C_n C_m^* \frac{N(-j(m-k)\omega)}{D(-j(m-k)\omega)} ; n-m+k=l \quad (3.29)$$

$$Y_{B(l,k)} = \sum_m \sum_n 3C_n C_m \frac{N(j(m-k)\omega)}{D(j(m-k)\omega)} ; n+m-k=l \quad (3.30)$$

จากแบบจำลองในโดเมนความถี่จะเห็นว่าแอดมิตแทนซ์เมตริกซ์ Y_F และ Y_B มีมิติเป็นอนันต์ทำให้เกิดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ผลการเชื่อมร่วมความถี่ของฮาร์มอนิกในอันดับที่สูงมากๆ ซึ่งปัญหานี้แก้ไขได้โดยการประมาณโดยการลดมิติของ Y_F และ Y_B ลง อย่างไรก็ตามเนื่องจากการคำนวณกระแสเราจะให้ความสำคัญกับฮาร์มอนิกในลำดับที่ 5 และ 7 มากกว่าลำดับสูงๆเพราะว่าฮาร์มอนิกในลำดับแรกๆนี้มีขนาดสูงพอที่จะส่งผลหรือสร้างปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นจึงมุ่งประเด็นไปที่การคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในลำดับแรกๆ แทนที่จะเป็นทุกลำดับ

ในรูปที่ 3.6 ที่ใช้พัฒนาแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ซึ่งแสดงกระบวนการคำนวณและความสัมพันธ์ของสัญญาณต่างๆ ในวงจรเรียงกระแส จะเห็นว่าแรงดันของวงจรด้านไฟสลับจะเป็นตัวกำหนดแรงดันของวงจรทางด้านไฟตรงโดยการมอดูเลตแรงดันไฟสลับกับฟังก์ชันการสวิตช์ ในทางกลับกันกระแสของวงจรทางด้านไฟตรงจะเป็นตัวกำหนดกระแสของวงจรด้านไฟสลับ ดังนั้นธรรมชาติของโหลดด้านไฟตรงที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์วงจรด้านไฟตรงจึงควรมีลักษณะสมบัติเป็นกึ่งกระแส และวงจรด้านไฟสลับด้านเข้าควรมีลักษณะสมบัติเป็นกึ่งแรงดัน ทำให้วงจรเรียงกระแสที่เหมาะสมที่จะใช้แบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ในการอธิบายพฤติกรรมควรมีโครงสร้างตามที่กล่าวมา ข้อกำหนดด้านโครงสร้างของวงจรเรียงกระแสจะส่งผลกระทบต่อการประมาณค่าแอดมิตแทนซ์เมตริกซ์ของแบบจำลอง พิจารณาสมการที่ (3.26) และ (3.27) จะเห็นว่าอัตราขยายของสมาชิกแต่ละตัวของ Y_F และ Y_B จะถูกกำหนดด้วยอัตราขยายของแอดมิตแทนซ์ด้านไฟตรง ($N(s)/D(s)$) และอัตราขยายของแอดมิตแทนซ์ด้านไฟตรงนี้จะมีแปรผกผันกับความถี่เมื่อโครงสร้างด้านไฟตรงมีตัวจากตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ที่แสดงถึงลักษณะความเป็นกึ่งกระแสต่ออนุกรมอยู่ ทำให้แรงดันไฟสลับที่มีความถี่สูงมีผลต่อกระแสไฟสลับน้อยมากจนสามารถละเลยได้ ส่งผลให้มีความเป็นไปได้ในการประมาณโดยการลดมิติของ Y_F และ Y_B ทำให้แบบจำลองมีมิติต่ำ

ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของแอดมิตแทนซ์เมตริกซ์ Y_F และ Y_B คือมุมเฟสของสมาชิกแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงตามมุมเฟสของมุมเริ่มนำกระแสของไดโอด โดยมุมนี้จะถูกกำหนดและเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันไฟสลับและค่าแรงดันไฟตรงดังนั้นจึงเกิดความยุ่งยากในการกำหนดค่าที่แน่นอน ในการใช้แบบจำลองเพื่อการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในระบบจึงประสบกับปัญหาเรื่องความไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองเนื่องจากจุดทำงานของแบบจำลองเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณด้านเข้า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณามุมเฟสที่เปลี่ยนไปของสมาชิกของ Y_F และ Y_B ในสมการที่ (3.31) และ (3.32) ตามลำดับ โดยที่ $Y_{F(l,k)}^0$ และ $Y_{B(l,k)}^0$ หมายถึงค่าเดิมก่อนการเปลี่ยนแปลงมุมเฟส

$$Y_{F(l,k)} = Y_{F(l,k)}^0 e^{j(l-k)\Delta\theta} \quad (3.31)$$

$$Y_{B(l,k)} = Y_{B(l,k)}^0 e^{j(l+k)\Delta\theta} \quad (3.32)$$

จะพบว่าผลกระทบที่สมาชิกของ Y_F และ Y_B แต่ละเทอมได้รับจากการเปลี่ยนแปลงของมุมเริ่มนำกระแสของไดโอด $\Delta\theta$ ขึ้นอยู่กับตัวคูณ $(l-k)$ และ $(l+k)$ ซึ่งในกรณีที่เราสนใจกระแสในความถี่ต่ำ (l มีค่าน้อย) ผลกระทบที่สมาชิกของ Y_F และ Y_B แต่ละเทอมได้รับจะแปรตามความถี่ของแรงดัน กล่าวคือถ้ากระแสในความถี่ต่ำขึ้นอยู่กับแรงดันที่ความถี่ต่ำ (k มีค่าน้อย) จะทำให้ตัวคูณของความเปลี่ยนแปลงมีขนาดเล็กส่งผลให้ผลกระทบที่ได้รับก็จะไม่มากทำให้สามารถละเลยได้ แต่ในกรณีที่กระแสในความถี่ต่ำขึ้นอยู่กับแรงดันที่ความถี่สูง (k มีค่ามาก) ด้วยจะทำให้ตัวคูณของความเปลี่ยนแปลงมีขนาดใหญ่ส่งผลให้ผลกระทบที่ได้รับก็จะมีค่ามาก

จากเหตุผลดังกล่าวถ้าเราเลือกใช้แบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์กับโครงสร้างของวงจรรวเข้าแบบกึ่งแรงดันจะทำให้สามารถละเลยผลของแรงดันที่ความถี่สูงได้ ส่งผลให้สามารถละเลยผลของการเปลี่ยนแปลงของมุมเริ่มนำกระแสได้ ทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้นต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่มีขนาดเล็ก แต่ถ้าเลือกใช้แบบจำลองที่ไม่เหมาะสมกับโครงสร้างของวงจรจะส่งผลให้ผลกระทบที่ได้รับก็จะมีค่าสูงและจำเป็นต้องทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้การประมาณจากอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series)



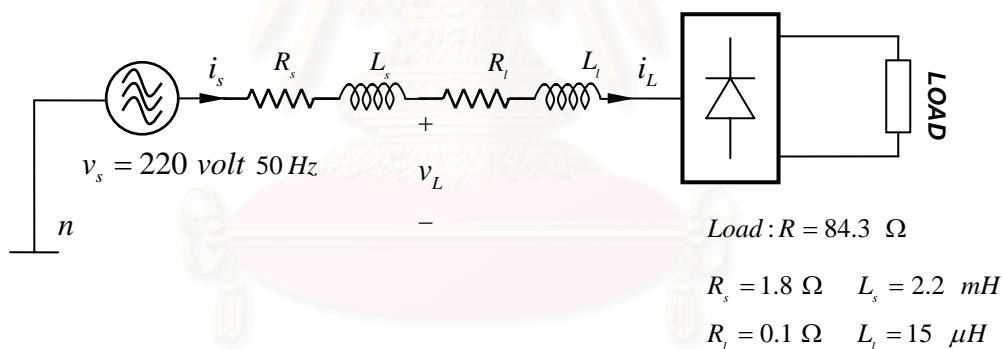
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2. ผลการทดสอบแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3.28) ในที่นี้เราจะกำหนดค่าสเปกตรัมของแรงดัน v^+ ให้กับแบบจำลองแล้วคำนวณหาค่าสเปกตรัมของกระแส i^+ และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองวงจรในเชิงเวลา (Time-Domain Simulation) นอกจากนี้จะทำการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ในการนำไปใช้เป็นแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสที่มีโครงสร้างด้านไฟตรงที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน 3 กรณีด้วย โดยพิจารณาจากจำนวนองค์ประกอบของแรงดันด้านเข้า V_L ที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณค่าของกระแส I_L ให้ได้ถูกต้อง ดังแสดงในสมการที่ (3.33)

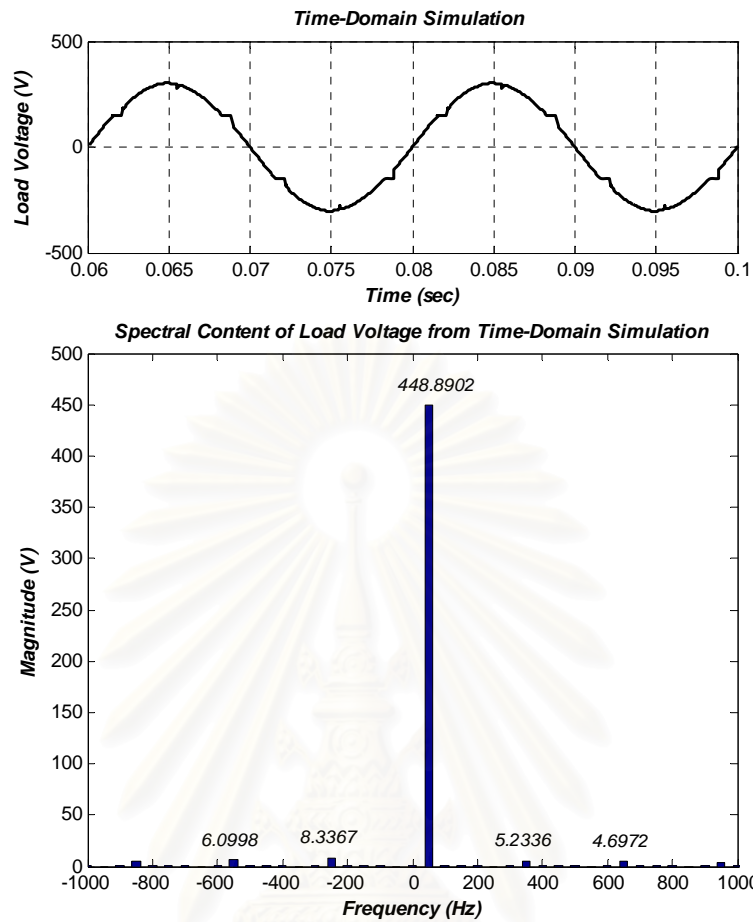
$$\begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L5} \\ \vdots \\ I_{L19} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{F1,1} & Y_{F1,5} & \cdots & Y_{F1,19} \\ Y_{F5,1} & Y_{F5,5} & \cdots & Y_{F5,19} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{F19,1} & Y_{F19,5} & \cdots & Y_{F19,19} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{L1} \\ V_{L5} \\ \vdots \\ V_{L19} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{B1,1} & Y_{B1,5} & \cdots & Y_{B1,19} \\ Y_{B5,1} & Y_{B5,5} & \cdots & Y_{B5,19} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{B19,1} & Y_{B19,5} & \cdots & Y_{B19,19} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{L1}^* \\ V_{L5}^* \\ \vdots \\ V_{L19}^* \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

กรณีที่ 1 ในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทาน

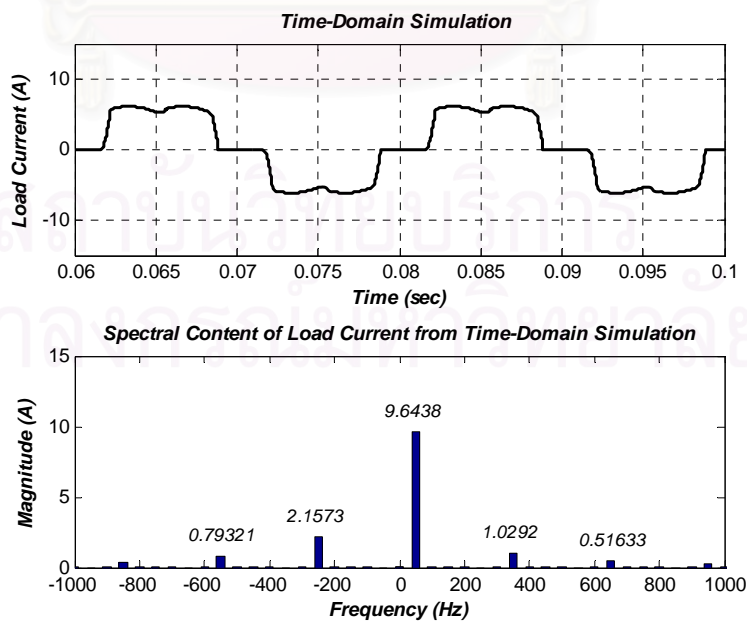


รูปที่ 3.7 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดซึ่งมีโหลดความต้านทาน

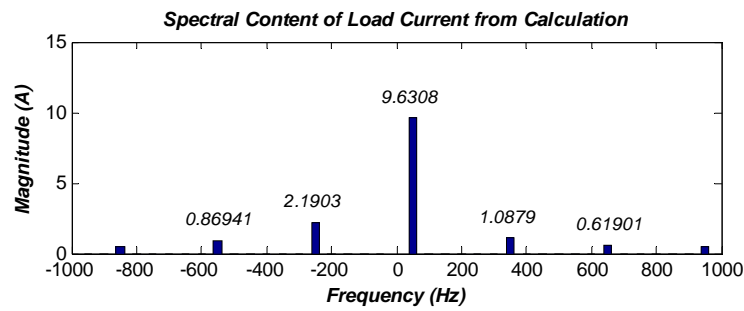
ในกรณีที่โครงสร้างด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสเป็นโหลดความต้านทานขนาด 84.3 โอห์ม จากการจำลองเชิงเวลาด้วยโปรแกรม MatLab แสดงผลของรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ได้ดังรูปที่ 3.8 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรด้านเข้าของสมการแบบจำลอง (3.33) ที่ต้องการทดสอบ ส่วนรูปคลื่นสัญญาณของกระแสเฟส i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาด้วยโปรแกรม MatLab แสดงในรูปที่ 3.9 เปรียบเทียบกับสเปกตรัมกระแส i_L^+ ในรูปที่ 3.10 ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ (3.33) จะพบว่าสอดคล้องกัน



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 3.7

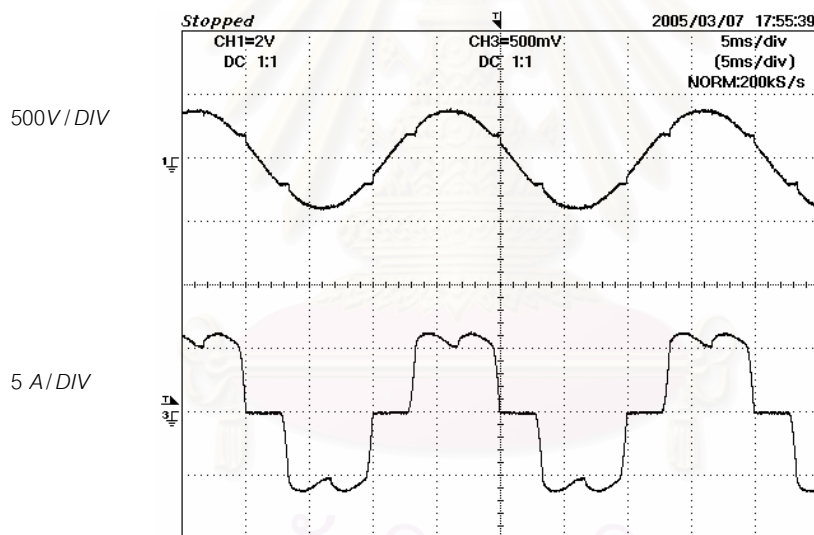


รูปที่ 3.9 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสเฟส i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 3.7

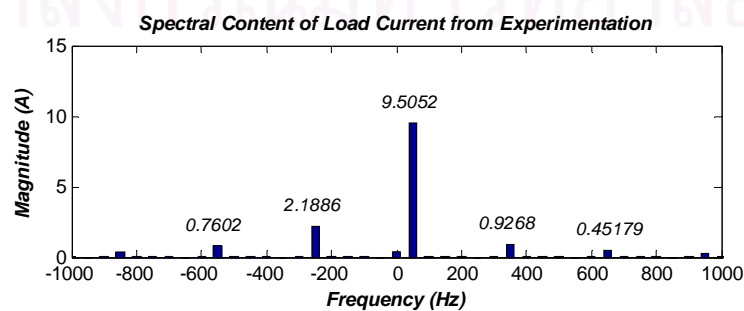


รูปที่ 3.10 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอของรูป 3.7

นอกจากนี้เพื่อยืนยันความถูกต้องในการนำไปใช้งานกับระบบจริง ได้ทำการเปรียบเทียบเพิ่มเติมกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสเฟสแสดงในรูปที่ 3.11 และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการทดลองแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณในรูปที่ 3.10 พบว่ามีความสอดคล้องเช่นกัน

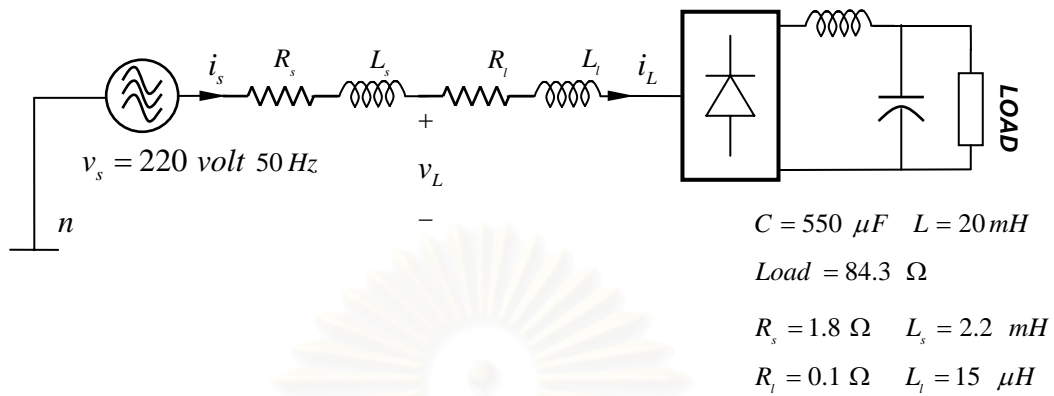


รูปที่ 3.11 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L จากการทดลองของรูป 3.7

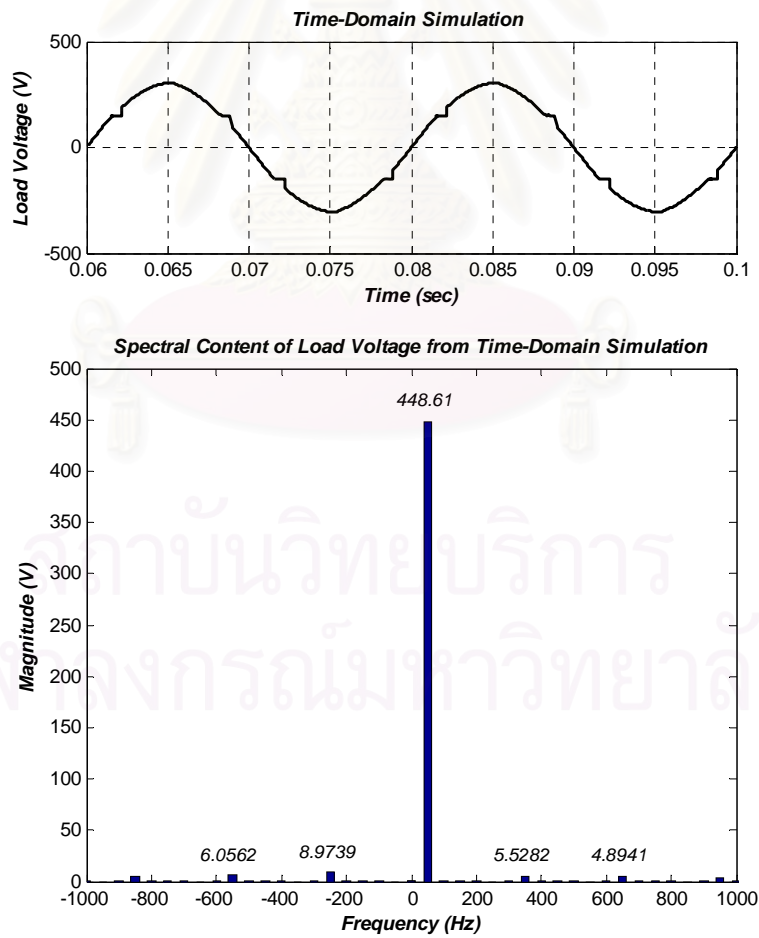


รูปที่ 3.12 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.7

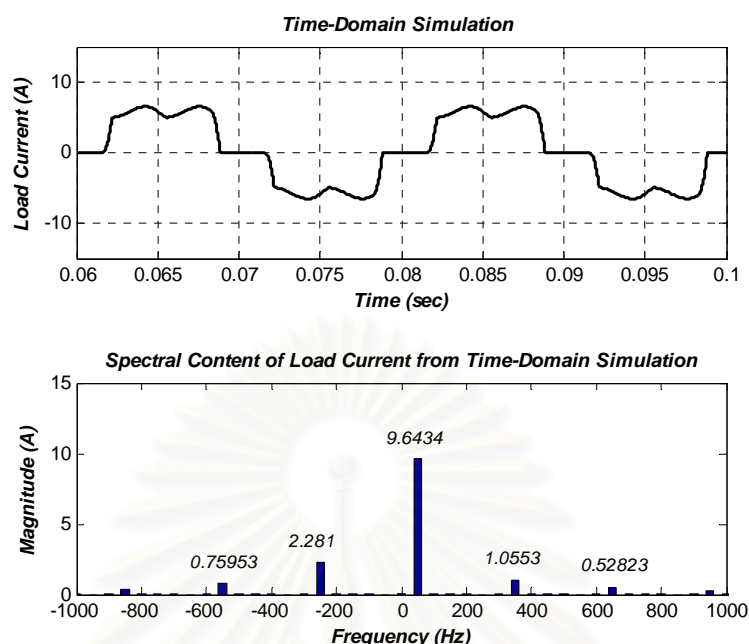
กรณีนี้ที่ 2 โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานและมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง



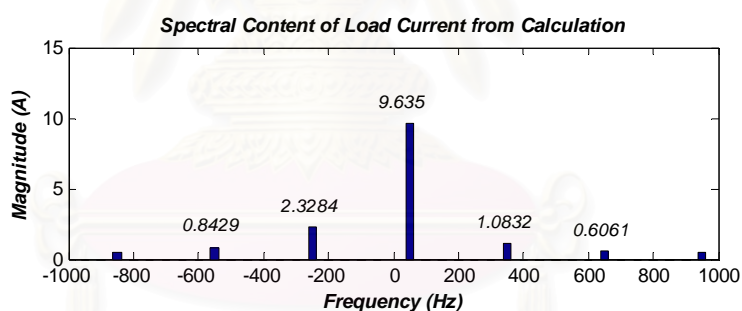
รูปที่ 3.13 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองต่อกับโหลดความต้านทาน



รูปที่ 3.14 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 3.13

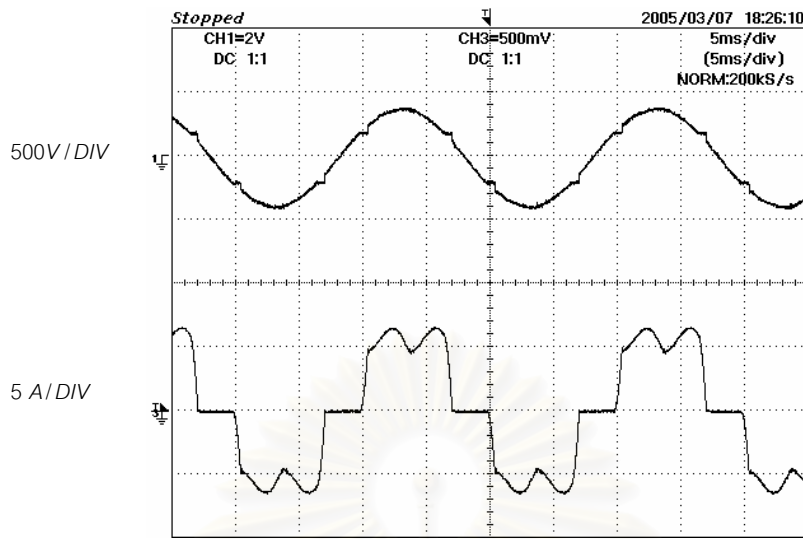


รูปที่ 3.15 รูปคลื่นสัญญาณของกระแส i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 3.13

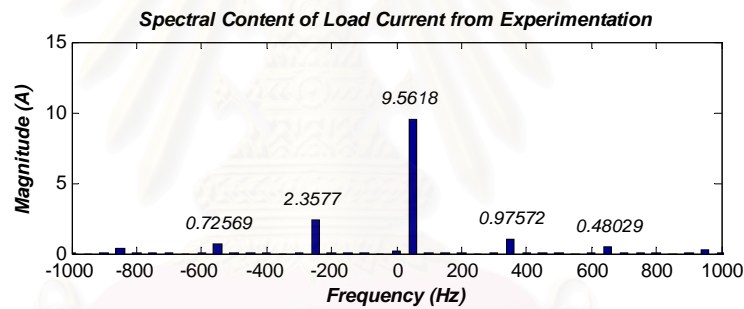


รูปที่ 3.16 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองของรูป 3.13

ในกรณีที่โครงสร้างด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสเป็นโหลดความต้านทานขนาด 84.3 โอห์มและมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 20 mH กับตัวเก็บประจุขนาด 550 μF เป็นวงจรกรอง จากการจำลองเชิงเวลาด้วยโปรแกรม MatLab แสดงผลของรูปคลื่นรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ได้ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งคงเดิมถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรด้านเข้าของสมการแบบจำลอง (3.33) ที่ต้องการทดสอบ ส่วนรูปคลื่นสัญญาณของกระแสเฟส i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาด้วยโปรแกรม MatLab แสดงในรูปที่ 3.15 เปรียบเทียบสเปกตรัมของกระแส i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาในรูปที่ 3.15 กับสเปกตรัมกระแส i_L^+ ในรูปที่ 3.16 ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ (3.33) จะพบว่าสอดคล้องกัน ในส่วนผลที่ได้จากการทดลอง โดยรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสเฟสแสดงในรูปที่ 3.17 และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการทดลองแสดงในรูปที่ 3.18 ซึ่งเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณในรูปที่ 3.16 พบว่ามีความสอดคล้องเช่นกัน

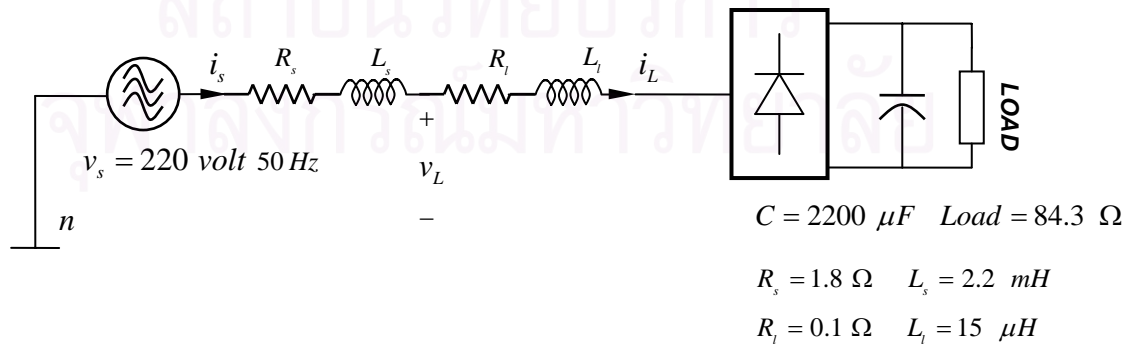


รูปที่ 3.17 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L จากการทดลองของรูป 3.13

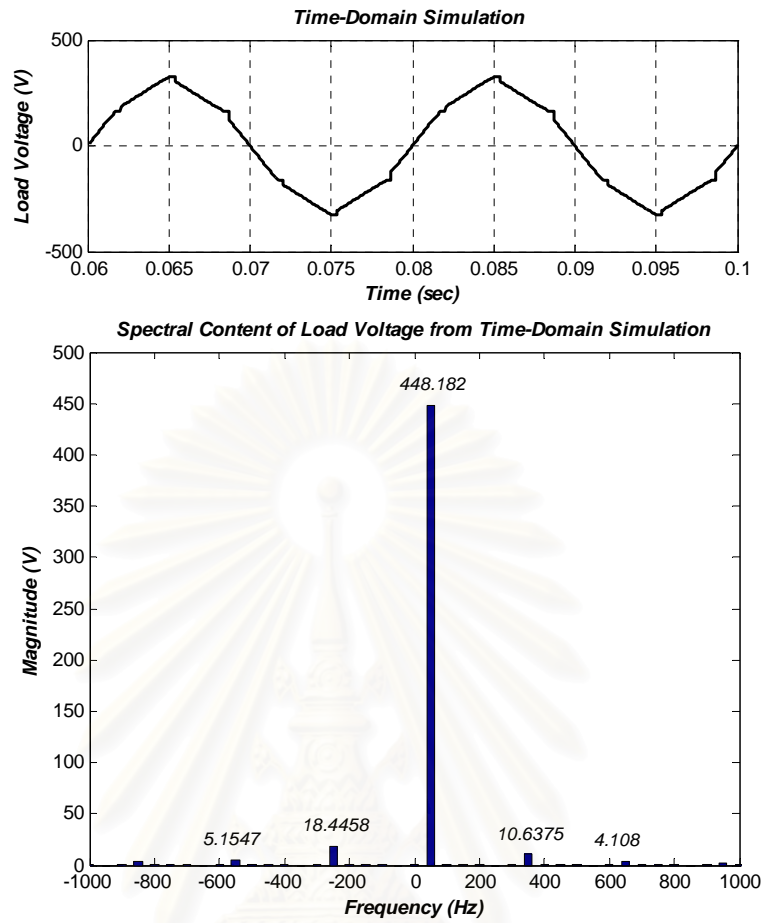


รูปที่ 3.18 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.13

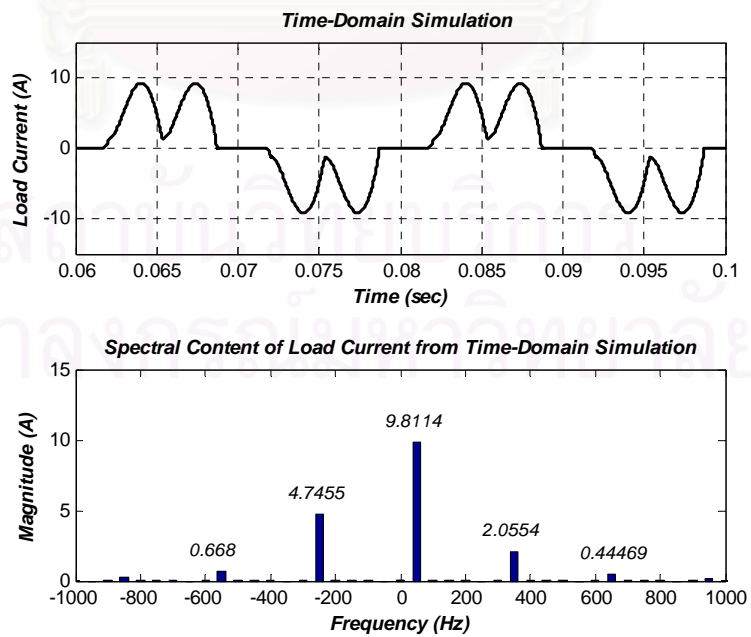
กรณีที่ 3 แหล่งจ่ายมีค่าอิมพีแดนซ์และโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานและตัวเก็บประจุ



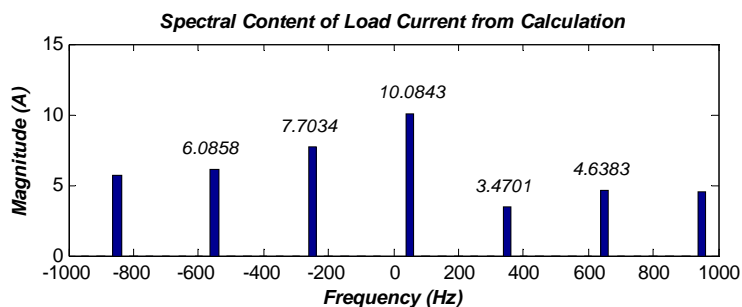
รูปที่ 3.19 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรรองต่อกับโหลดความต้านทาน



รูปที่ 3.20 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 3.19



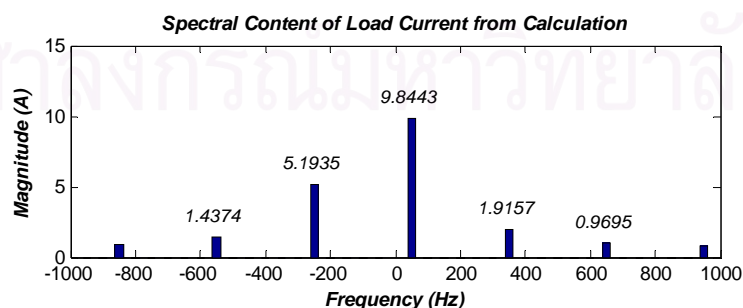
รูปที่ 3.21 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสเฟส i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 3.19



รูปที่ 3.22 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองของรูป 3.19

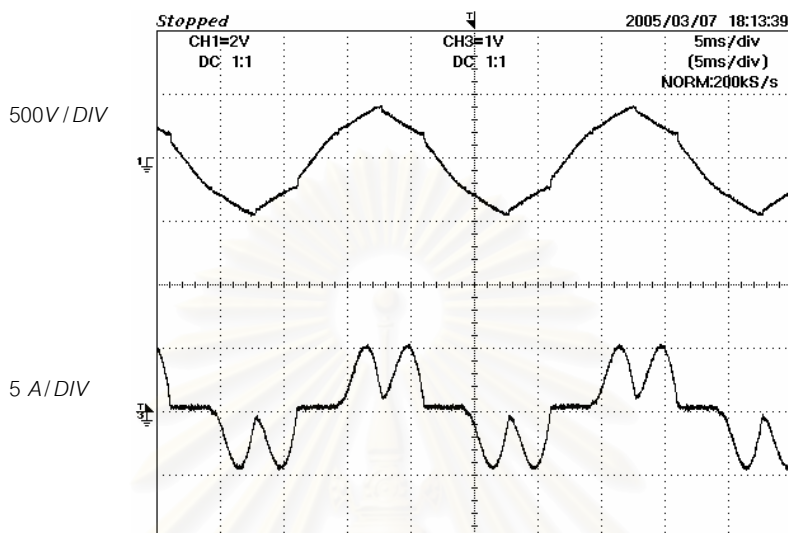
ในกรณีที่โครงสร้างด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสเป็นโหลดความต้านทานขนาด 84.3 โอห์มและมีตัวเก็บประจุขนาด $2200 \mu F$ เป็นวงจรกรอง จากการจำลองเชิงเวลาด้วยโปรแกรม MatLab แสดงผลของรูปคลื่นรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ ได้ดังรูปที่ 3.20 ซึ่งสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรด้านเข้าของสมการแบบจำลอง (3.33) ที่ต้องการทดสอบ ส่วนรูปคลื่นสัญญาณของกระแสเฟส i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาด้วยโปรแกรม MatLab แสดงในรูปที่ 3.21 เปรียบเทียบกับสเปกตรัมกระแส i_L^+ ในรูปที่ 3.22 ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ (3.33) จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนกันมากโดยเฉพาะที่ความถี่สูง ซึ่งสะท้อนว่าโครงสร้างด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสแบบในกรณีที่ 3 ไม่เหมาะสมกับแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์เนื่องจากแรงดันโหลดในความถี่สูงมีผลต่อค่าของกระแสโหลดที่ได้จากการประมาณการด้วยแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์มาก เพื่อให้การประมาณมีความแม่นยำมากขึ้นเราจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนองค์ประกอบของตัวแปรด้านเข้า V_L ให้มีจำนวนมากขึ้นดังแสดงในสมการที่ (3.34) โดยผลการคำนวณที่ได้แสดงในรูปที่ 3.23 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของกระแส i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาในรูปที่ 3.21 พบว่ามีความสอดคล้องกันดี

$$\begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L5} \\ \vdots \\ I_{L19} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{F1,1} & Y_{F1,5} & \cdots & Y_{F1,103} \\ Y_{F5,1} & Y_{F5,5} & \cdots & Y_{F5,103} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{F19,1} & Y_{F19,5} & \cdots & Y_{F19,103} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{L1} \\ V_{L5} \\ \vdots \\ V_{L103} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{B1,1} & Y_{B1,5} & \cdots & Y_{B1,103} \\ Y_{B5,1} & Y_{B5,5} & \cdots & Y_{B5,103} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{B19,1} & Y_{B19,5} & \cdots & Y_{B19,103} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{L1}^* \\ V_{L5}^* \\ \vdots \\ V_{L103}^* \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

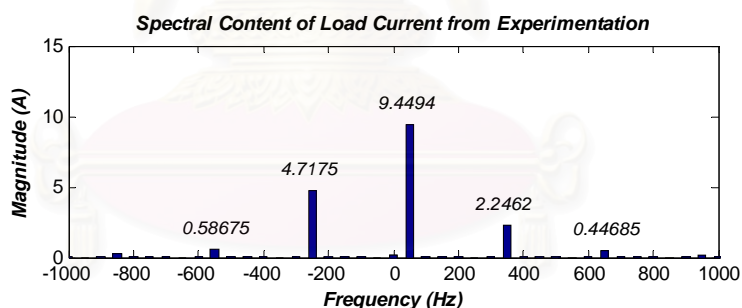


รูปที่ 3.23 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอของรูป 3.19

ในส่วนผลที่ได้จากการทดลอง รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสแสดงในรูปที่ 3.24 และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการทดลองแสดงในรูปที่ 3.25 ซึ่งเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณในรูปที่ 3.23 พบว่ามีความสอดคล้องเช่นกัน



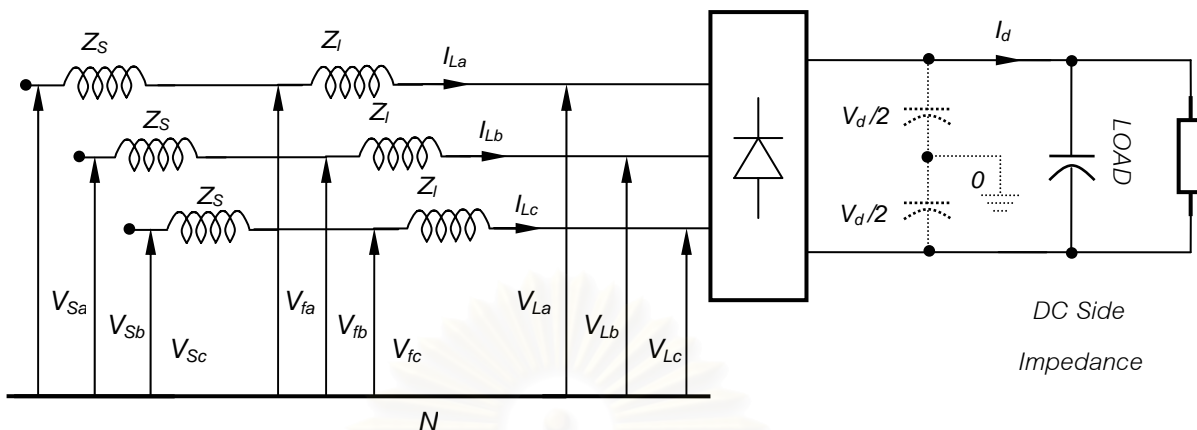
รูปที่ 3.24 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสเฟส i_L จากการทดลองของรูป 3.19



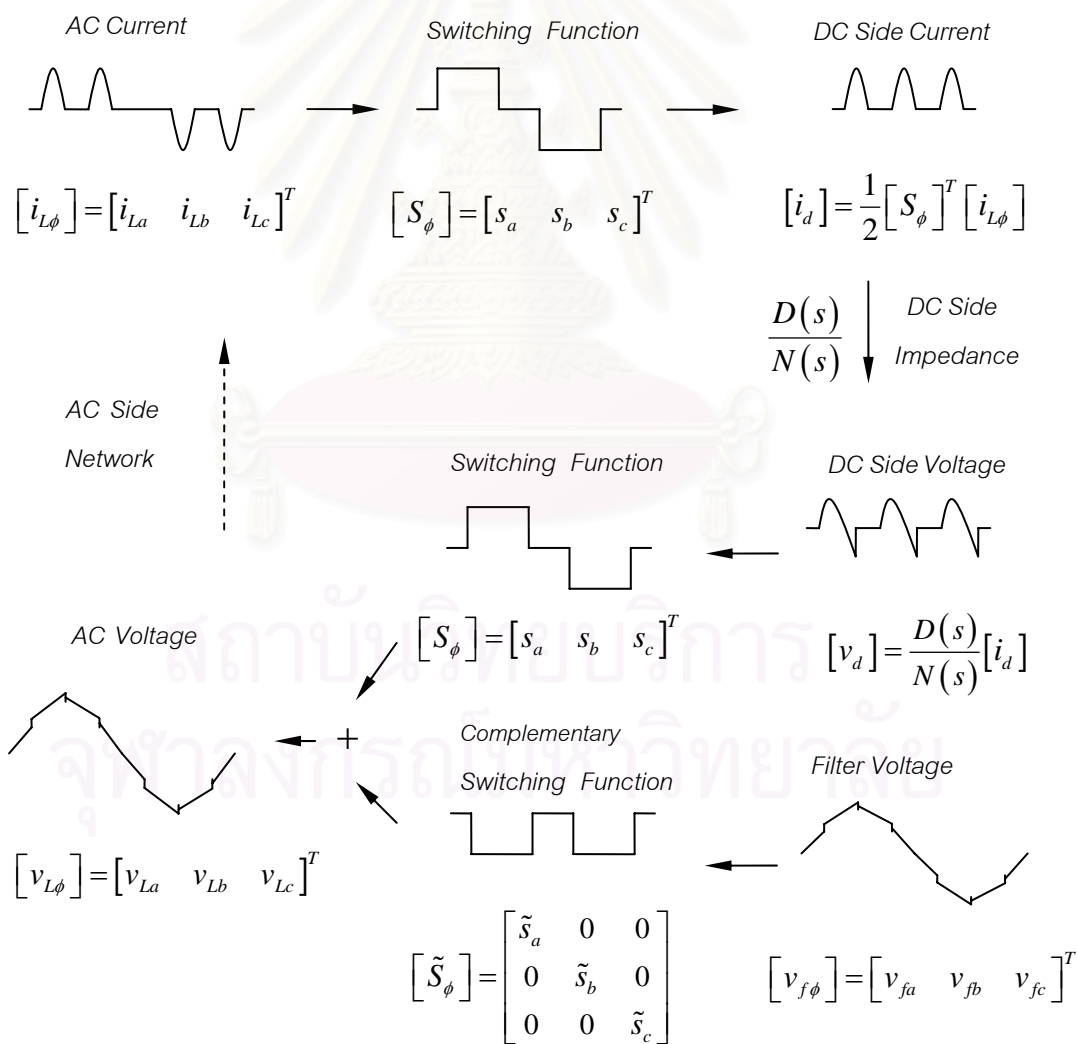
รูปที่ 3.25 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.19

จากผลการทดสอบทั้งหมด เราจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองใน 2 กรณีแรก พบว่ามีความถูกต้องดีเมื่อคำนวณเมื่อใช้องค์ประกอบของแรงดันด้านเข้า V_L จำนวนไม่มาก แต่ในกรณีที่ 3 พบว่าต้องใช้อัตราส่วนของแรงดันด้านเข้า V_L จำนวนมากขึ้นเพื่อให้ได้ผลการคำนวณมีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างของวงจรเรียงกระแสในแบบของกรณีที่ 1 และ 2 เหมาะสมกับโครงสร้างแบบแอดมิตแทนซ์ส่วนในกรณีที่ 3 ไม่เหมาะกับแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ซึ่งสอดคล้องกับเหตุผลที่ได้อธิบายเอาไว้ อย่างไรก็ตามในแต่ละกรณีก็มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้บ้างเนื่องมาจากผลของการละเลยการเหลื่อมกันของกระแส

3.3 การหาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสแบบอิมพีแดนซ์

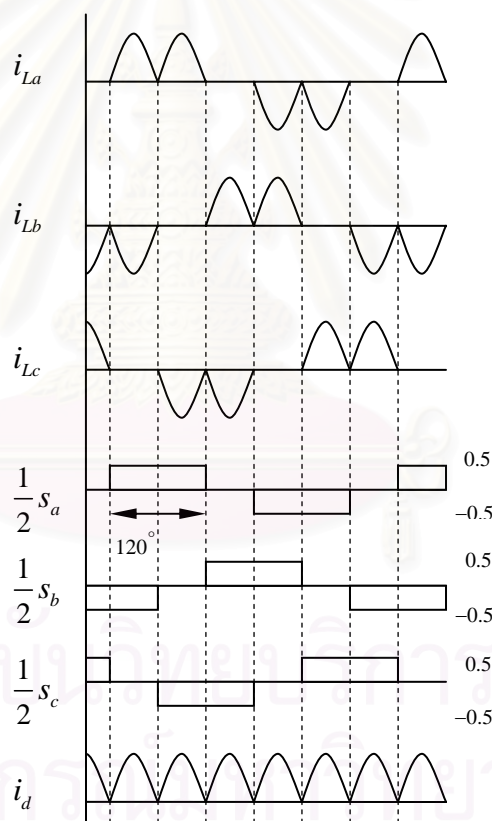


รูปที่ 3.26 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส แบบไดโอดสำหรับการพัฒนาแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์



รูปที่ 3.27 แผนภาพแสดงแนวคิดและกระบวนการในการหาแบบจำลองวงจรเรียงกระแสแบบอิมพีแดนซ์

แบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อชดเชยข้อบกพร่องในส่วนของแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ที่ไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นแบบจำลองสำหรับโหลดชนิดวงจรเรียงกระแสที่ใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เป็นวงจรกรอง (Capacitive Load) โดยแนวคิดในการพัฒนาแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์ที่แสดงในรูปที่ 3.27 ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการในการเชื่อมโยงความสัมพันธ์จากตัวแปรด้านเข้าจนถึงตัวแปรด้านออก สอดคล้องกับโครงสร้างของวงจรเรียงกระแสชนิด (Capacitive Load) ที่แสดงในรูปที่ 3.26 การหาแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์ใช้หลักการเดียวกับการหาแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ โดยอาศัยฟังก์ชันการสวิตช์ในการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของสัญญาณระหว่างด้านไฟตรงกับด้านไฟสลับ จากรูปที่ 3.26 แทนการทำงานของไดโอดทั้ง 3 เฟสด้วยเวกเตอร์ของฟังก์ชันการสวิตช์ $[s_\phi] = [s_a \ s_b \ s_c]^T$ แล้วทำการมอดูเลตกับสัญญาณด้านเข้าซึ่งเป็นเวกเตอร์ของกระแสไฟสลับ $[i_{L\phi}] = [i_{La} \ i_{Lb} \ i_{Lc}]^T$ เพื่อคำนวณหาสัญญาณทางด้านไฟตรง i_d ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.28



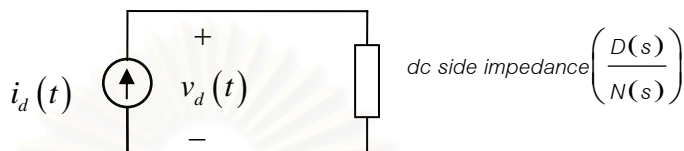
รูปที่ 3.28 สัญญาณกระแสไฟสลับ ฟังก์ชันการสวิตช์ และสัญญาณกระแสไฟตรง

แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟตรงและสัญญาณกระแสไฟสลับแสดงได้ดังสมการที่ (3.35)

$$[i_d] = \frac{1}{2} [S_\phi]^T [i_{L\phi}] \quad (3.35)$$

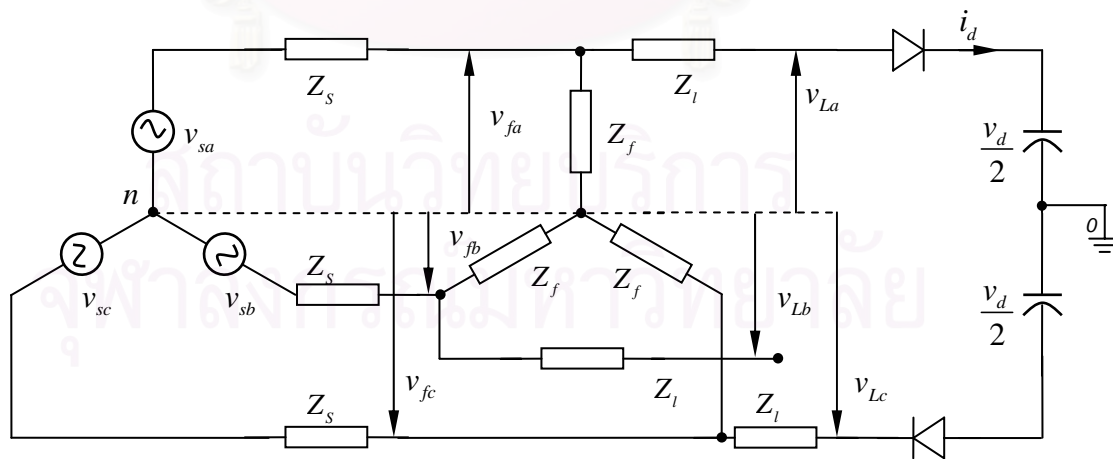
สัญญาณไฟตรง i_d จะทำให้เกิดแรงดันไฟตรง v_d ทางด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสผ่าน อิมพีแดนซ์ไฟตรง $D(s)/N(s)$ แสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3.36)

$$v_d(s) = \frac{D(s)}{N(s)} i_d(s) \tag{3.36}$$



รูปที่ 3.29 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสด้านไฟตรงสำหรับแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์

การกำหนดค่าของแรงดันไฟสลับ v_{La}, v_{Lb}, v_{Lc} ซึ่งเป็นสัญญาณด้านออกของแบบจำลองจะไม่สามารถคำนวณได้จากการมอดูเลตแรงดันไฟตรง v_d กับฟังก์ชันการสวิตช์เท่านั้นซึ่งแตกต่างจากกรณีแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดในรูปที่ 3.26 จะเห็นว่า ไดโอดที่เชื่อมต่อกับวงจรจะทำให้สามารถกำหนดค่าของแรงดันไฟสลับ v_{La}, v_{Lb}, v_{Lc} ได้จากแรงดันไฟตรง แต่จากฟังก์ชันการสวิตช์ในรูปที่ 3.28 จะเห็นว่าทุกๆ ช่วงการทำงานจะมีเพียง 2 เฟสเท่านั้นที่เชื่อมต่อกับวงจร ทางด้านไฟตรงทำให้ในเฟสที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับวงจรด้านไฟตรงไม่สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟสลับในเฟสนั้น จากค่าแรงดันไฟตรงได้ จากตัวอย่างการทำงานของไดโอดในรูปที่ 3.30 จะพบว่าแรงดันไฟสลับในเฟสที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับกับทางด้านไฟตรงจะถูกกำหนดด้วยแรงดันทางด้านแหล่งจ่ายซึ่งในที่นี้หมายถึงแรงดันที่วงจรกรอง v_{fa}, v_{fb}, v_{fc} ดังนั้นต้องใช้ข้อมูลจากแรงดันทางด้านแหล่งจ่ายเพิ่มเติมด้วยในการกำหนดค่าของแรงดันไฟสลับ



รูปที่ 3.30 ตัวอย่างรูปแบบการเชื่อมต่อกันระหว่างวงจรด้านไฟตรงกับทางด้านไฟสลับ

จากตัวอย่างในรูปที่ 3.30 เป็นกรณีที่วงจรด้านไฟสลับในเฟส a และ c เชื่อมต่ออยู่กับวงจรด้านไฟตรงส่วนในเฟส b ถูกเปิดวงจร ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟสลับของวงจรเรียงกระแสกับแรงดันไฟตรงและแรงดันที่วงจรกรองจึงเป็นดังสมการที่ (3.37) ถึง (3.39)

$$v_{La} = \frac{1}{2}v_d + v_{on} \quad (3.37)$$

$$v_{Lb} = v_{fb} \quad (3.38)$$

$$v_{Lc} = -\frac{1}{2}v_d + v_{on} \quad (3.39)$$

เนื่องจากวงจรในรูปที่ 3.30 เป็นระบบ 3 เฟสสมดุลดังนั้นผลรวมของแรงดันโหนดทั้ง 3 เฟสจึงมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้สามารถหาค่าแรงดัน v_{on} จากสมการที่ (3.37) ถึง (3.39) ในรูปฟังก์ชันของแรงดันที่วงจรกรองได้ดังสมการที่ (3.41)

$$v_{La} + v_{Lb} + v_{Lc} = 2v_{on} + v_{fb} = 0 \quad (3.40)$$

$$v_{on} = -\frac{v_{fb}}{2} \quad (3.41)$$

จากนั้นสามารถแสดงแรงดันไฟสลับ v_{La}, v_{Lb}, v_{Lc} เป็นเวกเตอร์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} v_{La} \\ v_{Lb} \\ v_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +\frac{1}{2} \\ 0 \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix} v_d + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \\ 1 \\ -\frac{1}{2} \end{bmatrix} v_{fb} \quad (3.42)$$

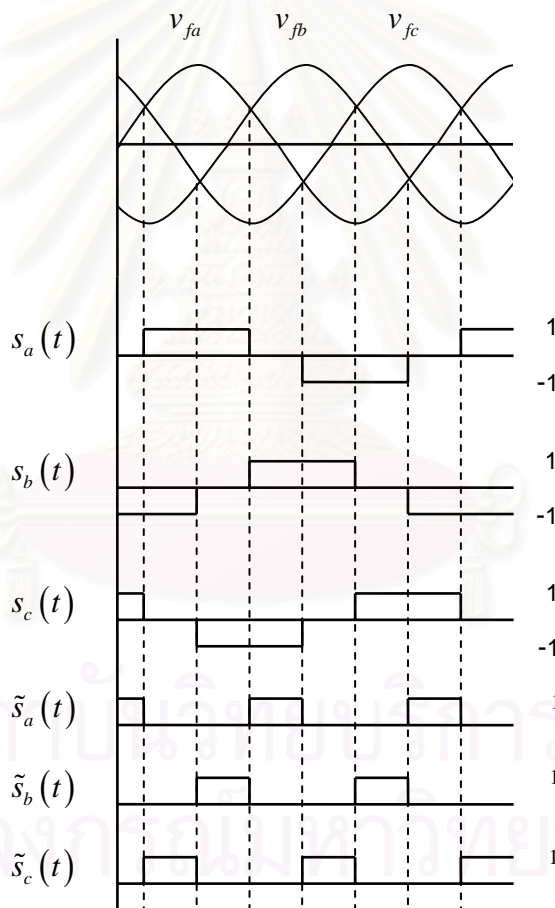
เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะบวกแรงดันลำดับศูนย์ (Zero Sequence Voltage) $\frac{1}{2}[v_{fb} \quad v_{fb} \quad v_{fb}]$ เข้าไปในสมการที่ (3.42) ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} v_{La} \\ v_{Lb} \\ v_{Lc} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} v_d + \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_{fb} \quad (3.43)$$

ทั้งนี้แรงดันลำดับศูนย์ที่บวกเข้าไปจะไม่มีผลต่อพฤติกรรมของกระแสในวงจรที่พิจารณา เพราะกระแสลำดับศูนย์ไม่มีทางไหลได้ในวงจร 3 เฟส 3 สาย

จากสมการที่ (3.43) เมื่อพิจารณาการทำงานตลอดทั้งคาบและแสดงแทนช่วงเวลาที่ได้โอดปิดวงจรด้วยฟังก์ชันการสวิตช์ s_a, s_b, s_c และช่วงเวลาที่ได้โอดแต่ละเฟสเปิดวงจรด้วยฟังก์ชันการสวิตช์ $\tilde{s}_a, \tilde{s}_b, \tilde{s}_c$ ดังในรูปที่ 3.31 จะทำให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเฟสลับและแรงดันไฟตรงได้ดังสมการที่ (3.44) ซึ่งเกิดจากการมอดูเลตแรงดันไฟตรงกับฟังก์ชันการสวิตช์ s_a, s_b, s_c รวมกับการมอดูเลตแรงดันที่วงจรรองกับฟังก์ชันการสวิตช์ $\tilde{s}_a, \tilde{s}_b, \tilde{s}_c$

$$\begin{bmatrix} v_{La} \\ v_{Lb} \\ v_{Lc} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} v_d + \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \tilde{s}_a & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{s}_b & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{s}_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$



รูปที่ 3.31 รูปคลื่นสัญญาณฟังก์ชันการสวิตช์

แนวความคิดการพัฒนาแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์สามารถสรุปเป็นแผนภาพแสดงความสัมพันธ์และกระบวนการคำนวณสัญญาณต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3.27 และสามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังในสมการที่ (3.45)

$$[v_{L\phi}] = \frac{1}{2}[S_\phi] \frac{D(s)}{N(s)} \frac{1}{2}[S_\phi]^T [i_{L\phi}] + \frac{3}{2}[\tilde{S}_\phi][v_{f\phi}] \quad (3.45)$$

โดยที่

$$[v_{f\phi}] = [v_{fa} \quad v_{fb} \quad v_{fc}]^T$$

$$[\tilde{S}_\phi] = \begin{bmatrix} \tilde{s}_a & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{s}_b & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{s}_c \end{bmatrix}$$

นิยามสเปซเวกเตอร์

$$[v_{fac}] = T[v_{f\phi}] \quad , \quad [v_{Lac}] = T[v_{L\phi}] \quad , \quad [i_{Lac}] = T[i_{L\phi}]$$

สมการที่ (42) แปลงเป็นปริมาณสเปซเวกเตอร์ได้เป็น

$$[v_{Lac}] = T[v_{L\phi}] = T \frac{1}{2}[S_\phi] \frac{D(s)}{N(s)} \frac{1}{2}[S_\phi]^T \left(\frac{2}{3}T^T T\right) [i_{L\phi}] + T \frac{3}{2}[\tilde{S}_\phi] \left(\frac{2}{3}T^T T\right) [v_{f\phi}] \quad (3.46)$$

$$[v_{Lac}] = \frac{1}{6}[S] \frac{D(s)}{N(s)} [S]^T [i_{Lac}] + T[\tilde{S}_\phi] T^T [v_{fac}] \quad (3.47)$$

นิยาม

$$\begin{bmatrix} v_f^+ \\ v_f^- \end{bmatrix} = C_f [v_{fac}] \quad , \quad \begin{bmatrix} v_L^+ \\ v_L^- \end{bmatrix} = C_f [v_{Lac}] \quad , \quad \begin{bmatrix} i_L^+ \\ i_L^- \end{bmatrix} = C_f [i_{Lac}]$$

สมการที่ (3.47) แปลงเป็นปริมาณสเปซเวกเตอร์ในรูปจำนวนเชิงซ้อนได้เป็น

$$C_f [v_{Lac}] = \frac{1}{6} C_f [S] \frac{D(s)}{N(s)} [S]^T C_f^{-1} C_f [i_{Lac}] + C_f T[\tilde{S}_\phi] T^T C_f^{-1} C_f [v_{fac}] \quad (3.48)$$

$$\begin{bmatrix} v_L^+ \\ v_L^- \end{bmatrix} = \frac{1}{12} \begin{bmatrix} S^+ \\ S^- \end{bmatrix} \frac{D(s)}{N(s)} \begin{bmatrix} S^+ \\ S^- \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} i_L^+ \\ i_L^- \end{bmatrix} + C_f T[\tilde{S}_\phi] T^T C_f^{-1} \begin{bmatrix} v_f^+ \\ v_f^- \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

พิจารณาเทอม $C_f T[\tilde{S}_\phi] T^T C_f^{-1}$ ในสมการที่ (3.49) จะได้ว่า

$$C_f T [\tilde{S}_\phi] T^T C_f^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \tilde{s}_a + \tilde{s}_a e^{-j120} + \tilde{s}_c e^{+j120} \\ \tilde{s}_a + \tilde{s}_a e^{+j120} + \tilde{s}_c e^{-j120} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

สัญญาณของฟังก์ชันการสวิตช์ $\tilde{s}_a, \tilde{s}_b, \tilde{s}_c$ ในรูปที่ 3.31 สามารถแสดงในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ได้เป็น

$$\tilde{s}_a = \sum_{r=\pm 2, \pm 4, \pm 8, \dots} \tilde{C}_r e^{jr\omega t} \quad (3.51)$$

$$\tilde{s}_b = \sum_{r=\pm 2, \pm 4, \pm 8, \dots} \tilde{C}_r e^{jr(\omega t - 120)} \quad (3.52)$$

$$\tilde{s}_c = \sum_{r=\pm 2, \pm 4, \pm 8, \dots} \tilde{C}_r e^{jr(\omega t + 120)} \quad (3.53)$$

แทนค่าฟังก์ชันการสวิตช์ในสมการที่ (3.51), (3.52), (3.53) ลงในสมการที่ (3.50) จะได้เป็นสมการที่ (3.54)

$$C_f T [\tilde{S}_\phi] T^T C_f^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \tilde{S}^- \\ \tilde{S}^+ & 1 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

โดยที่

$$\tilde{S}^+ = \tilde{s}_a + \tilde{s}_a e^{+j120} + \tilde{s}_c e^{-j120} = \sum_{r=-2, 4, -8, 10, \dots} 3\tilde{C}_r e^{jr\omega t} \quad (3.55)$$

$$\tilde{S}^- = \tilde{s}_a + \tilde{s}_a e^{-j120} + \tilde{s}_c e^{+j120} = \sum_{r=-2, 4, -8, 10, \dots} 3\tilde{C}_r^* e^{-jr\omega t} \quad (3.56)$$

แทนสมการที่ (3.54) ลงในสมการที่ (3.49) จะได้แบบจำลองของวงจรรีเอียงกระแสแบบอิมพีแดนซ์ แสดงเป็นปริมาณสเปซเวกเตอร์ในรูปจำนวนเชิงซ้อนได้ดังในสมการที่ (3.57)

$$\begin{bmatrix} v_L^+ \\ v_L^- \end{bmatrix} = \frac{1}{12} \begin{bmatrix} S^+ \\ S^- \end{bmatrix} \frac{D(s)}{N(s)} \begin{bmatrix} S^+ \\ S^- \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} i_L^+ \\ i_L^- \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \tilde{S}^- \\ \tilde{S}^+ & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_f^+ \\ v_f^- \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

สมการแบบจำลองในสมการที่ (3.57) แปลงไปอยู่ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ได้เป็น

$$v_L^+ = \frac{3}{4} \left[\sum_n \sum_m C_n C_m^* e^{j(n-m)\omega t} \frac{D(s-jm\omega)}{N(s-jm\omega)} \sum_n \sum_m C_n C_m e^{j(n+m)\omega t} \frac{D(s+jm\omega)}{N(s+jm\omega)} \right] \begin{bmatrix} i_L^+ \\ i_L^- \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \sum_{r=-2, 4, -8, 10, \dots} 3\tilde{C}_r^* e^{-jr\omega t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_f^+ \\ v_f^- \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

หากพิจารณากระแสและแรงดันเป็นสัญญาณรายคาบแสดงในรูปอนุกรมฟูรีเยร์ดังสมการที่ (3.59) ,(3.60) และ (3.61)

$$v_L^+ = V_{L1}e^{j\omega t} + V_{L5}e^{-j5\omega t} + V_{L7}e^{j7\omega t} + V_{L11}e^{-j11\omega t} + \dots \quad (3.59)$$

$$i_L^+ = I_{L1}e^{j\omega t} + I_{L5}e^{-j5\omega t} + I_{L7}e^{j7\omega t} + I_{L11}e^{-j11\omega t} + \dots \quad (3.60)$$

$$v_f^+ = V_{f1}e^{j\omega t} + V_{f5}e^{-j5\omega t} + V_{f7}e^{j7\omega t} + V_{f11}e^{-j11\omega t} + \dots \quad (3.61)$$

เราสามารถแสดงแทนกระแส i_L^+ แรงดัน v_L^+ และแรงดันที่วงจรรอง v_f^+ ได้ด้วยเวกเตอร์องค์ประกอบฮาร์มอนิกดังสมการที่ (3.62),(3.63) และ(3.64) ตามลำดับ

$$I_L = [I_{L1} \quad I_{L5} \quad I_{L7} \quad \dots]^T \quad (3.62)$$

$$V_L = [V_{L1} \quad V_{L5} \quad V_{L7} \quad \dots]^T \quad (3.63)$$

$$V_f = [V_{f1} \quad V_{f5} \quad V_{f7} \quad \dots]^T \quad (3.64)$$

$$V_L = [Z_F \quad Z_B] \begin{bmatrix} I_L \\ I_L^* \end{bmatrix} + [S_F \quad S_B] \begin{bmatrix} V_f \\ V_f^* \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

โดยที่

$$Z_F = \begin{bmatrix} Z_{F1,1} & Z_{F1,5} & Z_{F1,7} & \dots \\ Z_{F5,1} & Z_{F5,5} & Z_{F5,7} & \dots \\ Z_{F7,1} & Z_{F7,5} & Z_{F7,7} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad Z_B = \begin{bmatrix} Z_{B1,1} & Z_{B1,5} & Z_{B1,7} & \dots \\ Z_{B5,1} & Z_{B5,5} & Z_{B5,7} & \dots \\ Z_{B7,1} & Z_{B7,5} & Z_{B7,7} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$S_F = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad S_B = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \tilde{C}_{-2}^* & \tilde{C}_4^* & \tilde{C}_{-8}^* & \dots \\ \tilde{C}_4^* & \tilde{C}_{10}^* & \tilde{C}_{-2}^* & \dots \\ \tilde{C}_{-8}^* & \tilde{C}_{-2}^* & \tilde{C}_{-14}^* & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

โดยมีองค์ประกอบ $Z_{F(l,k)}$ และ $Z_{B(l,k)}$ ดังต่อไปนี้

$$Z_{F(l,k)} = \sum_m \sum_n \frac{3}{4} C_n C_m^* \frac{D(-j(m-k)\omega)}{N(-j(m-k)\omega)} ; n-m+k=l \quad (3.66)$$

$$Z_{B(l,k)} = \sum_m \sum_n \frac{3}{4} C_n C_m \frac{D(j(m-k)\omega)}{N(j(m-k)\omega)} ; n+m-k=l \quad (3.67)$$

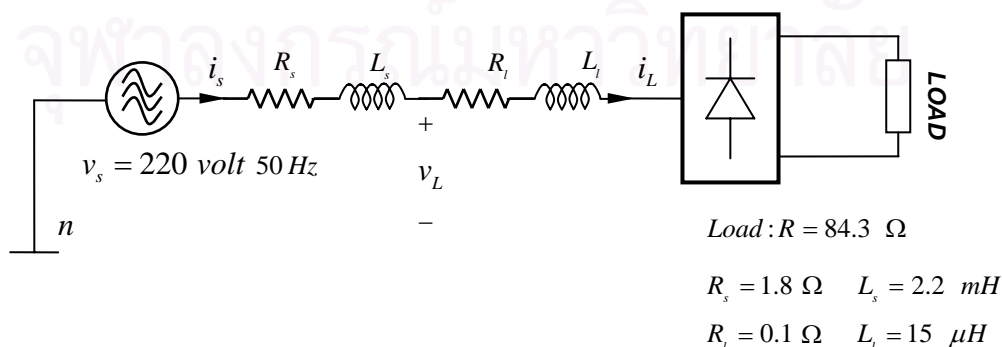
สมการที่ (3.65) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ของแรงดันโหลดซึ่งเป็นตัวแปรด้านออกของแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์กับตัวแปรด้านเข้าซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์กระแสโหลดและเวกเตอร์สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์ของแรงดันที่วงจรกรอง ซึ่งแสดงถึงกลไกการเชื่อมร่วมความถี่ผ่านทางอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ Z_F , Z_B และเมตริกซ์ S_F , S_B ความสัมพันธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้หาผลตอบสนองของโหลดชนิดวงจรเรียงกระแส 3 เฟสในสภาวะคงตัว เพื่อจะนำไปสู่การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาต่างๆในเชิงฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสได้

3.4. ผลการทดสอบแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์

ในการทดสอบแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์จะใช้วิธีการเดียวกันกับการตรวจสอบแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ด้วยการกำหนดค่าสเปกตรัมของกระแสโหลด i_L^+ และแรงดันที่วงจรกรอง v_f^+ ให้กับแบบจำลองแล้วคำนวณหาค่าสเปกตรัมของแรงดันโหลด v_L^+ แล้วผลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับการจำลองวงจรในเชิงเวลาและผลที่ได้จากการทดลองจากระบบจริง โดยสมการแบบจำลองที่จะใช้ในการทดสอบคือสมการที่ (3.68) และจะแยกพิจารณาเป็น 3 กรณีตามโครงสร้างด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสโดยที่ค่าของพารามิเตอร์ของระบบทั้ง 3 กรณีที่จะทำการทดสอบยังคงเหมือนกันกับที่ใช้ทดสอบแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์

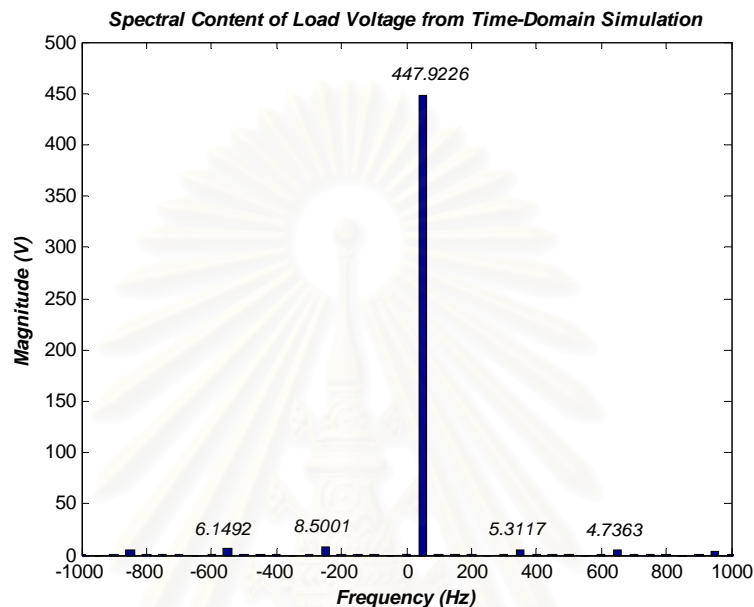
$$\begin{bmatrix} V_{L1} \\ V_{L5} \\ \vdots \\ V_{L19} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{F1,1} & Z_{F1,5} & \cdots & Z_{F1,19} \\ Z_{F5,1} & Z_{F5,5} & \cdots & Z_{F5,19} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{F19,1} & Z_{F19,5} & \cdots & Z_{F19,19} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L5} \\ \vdots \\ I_{L19} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{B1,1} & Z_{B1,5} & \cdots & Z_{B1,19} \\ Z_{B5,1} & Z_{B5,5} & \cdots & Z_{B5,19} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{B19,1} & Z_{B19,5} & \cdots & Z_{B19,19} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1}^* \\ I_{L5}^* \\ \vdots \\ I_{L19}^* \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f5} \\ \vdots \\ V_{f19} \end{bmatrix} + \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \tilde{C}_{-2}^* & \tilde{C}_4^* & \cdots & \tilde{C}_{-20}^* \\ \tilde{C}_4^* & \tilde{C}_{10}^* & \cdots & \tilde{C}_{-14}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}_{-20}^* & \tilde{C}_{-14}^* & \cdots & \tilde{C}_{-38}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{f1}^* \\ V_{f5}^* \\ \vdots \\ V_{f19}^* \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

กรณีที่ 1 โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทาน

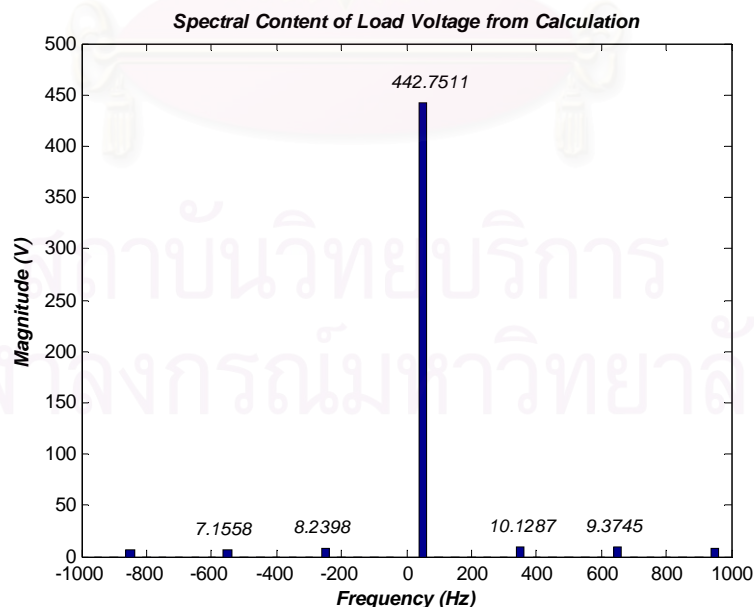


รูปที่ 3.32 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดมีโหลดความต้านทาน

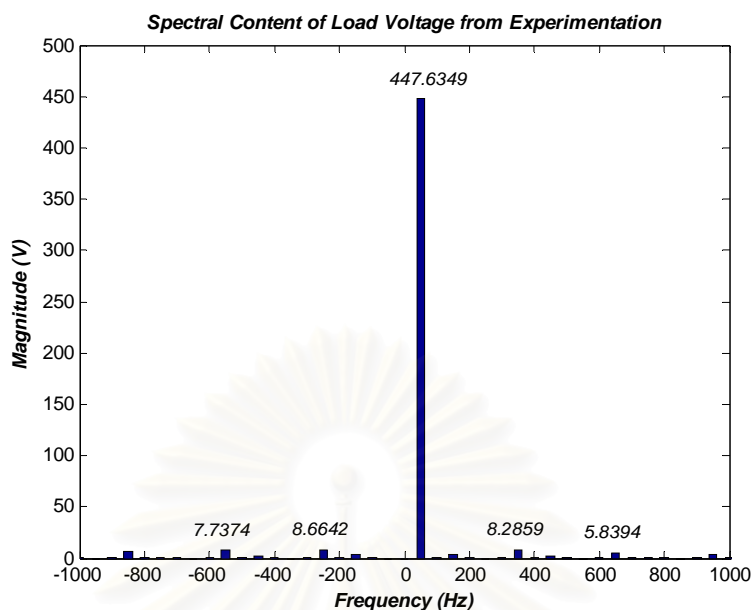
ในกรณีที่โครงสร้างด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสเป็นโหลดความต้านทานขนาด 84.3 โอห์ม เปรียบเทียบสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการคำนวณในรูปที่ 3.34 กับสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาในรูปที่ 3.33 และการทดลองในรูปที่ 3.35 พบว่ามีในส่วนที่ได้จากการคำนวณมีความผิดพลาดอยู่บ้าง แต่อย่างไรก็ตามถือว่าเป็นเปอร์เซ็นต์น้อยสามารถยอมรับได้



รูปที่ 3.33 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 3.32

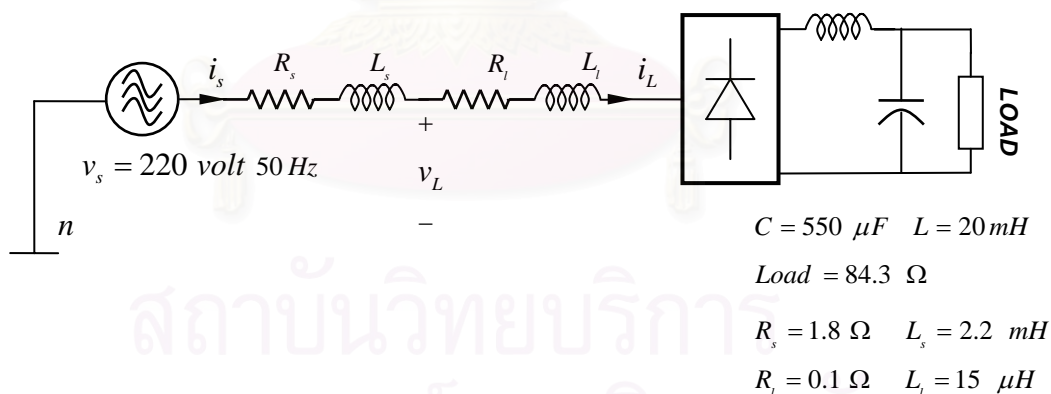


รูปที่ 3.34 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการคำนวณของรูป 3.32



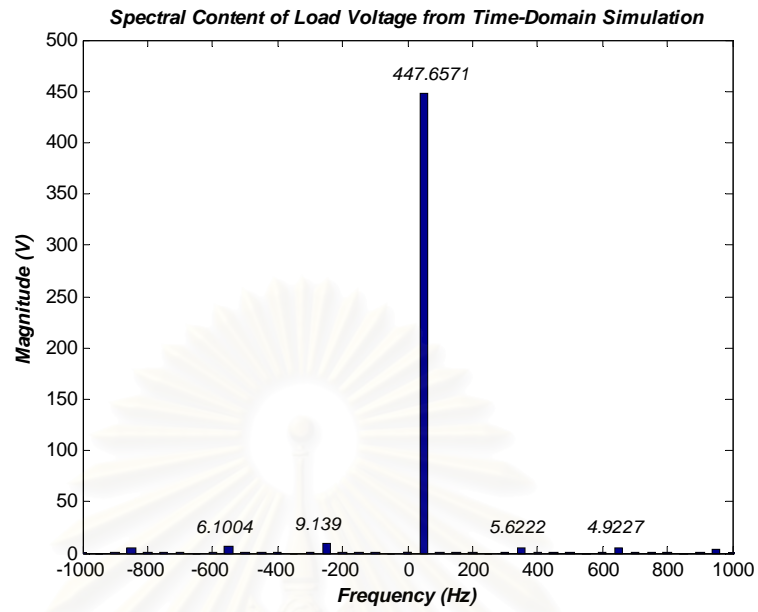
รูปที่ 3.35 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.32

กรณีที่ 2 โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานและมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง

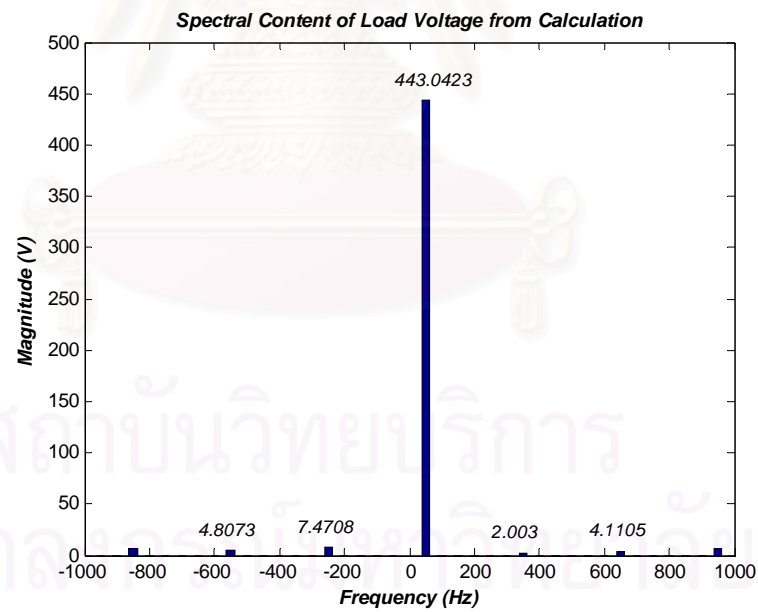


รูปที่ 3.36 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองต่อกับโหลดความต้านทาน

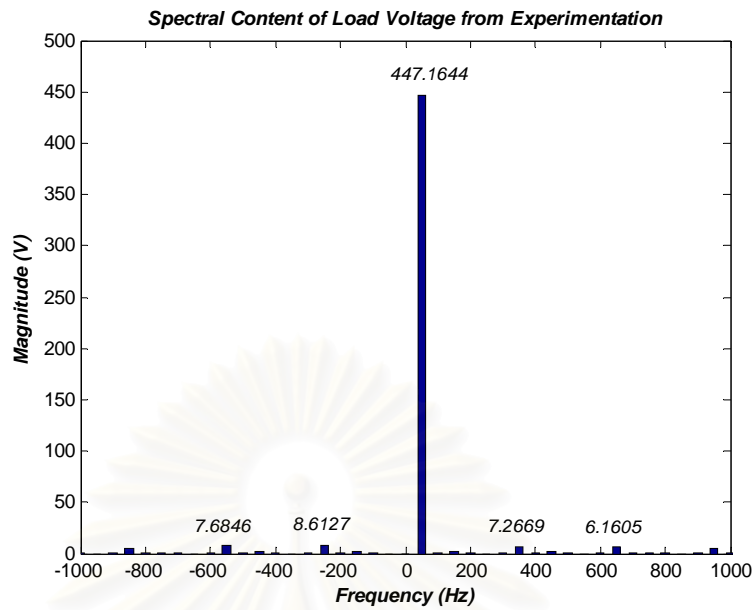
ในกรณีที่โครงสร้างด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสเป็นโหลดความต้านทานขนาด 84.3 โอห์มและมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 550mH กับเก็บประจุขนาด 2200 μF เป็นวงจรกรอง เปรียบเทียบสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการคำนวณในรูปที่ 3.38 กับสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาในรูปที่ 3.37 และจากการทดลองในรูปที่ 3.39 พบว่ามีความสอดคล้องกันทั้ง 3 กรณี ซึ่งความผิดพลาดมีค่ามากกว่ากรณีแรก



รูปที่ 3.37 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 3.36

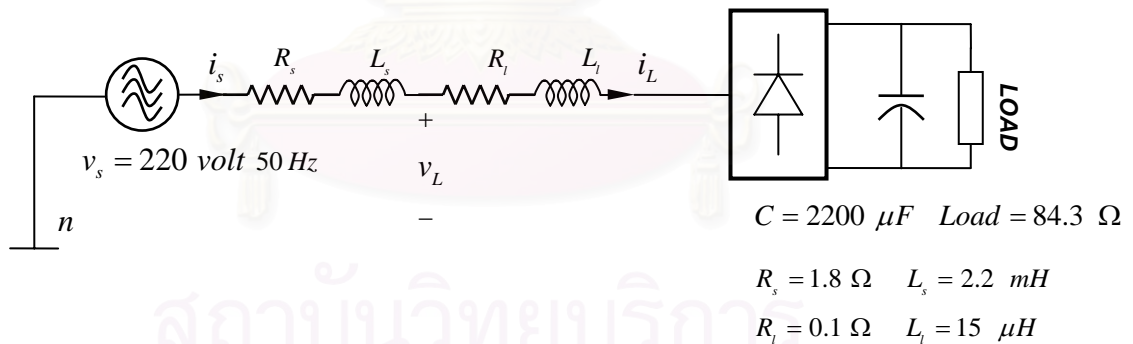


รูปที่ 3.38 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการคำนวณของรูป 3.36



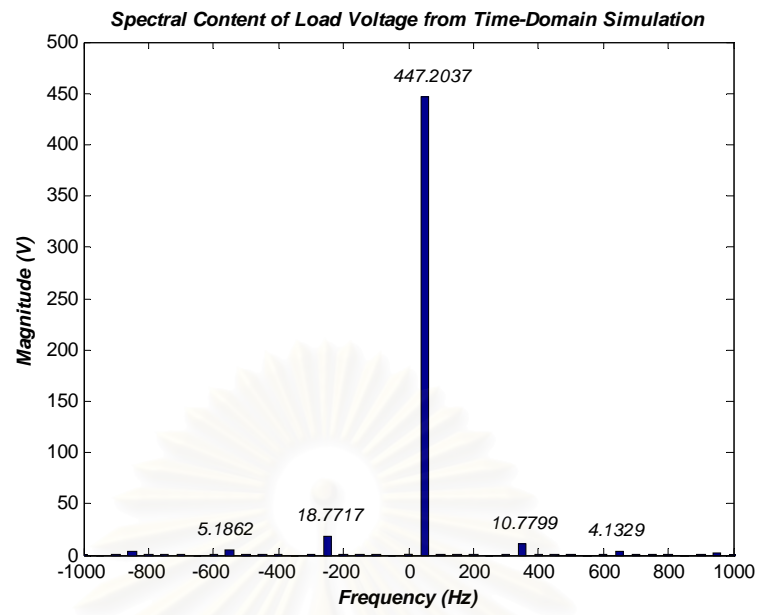
รูปที่ 3.39 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.36

กรณีที่ 3 แหล่งจ่ายมีค่าอิมพีแดนซ์และโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานและตัวเก็บประจุ

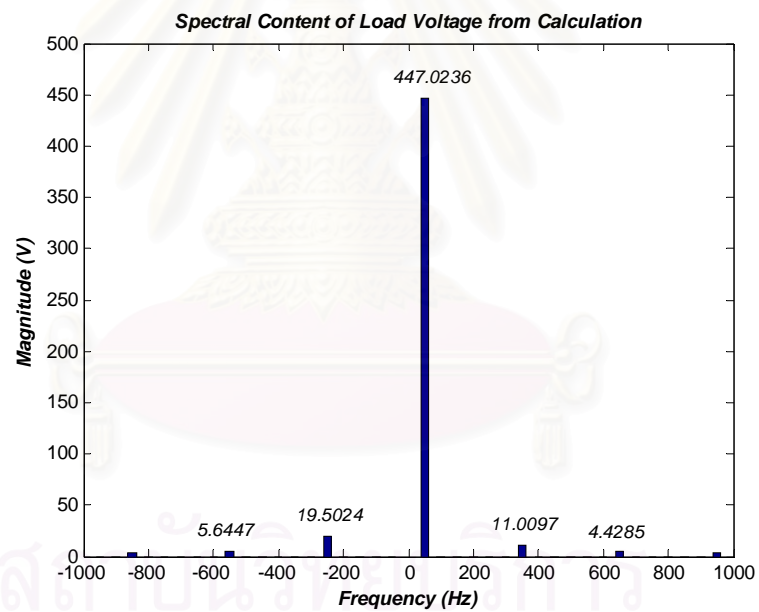


รูปที่ 3.40 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองกับโหลดความต้านทาน

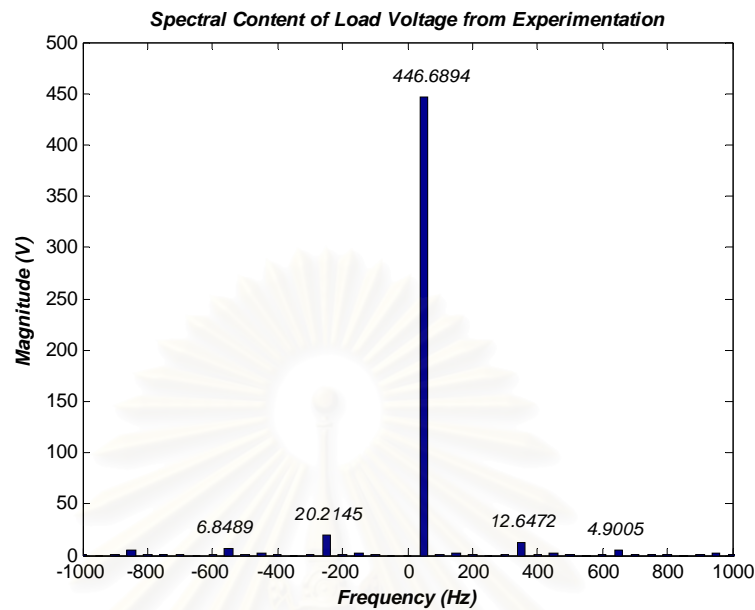
ในกรณีที่โครงสร้างด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสเป็นโหลดความต้านทานขนาด 84.3 โอห์มต่ออยู่กับตัวเก็บประจุขนาด $2200 \mu\text{F}$ เป็นวงจรกรอง เปรียบเทียบสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการคำนวณในรูปที่ 3.42 กับสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาในรูปที่ 3.41 และการทดลองในรูปที่ 3.43 พบว่ามีความสอดคล้องกันทั้ง 3 กรณี



รูปที่ 3.41 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 3.40



รูปที่ 3.42 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการคำนวณของรูป 3.40



รูปที่ 3.43 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.40

จากผลการทดสอบแบบจำลองในกรณีที่ 3 ซึ่งเป็นโหลดแบบคาปาซิทีฟพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีความถูกต้องดีและจำนวนของตัวแปรด้านเข้าที่ใช้นั้นไม่มาก ส่วนของกรณีที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นโหลดแบบความต้านทานและโหลดแบบอินดักทีฟ ในส่วนผลที่ได้จากการคำนวณพบว่ามีผลผิดพลาดเกิดขึ้นที่อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างของวงจรเรียงกระแสใน 2 กรณีแรกไม่เหมาะสมกับแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์ ในขณะที่ในกรณีที่ 3 มีความเหมาะสมมากกว่า

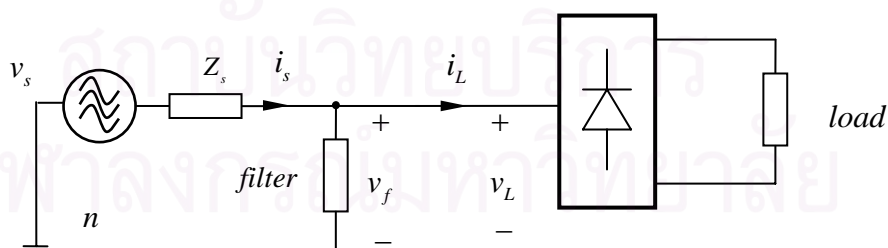
เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์กับแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์จะพบว่าแบบจำลองทั้ง 2 มีความคล้ายคลึงกันเนื่องจากในการพัฒนาแบบจำลองทั้ง 2 แบบใช้แนวคิดเดียวกัน ดังนั้นถ้าพิจารณาในส่วนของเมตริกซ์โอนย้ายเชิงฮาร์มอนิก (HTFM) ของแบบจำลองทั้ง 2 แบบจะพบว่าต่างกันอยู่กึ่งขั้นการสวิตช์และฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างกระแสกับแรงดันไฟตรง $\left(\frac{N}{D}(s), \frac{D}{N}(s)\right)$ บทบาทของฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างกระแสกับแรงดันไฟตรงที่มีต่อ HTFM มีความสำคัญมากเนื่องจากเทอมนี้ทำให้ HTFM ของแบบจำลองทั้ง 2 มีความแตกต่าง กล่าวคืออิมพีแดนซ์เมตริกซ์ Z_F, Z_B จะมีอัตราขยายที่ถูกกำหนดด้วยอิมพีแดนซ์ด้านไฟตรง $(D(s)/N(s))$ ในขณะที่แอดมิตแทนซ์เมตริกซ์ Y_F, Y_B จะมีอัตราขยายที่ถูกกำหนดด้วยแอดมิตแทนซ์ด้านไฟตรง $(N(s)/D(s))$ ซึ่งการที่อิมพีแดนซ์และแอดมิตแทนซ์ด้านไฟตรงเป็นส่วนกลับของกันและกัน จึงส่งผลให้อัตราขยายของสมาชิกของ HTFM ในเทอมที่เชื่อมโยงจากตัวแปรด้านเข้าที่มีความถี่สูงยังตัวแปรด้านออกที่มีความถี่ต่ำมีค่าแตกต่างกันมาก ซึ่งข้อนี้จะส่งผลโดยตรงต่อมิติของแบบจำลอง โดยพิจารณาได้จากผลการทดสอบแบบจำลองทั้ง 2 แบบ จะเห็นว่าแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์เหมาะสมที่จะเป็นแบบจำลองของ

โหลดแบบอินดักทีฟโดยตรวจสอบได้จากผลการทดลองในกรณีที่ 2 (ในกรณีที่โหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานและไดโอดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง) ส่วนแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์จะเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นแบบจำลองของโหลดแบบคาปาซิทีฟมากกว่าซึ่งตรวจสอบได้จากผลการทดลองในกรณีที่ 3 (ในกรณีที่แหล่งจ่ายมีค่าอิมพีแดนซ์และโหลดของวงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานและใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรอง) ซึ่งความเหมาะสมพิจารณาจากความถูกต้องของค่าคำนวณและมีติของแบบจำลองที่ใช้

ดังนั้นถ้าต้องการให้เกิดความเหมาะสมต่อการเลือกใช้แบบจำลอง จะต้องคำนึงถึงโครงสร้างของวงจรเรียงกระแสด้วย ซึ่งประโยชน์ที่ได้รับจะทำให้แบบจำลอง (HTFM) มีขนาดกะทัดรัด และไม่อ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของมุมนำกระแสของไดโอด โดยคุณสมบัติดังกล่าวจะมีประโยชน์มากเมื่อนำแบบจำลองไปพัฒนาเป็นวงจรสมมูล ซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป

3.5 การหาผลตอบสนองของระบบโดยอาศัยวงรอบป้อนกลับ

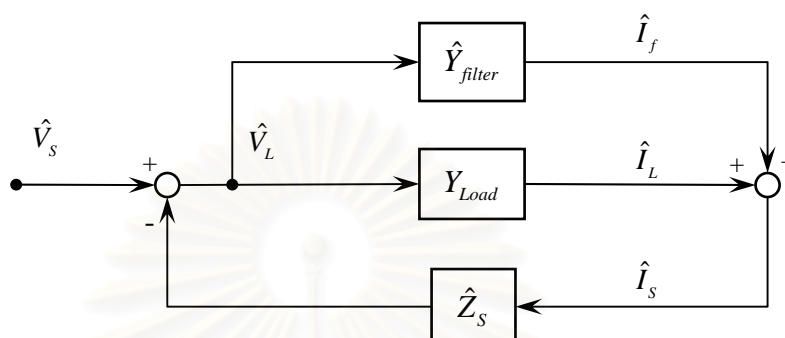
การหาผลตอบสนองของระบบ จะมีประโยชน์สำหรับการออกแบบพิกัดของอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพสัญญาณไฟฟ้าเพื่อนำไปติดตั้งในระบบ แต่การหาผลตอบสนองของระบบที่มีโหลดชนิดวงจรเรียงกระแสติดตั้งอยู่ไม่สามารถทำการแยกวิเคราะห์ในแต่ละส่วนได้ เนื่องจากแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสเปลี่ยนแปลงตามผลของการมีปฏิริยาต่อกันระหว่างโหลด แหล่งจ่ายไฟและอุปกรณ์ที่จะติดตั้งเข้าไฟในระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์ทุกส่วนของระบบพร้อมกันจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยใช้ประโยชน์จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมา ตัวอย่างวงจรในรูปที่ 3.44 สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณต่างๆ ได้ด้วยบล็อกไดอะแกรมได้ดังแสดงในรูปที่ 3.45 โดยที่ส่วนประกอบของบล็อกไดอะแกรมได้มาจากระบบในรูปที่ 3.44 ซึ่งในส่วนของระบบส่งจ่ายไฟซึ่งจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน (v_s) อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย (Z_s) และอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพสัญญาณไฟฟ้า (*filter*) ถูกแทนด้วยแอดมิตแทนซ์ของวงจรกรอง Y_{filter} และในส่วนของโหลดชนิดไม่เชิงเส้นในที่นี้คือวงจรเรียงกระแส 3 เฟสถูกแทนด้วยแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ Y_{Load}



รูปที่ 3.44 ตัวอย่างระบบส่งจ่ายไฟ 3 เฟส ที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส

เนื่องจากโดยปกติแล้วการหาผลตอบสนองของโหลดชนิดวงจรเรียงกระแสจะต้องกำหนดตัวแปรด้านเข้าให้กับแบบจำลองซึ่งในกรณีนี้หมายถึงสเปกตรัมของแรงดันไฟสลับ ซึ่งที่ผ่านมามีค่าดังกล่าวได้มาจากการจำลองเชิงเวลาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้การใช้งานแบบจำลองไม่สะดวกเท่าที่ควร แต่อย่างไรก็ตามเรา

สามารถใช้ประโยชน์จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.45 ในการหาผลตอบสนองของสัญญาณต่างๆ ที่ต้องการ ด้วยการหาฟังก์ชันโอนย้ายจากแหล่งจ่ายแรงดันไปเป็นสัญญาณต่างๆ ได้โดยอาศัยวงรอบป้อนกลับ ซึ่งจะทำให้การหาผลตอบสนองมีความสะดวกมากขึ้นเนื่องจากเราสามารถคำนวณสเปกตรัมของสัญญาณที่ต้องการจากเวกเตอร์ของแหล่งจ่ายได้โดยตรง



รูปที่ 3.45 บล็อกไดอะแกรมของระบบในรูปที่ 3.44

นิยาม

$$\hat{V}_L = \begin{bmatrix} V_L \\ V_L^* \end{bmatrix} \quad \hat{V}_s = \begin{bmatrix} V_s \\ V_s^* \end{bmatrix} \quad \hat{I}_L = \begin{bmatrix} I_L \\ I_L^* \end{bmatrix}$$

ดังนั้นสามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างเวกเตอร์ของแหล่งจ่ายแรงดัน \hat{V}_s กับเวกเตอร์ของแรงดันโหลด \hat{V}_L แสดงได้ดังสมการที่ (3.69) และฟังก์ชันโอนย้ายระหว่างเวกเตอร์ของแหล่งจ่ายแรงดัน \hat{V}_s กับเวกเตอร์ของกระแสโหลด \hat{I}_L แสดงได้ดังสมการที่ (3.70)

$$\hat{V}_L = \left[I + \hat{Z}_s Y_{Load} + \hat{Z}_s Y_{filter} \right]^{-1} \hat{V}_s \quad (3.69)$$

$$\hat{I}_L = Y_{Load} \left[I + \hat{Z}_s Y_{Load} + \hat{Z}_s Y_{filter} \right]^{-1} \hat{V}_s \quad (3.70)$$

โดยที่

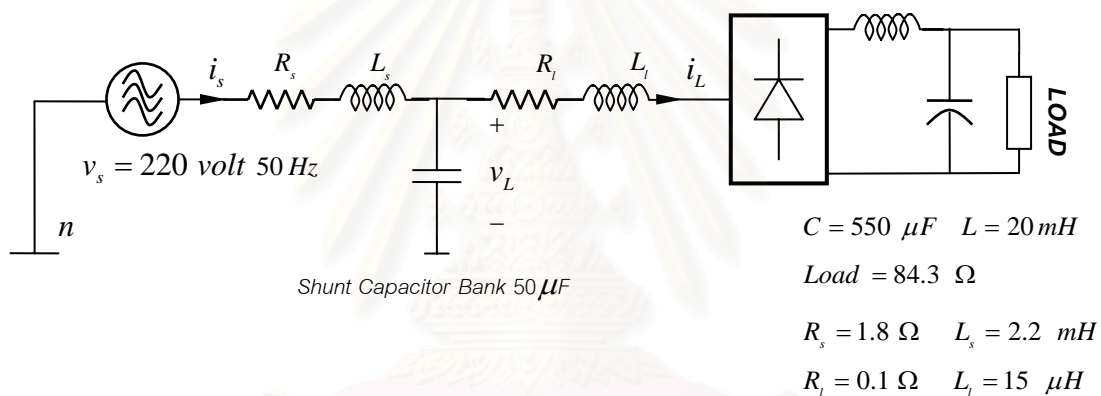
$$Y_{Load} = \begin{bmatrix} Y_F & Y_B \\ Y_B^* & Y_F^* \end{bmatrix} \quad \hat{Y}_{filter} = \begin{bmatrix} Y_{filter} & 0 \\ 0 & Y_{filter}^* \end{bmatrix} \quad \hat{Z}_s = \begin{bmatrix} Z_s & 0 \\ 0 & Z_s^* \end{bmatrix}$$

และ

$$Y_{filter} = \begin{bmatrix} h_f(j\omega) & 0 & 0 & \dots \\ 0 & h_f(-j5\omega) & 0 & \dots \\ 0 & 0 & h_f(j7\omega) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} ; h_f(s) = \frac{I_f(s)}{V_f(s)}$$

$$Z_S = \begin{bmatrix} h_s(j\omega) & 0 & 0 & \dots \\ 0 & h_s(-j5\omega) & 0 & \dots \\ 0 & 0 & h_s(j7\omega) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} ; h_s(s) = \frac{V_s(s) - V_f(s)}{I_s(s)}$$

แสดงตัวอย่างการคำนวณผลตอบสนองของระบบโดยอาศัยวงรอบป้อนกลับ ดังแสดงระบบในรูปที่ 3.46 ผลของรูปคลื่นแรงดันและกระแสเฟสจากการทดลองแสดงในรูปที่ 3.47



รูปที่ 3.46 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองต่อกับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

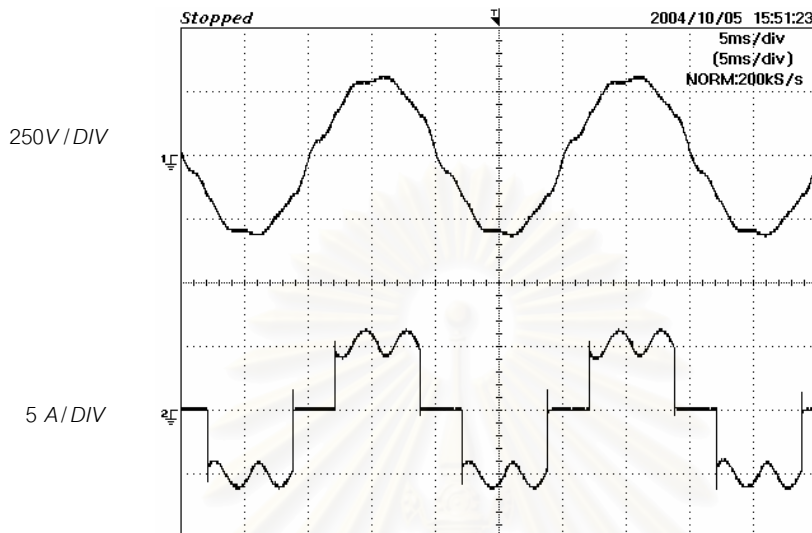
ใช้สมการที่ (3.70) ในการคำนวณหาผลตอบสนองของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด จากระบบในรูปที่ 3.46 สามารถหาฟังก์ชันโอนย้าย $h_f(s)$, $h_s(s)$ และเวกเตอร์ของแหล่งจ่ายแรงดัน \hat{V}_s เพื่อใช้ในการคำนวณสเปซเวกเตอร์กระแส ดังแสดงในสมการที่ (3.71)-(3.73)

$$h_f(s) = \frac{I_f(s)}{V_f(s)} = C_f s = 50 \times 10^{-6} s \quad (3.71)$$

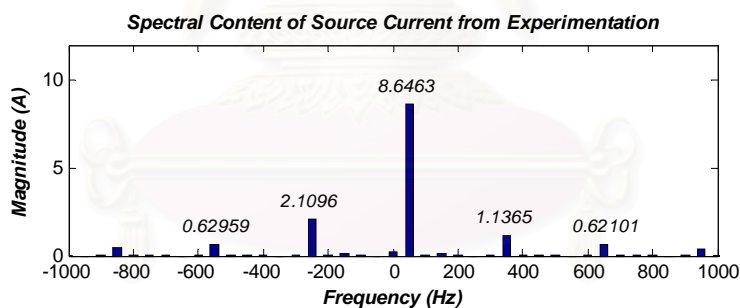
$$h_s(s) = \frac{V_s(s) - V_f(s)}{I_s(s)} = R + Ls = 1.8 + 2.2 \times 10^{-3} s \quad (3.72)$$

$$\begin{aligned} \hat{V}_s &= [V_{s1} \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad V_{s1}^* \quad 0 \quad 0 \quad \dots]^T \\ &= [467e^{-j90} \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 467e^{+j90} \quad 0 \quad 0 \quad \dots]^T \end{aligned} \quad (3.73)$$

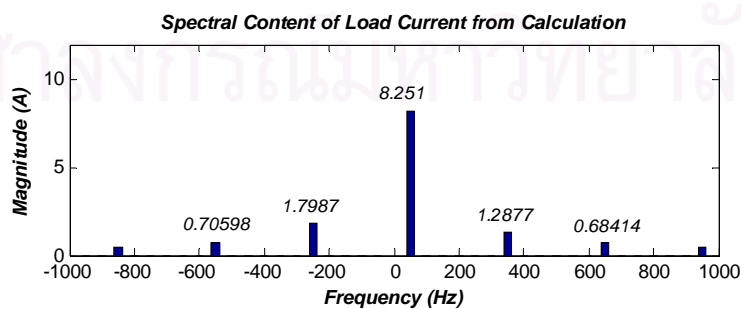
ผลจากการคำนวณสเปกตรัมขององค์ประกอบฮาร์มอนิกแสดงได้ดังรูปที่ 3.49 ตรวจสอบความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของกระแสที่จากการทดลองในรูปที่ 3.48 และผลที่ได้จากการจำลองทางเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.50 พบว่ามีความสอดคล้องกันทั้ง 3 กรณี



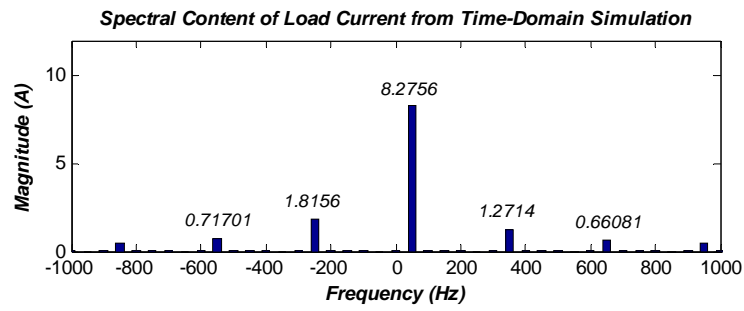
รูปที่ 3.47 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสเฟส i_L จากการทดลองของรูป 3.46



รูปที่ 3.48 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.46

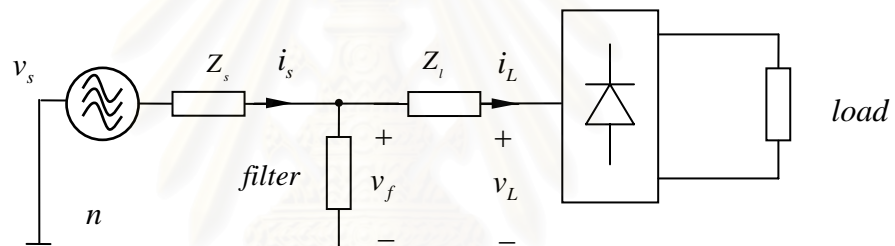


รูปที่ 3.49 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอของรูป 3.46

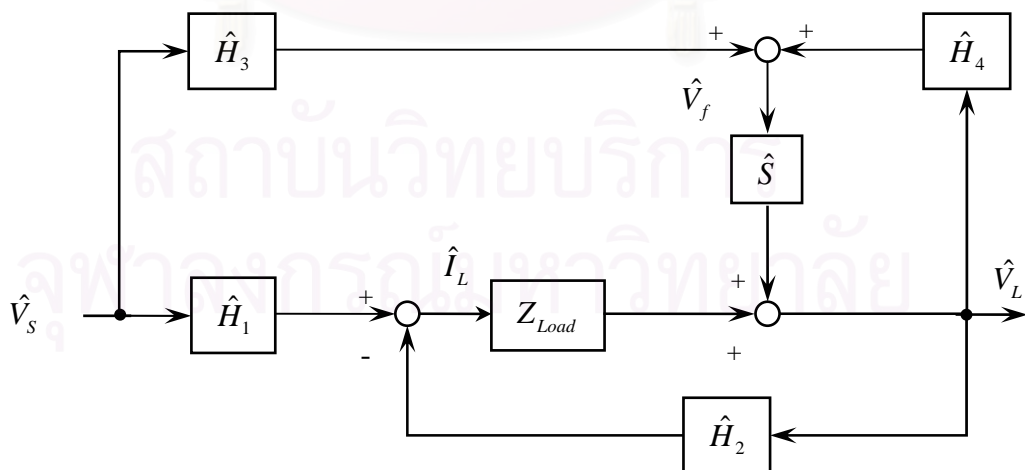


รูปที่ 3.50 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองทางเวลาของรูป 3.46

ในการแสดงแทนระบบด้วยบล็อกไดอะแกรม ส่วนของวงจรเรียงกระแสยังสามารถแสดงแทนด้วยแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์ Z_{Load} ได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่นระบบในรูปที่ 3.51 สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.52



รูปที่ 3.51 ตัวอย่างระบบส่งจ่ายไฟ 3 เฟส ที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส



รูปที่ 3.52 บล็อกไดอะแกรมของระบบในรูปที่ 3.51

การแสดงระบบเป็นบล็อกไดอะแกรมสำหรับคำนวณผลตอบสนองจากแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์ นับว่ามีประโยชน์มาก เพราะว่าตัวแปรด้านเข้าของแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์นอกจากจะเป็นกระแสไฟสลับแล้วยังต้องใช้แรงดันที่วงจรรองอีกด้วยซึ่งโดยปกติแล้วค่าเหล่านี้ได้จากการจำลองเชิงเวลา แต่การใช้การคำนวณจากฟังก์ชันโอนย้ายในสมการที่ (3.74) ทำให้สามารถลดขั้นตอนเหล่านั้นลงได้เนื่องจากสัญญาณต่างๆ สามารถคำนวณได้จากเวกเตอร์ของแหล่งจ่ายแรงดัน \hat{V}_S โดยตรง

$$\hat{V}_L = \left(I - \hat{S}\hat{H}_4 + Z_{Load}\hat{H}_2 \right)^{-1} \left(\hat{S}\hat{H}_3 + Z_{Load}\hat{H}_1 \right) \hat{V}_S \quad (3.74)$$

$$\hat{I}_L = \left(\hat{H}_1 - \hat{H}_2 \left(I - \hat{S}\hat{H}_4 + Z_{Load}\hat{H}_2 \right)^{-1} \left(\hat{S}\hat{H}_3 + Z_{Load}\hat{H}_1 \right) \right) \hat{V}_S \quad (3.75)$$

โดยที่

$$Z_{Load} = \begin{bmatrix} Z_F & Z_B \\ Z_B^* & Z_F^* \end{bmatrix} \quad \hat{S} = \begin{bmatrix} S_F & S_B \\ S_B^* & S_F^* \end{bmatrix} \quad \hat{H}_X = \begin{bmatrix} H_X & 0 \\ 0 & H_X^* \end{bmatrix}$$

และ

$$H_X = \begin{bmatrix} h_x(j\omega) & 0 & 0 & \dots \\ 0 & h_x(-j5\omega) & 0 & \dots \\ 0 & 0 & h_x(j7\omega) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

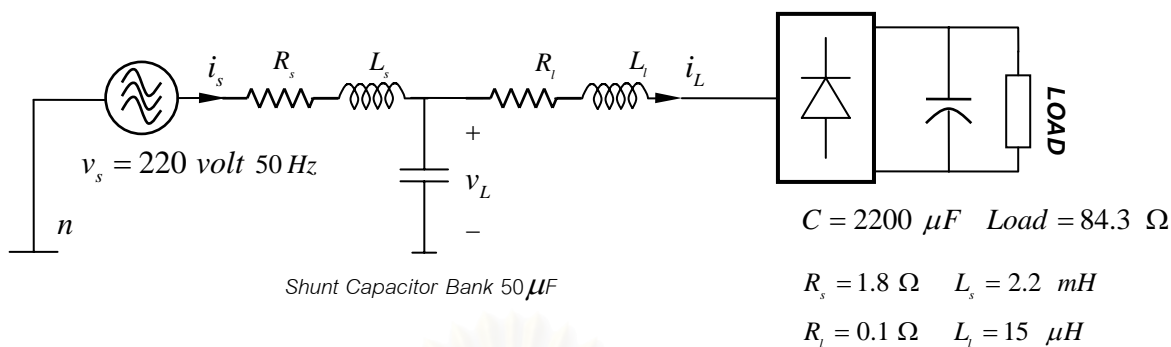
เมื่อ

$$\begin{aligned} h_1(s) &= \frac{Z_f}{Z_f Z_s + Z_l Z_s + Z_l Z_f}(s) & h_2(s) &= \frac{Z_f + Z_s}{Z_f Z_s + Z_l Z_s + Z_l Z_f}(s) \\ h_3(s) &= \frac{Z_f Z_l}{Z_f Z_s + Z_l Z_s + Z_l Z_f}(s) & h_4(s) &= \frac{Z_f Z_s}{Z_f Z_s + Z_l Z_s + Z_l Z_f}(s) \end{aligned}$$

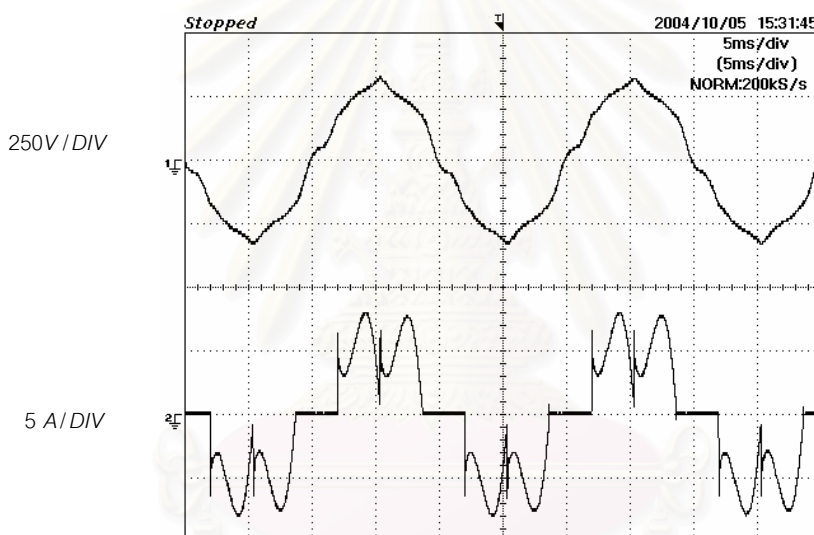
โดยที่สามารถหาฟังก์ชันโอนย้าย $h_1(s)$, $h_2(s)$, $h_3(s)$ และ $h_4(s)$ ได้จากสมการที่ (3.76) ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ของสัญญาณของระบบทางด้านแหล่งจ่าย

$$\begin{bmatrix} i_L^+(s) \\ v_f^+(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(s) & -h_2(s) \\ h_3(s) & h_4(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s^+(s) \\ v_L^+(s) \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

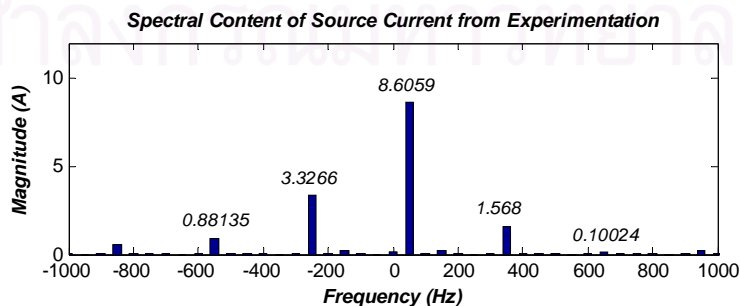
ตัวอย่างการคำนวณผลตอบสนองของระบบโดยอาศัยวงรอบป้อนกลับ ดังแสดงระบบในรูปที่ 3.53 ผลของรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสเฟส i_L จากการทดลองแสดงดังในรูปที่ 3.53 และสเปกตรัมของกระแสไหลจากการทดลองแสดงในรูปที่ 3.54



รูปที่ 3.53 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองต่อกับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง



รูปที่ 3.54 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันเฟส v_L และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสเฟส i_L จากการทดลองของรูป 3.53



รูปที่ 3.55 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการทดลองของรูป 3.53

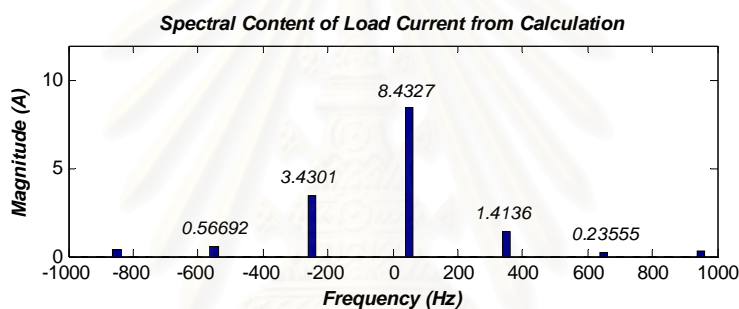
ใช้สมการที่ (3.74) ในการคำนวณหาผลตอบสนองของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด จากระบบในรูปแบบที่ 3.53 สามารถหาฟังก์ชันโอนย้าย $Z_s(s)$, $Z_f(s)$, $Z_l(s)$ และเวกเตอร์ของแหล่งจ่ายแรงดัน \hat{V}_s เพื่อใช้ในการคำนวณสเปซเวกเตอร์กระแส ดังแสดงในสมการที่ (3.77)-(3.80)

$$Z_s(s) = 1.8 + 2.2 \times 10^{-3} s \quad (3.77)$$

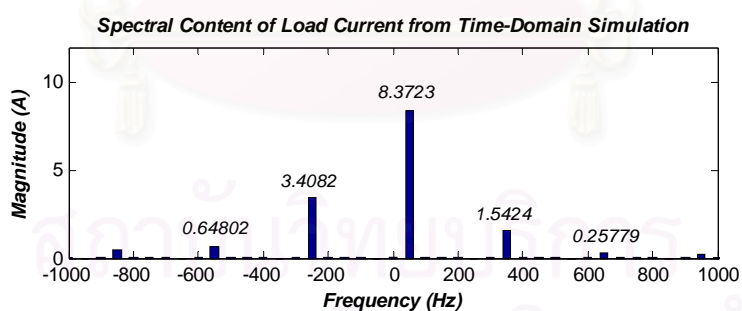
$$Z_f(s) = 20000s \quad (3.78)$$

$$Z_l(s) = 0.1 + 15 \times 10^{-6} s \quad (3.79)$$

$$\begin{aligned} \hat{V}_s &= [V_{s1} \ 0 \ 0 \ \dots \ V_{s1}^* \ 0 \ 0 \ \dots]^T \\ &= [467e^{-j90} \ 0 \ 0 \ \dots \ 467e^{+j90} \ 0 \ 0 \ \dots]^T \end{aligned} \quad (3.80)$$



รูปที่ 3.56 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอของรูป 3.53



รูปที่ 3.57 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองทางเวลาของรูป 3.53

ผลจากการคำนวณสเปกตรัมขององค์ประกอบฮาร์มอนิกแสดงได้ดังรูปที่ 3.56 ตรวจสอบความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของกระแสที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 3.55 และผลที่ได้จากการจำลองทางเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.57 พบว่ามีความสอดคล้องกันทั้ง 3 กรณี

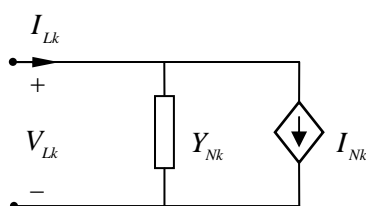
การวิเคราะห์พฤติกรรมทางฮาร์มอนิกของวงจรเรียงกระแสด้วยวงจรสมมูล

แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมา นอกจากจะมีประโยชน์ในการใช้เพื่อหาผลตอบสนองของโหลดชนิดวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแล้ว งานวิจัยนี้ยังมีเป้าหมายที่จะใช้ประโยชน์จากแบบจำลองในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหรือคาดการณ์พฤติกรรมของระบบล่วงหน้าเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายอีกด้วย ประเด็นสำคัญที่ต้องวิเคราะห์คือผลของการมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าที่ติดตั้งเข้าไปในระบบกับโหลดชนิดวงจรเรียง และเนื่องจากการอธิบายพฤติกรรมของระบบจะเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative Analysis) ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยวงจรสมมูลจะทำให้เกิดความสะดวกและมีความชัดเจนมากกว่าการอธิบายด้วยบล็อกไดอะแกรมที่ได้นำเสนอเอาไว้ในบทที่แล้วซึ่งเป็นลักษณะของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) ในบทนี้แบบจำลองที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 จะถูกนำมาเขียนแสดงในลักษณะวงจรสมมูลในโดเมนความถี่

แบบจำลองทั้ง 2 แบบที่ได้นำเสนอมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในเรื่องของลักษณะผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีต่อโครงสร้างของวงจรทางด้านไฟตรงที่แตกต่างกันของวงจรเรียงกระแส ทำให้ HTFM มีมิติและมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของมุมเริ่มนำกระแสของไดโอดแตกต่างกัน และส่งผลต่อการเลือกใช้แบบจำลองให้เหมาะกับโครงสร้างของวงจรทางด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสแต่ละประเภท กล่าวคือวงจรเรียงกระแสมีโครงสร้างทางด้านไฟตรงที่มีตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่อนุกรมอยู่กับโหลด จะเหมาะที่จะใช้แบบจำลองประเภทแอดมิตแทนซ์ ส่วนในกรณีที่วงจรเรียงกระแสมีโครงสร้างทางด้านไฟตรงที่มีตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ขนานอยู่กับโหลด จะเหมาะที่จะใช้แบบจำลองประเภทอิมพีแดนซ์ในการอธิบายพฤติกรรม ซึ่งความเหมาะสมนี้มีความสำคัญมากเมื่อนำแบบจำลองที่ได้มาแสดงในรูปวงจรสมมูลทางด้านไฟสลับ เนื่องจากการนำเสนอด้วยวงจรสมมูลนั้นต้องการความเป็นเชิงเส้นและความกะทัดรัดของแบบจำลอง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเลือกใช้แบบจำลองเหมาะสมกับโครงสร้างของวงจร และเพื่อความเหมาะสมและความสะดวกในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในระบบโดยเฉพาะกลไกของการมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างโหลดกับระบบส่งจ่าย จะแสดงวงจรสมมูลด้านไฟสลับในโดเมนความถี่เป็นแบบ Norton's Equivalent สำหรับแบบจำลองประเภทแอดมิตแทนซ์ และจะแสดงวงจรสมมูลเป็นแบบ Thevenin's Equivalent สำหรับแบบจำลองประเภทอิมพีแดนซ์

4.1 วงจรสมมูลที่สร้างจากแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์

รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบทั่วไปของวงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแส 3 เฟส ด้านไฟสลับในโดเมนความถี่ ซึ่งเป็นวงจรสมมูลที่สร้างจากแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ โดยที่องค์ประกอบของวงจรประกอบด้วย แอดมิตแทนซ์สมมูล Y_{Nk} และแหล่งจ่ายกระแสควบคุม (Controlled Current Source) I_{Nk}



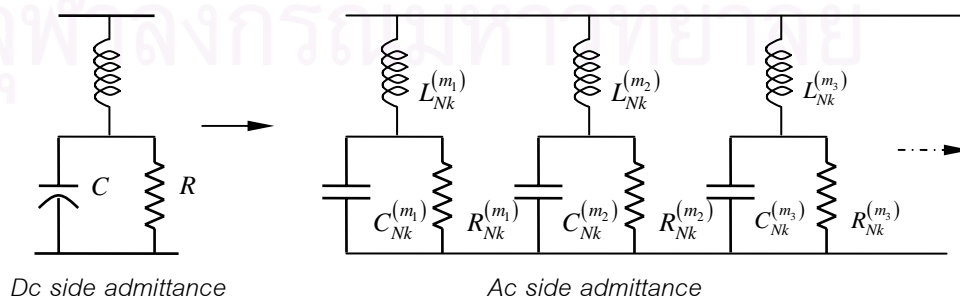
รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลของแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์

ส่วนแหล่งจ่ายกระแสควบคุม I_{Nk} นั้นเกิดจากจากแรงดันโหนด $\{V_{Lk}\}$ ในความถี่ต่างๆ เชื่อมรวมข้ามความถี่ทำให้เกิดแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก I_{Nk} ดังแสดงแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.1)

$$\begin{bmatrix} I_{N1} \\ I_{N2} \\ I_{N3} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Y_{F1,5} & Y_{F1,7} & \cdots \\ Y_{F5,1} & 0 & Y_{F5,7} & \cdots \\ Y_{F7,1} & Y_{F7,5} & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{L1} \\ V_{L5} \\ V_{L7} \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{B1,1} & Y_{B1,5} & Y_{B1,7} & \cdots \\ Y_{B5,1} & Y_{B5,5} & Y_{B5,7} & \cdots \\ Y_{B7,1} & Y_{B7,5} & Y_{B7,7} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{L1}^* \\ V_{L5}^* \\ V_{L7}^* \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (4.1) จะเห็นว่าสัญญาณที่ทำหน้าที่ควบคุมแหล่งจ่ายกระแสควบคุม I_{Nk} คือแรงดันโหนดในหลายความถี่ แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่วงจรเรียงกระแสใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่เป็นวงจรกรองสามารถประมาณ I_{Nk} จากแรงดันโหนดในความถี่มูลฐานเพียงความถี่เดียว V_{L1} เนื่องจากในกรณีที่โหนดแบบอินดักทีฟผลกระทบจากแรงดันในความถี่สูงที่มีต่อกระแสไฟตรงมีค่าน้อย และประกอบกับในกรณีที่วงจรด้านเข้าเป็นกึ่งแรงดันความเพี้ยนของแรงดันโหนดจะมีขนาดต่ำ ทำให้สามารถละเลยผลของแรงดันฮาร์มอนิกได้ ดังนั้น I_{Nk} ในสมการที่ (4.1) จึงสามารถประมาณได้เป็นสมการที่ (4.2) ทำให้วงจรสมมูลมีความเรียบง่ายมากขึ้น

$$\begin{bmatrix} I_{N1} \\ I_{N5} \\ I_{N7} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y_{F5,1} \\ Y_{F7,1} \\ \vdots \end{bmatrix} V_{L1} + \begin{bmatrix} Y_{B1,1} \\ Y_{B5,1} \\ Y_{B7,1} \\ \vdots \end{bmatrix} V_{L1}^* \quad (4.2)$$



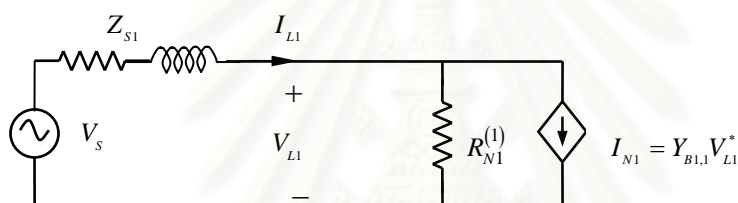
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างโครงสร้างของแอดมิตแทนซ์สมมูล Y_{Nk}

รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นตัวอย่างโครงสร้างของแอดมิตแทนซ์สมมูล Y_{Nk} ที่ได้จากการลู่เลียนโครงสร้างของแอดมิตแทนซ์ทางด้านไฟตรงและโครงสร้างของ Y_{Nk} จะมีลักษณะของโครงสร้างเดียวกันที่ขนานกันเป็นอนันต์ชุด แต่อย่างไรก็ตามขนาดของแอดมิตแทนซ์ในแต่ละกิ่งมีค่าไม่เท่ากันทำให้สามารถที่จะลดจำนวนกิ่งที่ต้องพิจารณาลงได้ ด้วยการละเลยกิ่งที่มีกระแสไหลน้อยและคงไว้เฉพาะกิ่งที่มีความสำคัญ ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นองค์ประกอบของ Y_{Nk} สามารถคำนวณได้จากค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบด้านไฟตรงและสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันการสวิตช์ดังแสดงในสมการที่ (4.3) ถึง (4.5)

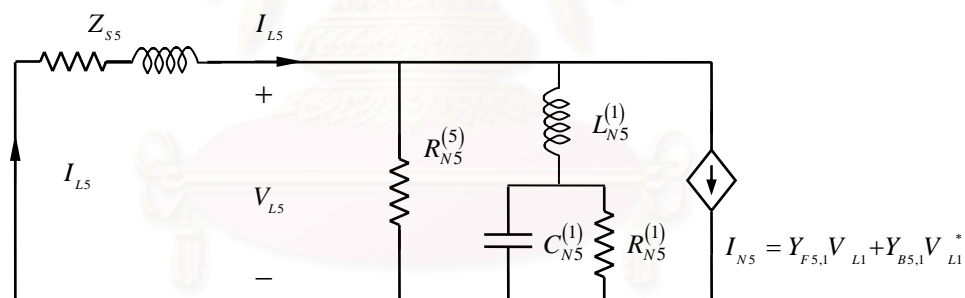
$$R_{Nk}^{(m)} = \frac{R}{3C_m C_m^*} \quad (4.3)$$

$$L_{Nk}^{(m)} = \frac{L}{3C_m C_m^*} \frac{(k-m)}{k} \quad (4.4)$$

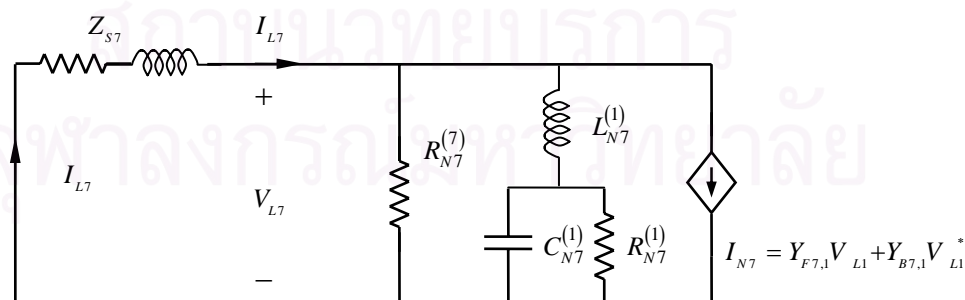
$$C_{Nk}^{(m)} = 3C_m C_m^* C \frac{(k-m)}{k} \quad (4.5)$$



Equivalent Circuit for Fundamental Component



Equivalent Circuit for 5th Harmonic Component



Equivalent Circuit for 7th Harmonic Component

รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลที่ประมาณจากเทอมที่สำคัญของความถี่มูลฐาน และความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 ตามลำดับ

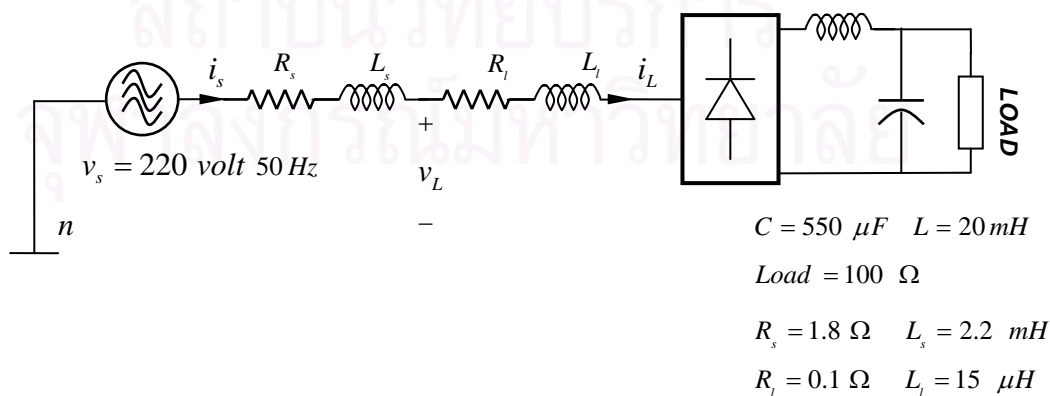
วงจรมุมในรูปที่ 4.3 ได้จากการประมาณส่วนของ Y_{Nk} และคงเหลือไว้เฉพาะเทอมที่สำคัญทำให้วงจรมุมกะทัดรัดขึ้นและเกิดความสะดวกในการนำไปใช้งานแต่ยังคงมีความถูกต้องอยู่ องค์ประกอบของวงจรมุมทั้ง 2 ส่วนสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ เมื่อทราบพารามิเตอร์ขององค์ประกอบวงจรด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสและจุดทำงานของระบบซึ่งจะทำให้ทราบค่ามุมเริ่มนำกระแสของไดโอดซึ่งโดยทั่วไปค่านี้อาจได้มาจากการวัดจากการจำลองเชิงเวลาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หรืออาจจะประมาณจากข้อมูลทางสถิติ เมื่อนำวงจรมุมของวงจรเรียงกระแสมาแสดงร่วมกับวงจรมุมของระบบส่งจ่ายก็จะได้วงจรมุมรวมของระบบแสดงในรูปที่ 4.3 ลักษณะเด่นของแบบจำลองที่นำเสนอคือสามารถระบุรายละเอียดได้ทั้งขนาดและโครงสร้างของพารามิเตอร์ที่เป็นองค์ประกอบของ Y_{Nk} และสามารถแสดงค่าที่แน่นอนและพฤติกรรมของแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งแบบจำลองที่ใช้กันอยู่ทั่วไปไม่สามารถให้รายละเอียดดังกล่าวได้ วงจรมุมที่นำเสนอจึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในการคาดการณ์พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของระบบได้ดีกว่าแบบเดิม

4.2 การวิเคราะห์ระบบด้วยวงจรมุมแบบแอดมิตแตนซ์

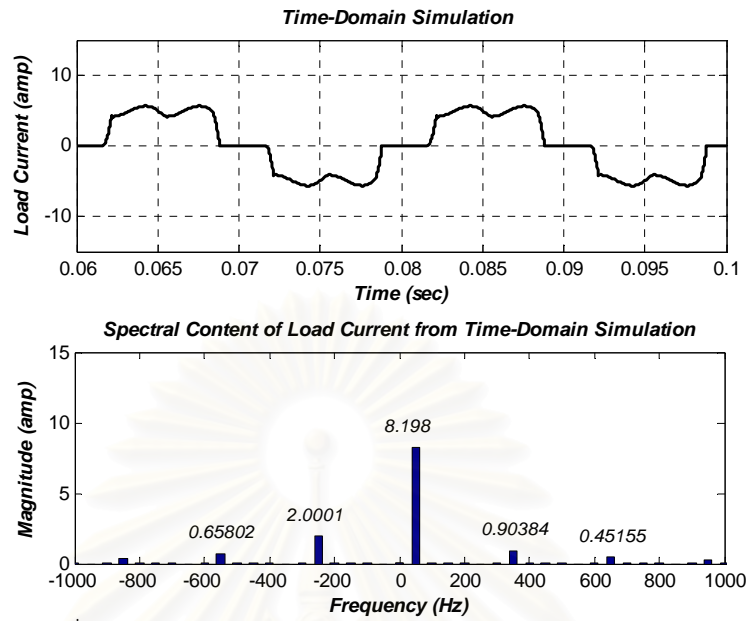
การวิเคราะห์พฤติกรรมด้วยวงจรมุมจะทำโดยแยกเป็นกรณีตามประเภทของวงจรองที่ติดตั้งอยู่ในระบบ เพื่อดูพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของระบบเมื่อติดตั้งวงจรองประเภทต่างๆได้อย่างชัดเจน โดยจะแสดงวิธีการวิเคราะห์ระบบด้วยวงจรมุมที่นำเสนอ แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้กับการจำลองเชิงเวลาและจากการทดลอง

4.2.1 กรณีระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหลดแบบอินดักทีฟเมื่อไม่มีการติดตั้งวงจรอง

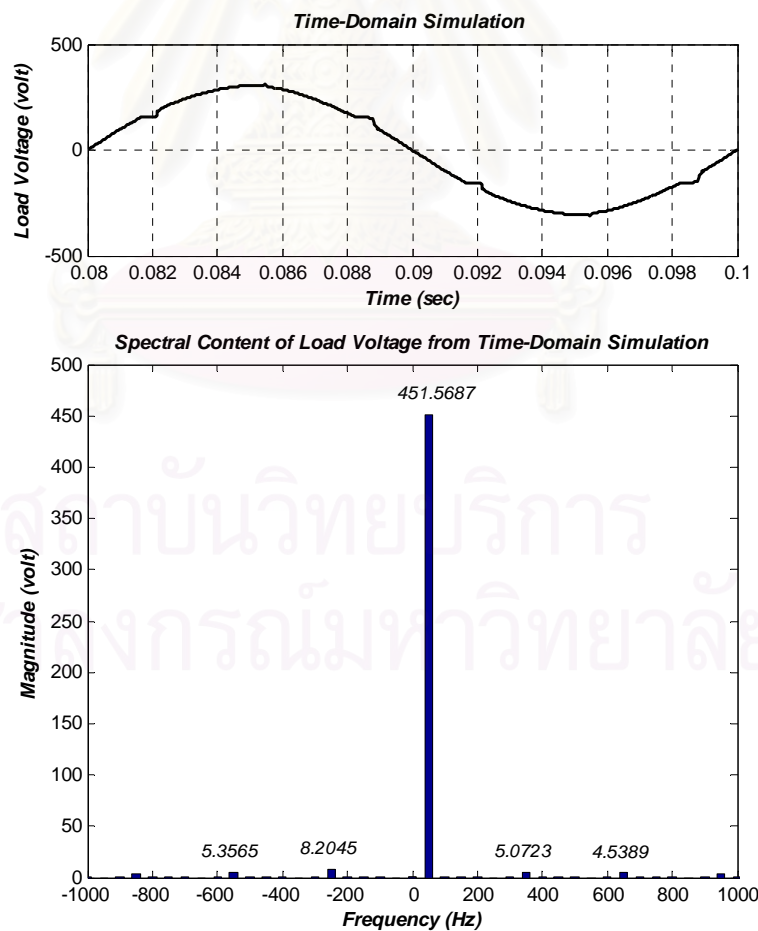
ตัวอย่างแสดงการคำนวณด้วยวงจรมุม ในรูปที่ 4.4 เป็นระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรองต่อกับโหลดความต้านทาน รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์แสดงในรูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันเฟสของ v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ แสดงในรูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันและกระแสโหลดจากการทดลองกับระบบจริงแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 และวงจรมุมของระบบแสดงในรูปที่ 4.9



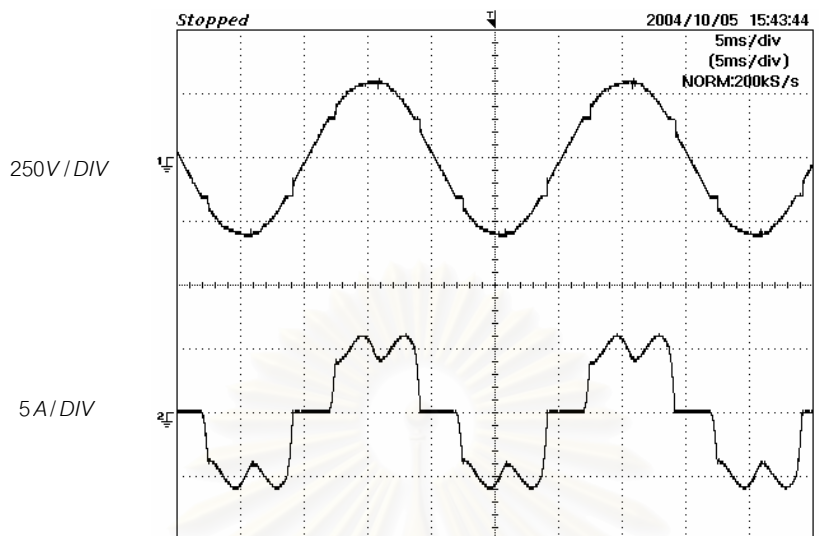
รูปที่ 4.4 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรองกับโหลดความต้านทาน



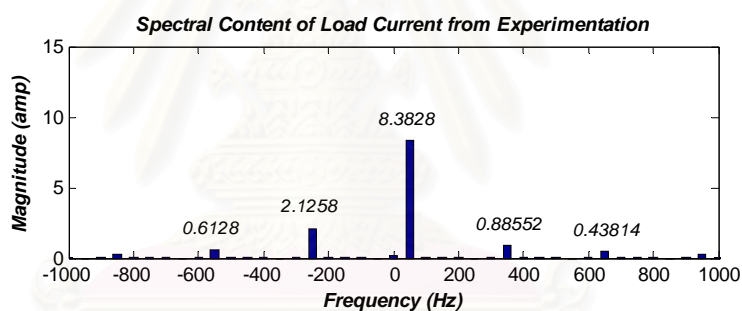
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.4



รูปที่ 4.6 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.4



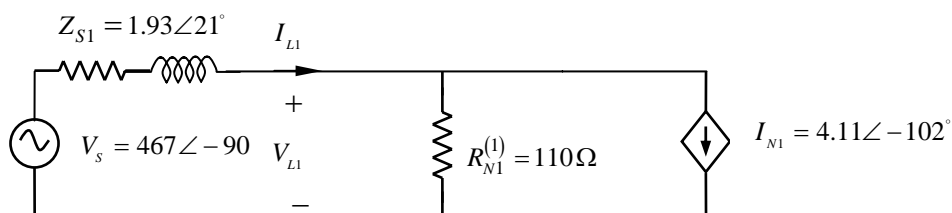
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด และกระแสโหลด จากการทดลองของรูป 4.4



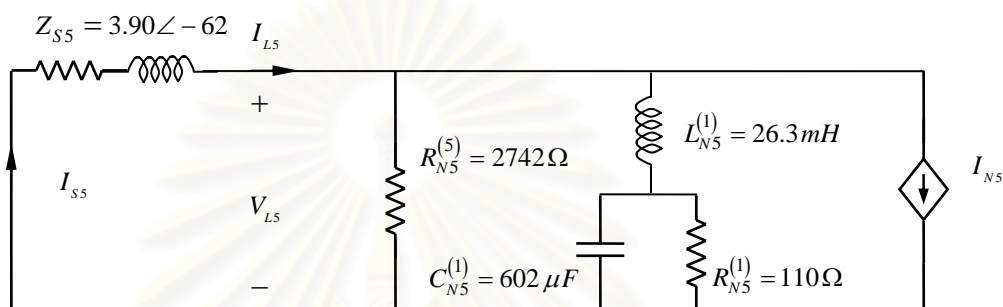
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด i_L จากการทดลองของรูป 4.4

จากวงจรมุมูลในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อทราบพารามิเตอร์ขององค์ประกอบวงจรด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสและจุดทำงานของระบบ จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบของ Y_{Nk} ได้ จากสมการที่ (4.1) ถึง (4.3) การคำนวณกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้วงจรมุมูลแสดงในสมการที่ (4.6)

$$I_{Lk} = \frac{Z_{Nk}}{Z_{Nk} + Z_{Sk}} I_{Nk} \tag{4.6}$$

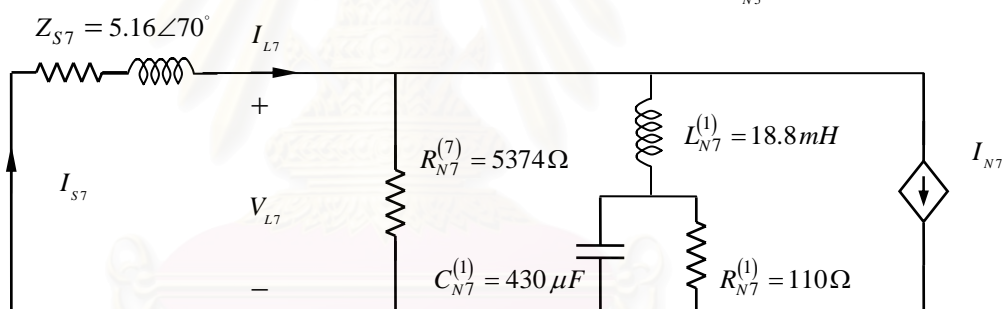


Equivalent Circuit for Fundamental Component

Equivalent Circuit for 5th Harmonic Component

$$I_{N5} = 2.12 \angle -40^\circ$$

$$Z_{N5} = 40.23 \angle -89^\circ$$

Equivalent Circuit for 7th Harmonic Component

$$I_{N7} = 0.95 \angle 84^\circ$$

$$Z_{N7} = 39.71 \angle 89^\circ$$

รูปที่ 4.9 วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบแอดมิตแทนซ์ของระบบในรูปที่ 4.4

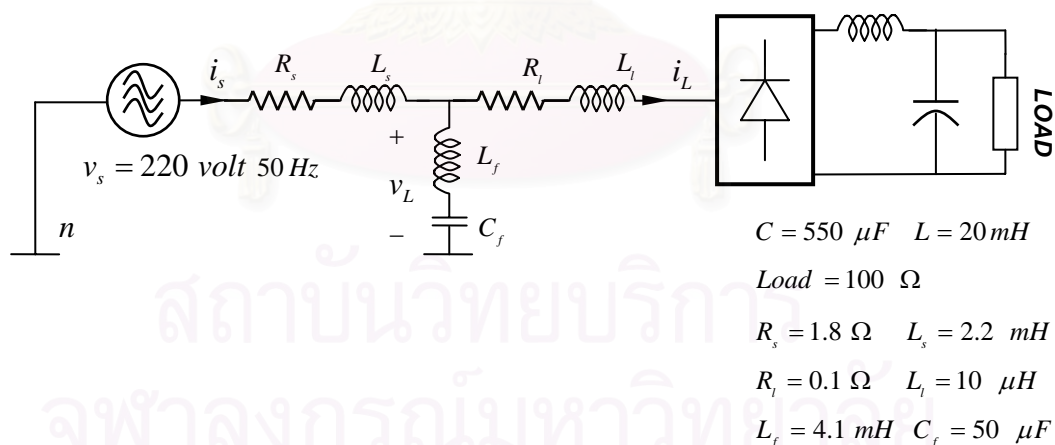
	แหล่งจ่ายกระแส ฮาร์มอนิก	กระแสไหล จากคำนวณ	กระแสไหล จากSimulation	กระแสไหล จากการทดลอง	ความผิดพลาด
ลำดับที่ 5	2.12	1.95	2.00	2.13	2.50%
ลำดับที่ 7	0.95	0.84	0.90	0.89	6.67%

การเปรียบเทียบผลของสเปกตรัมของกระแสไหลที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาในรูปที่ 4.5 ผลที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 4.8 และผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวงจรสมมูลแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่ามีความสอดคล้องกันดีทั้ง 3 กรณี จึงสรุปได้ว่าวงจรสมมูลที่ได้นำเสนอมีความถูกต้องสูงที่สามารถที่จะถูกนำไปใช้ในการ

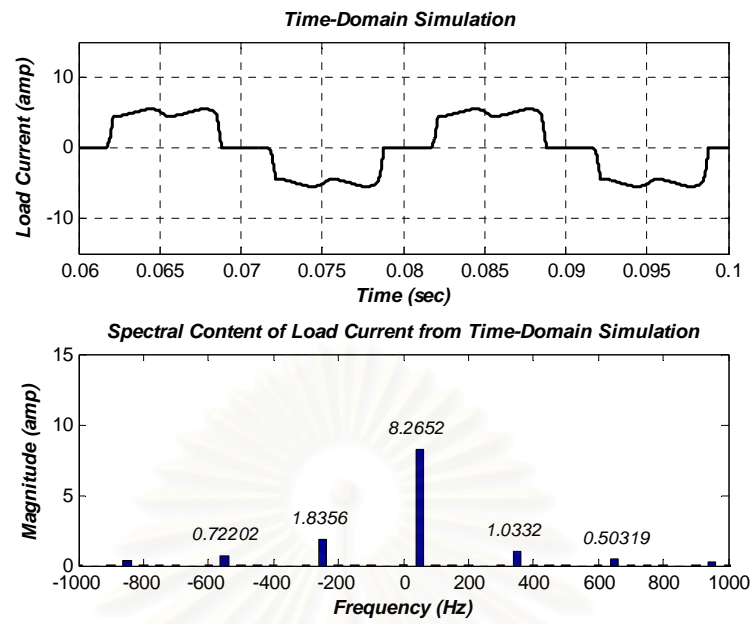
คาดการณ์พฤติกรรมของระบบเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้าได้ จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก I_{Nk} ขึ้นอยู่กับสัญญาณควบคุม V_{Li} เพียงสัญญาณเดียวสามารถลดผลของแรงดันฮาร์มอนิกได้ซึ่งมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับแรงดันที่ความถี่มูลฐาน ทำให้พฤติกรรมของแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก I_{Nk} ค่อนข้างจะคงที่ แม้ว่าจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้าเพิ่มเติมก็ตาม เพราะว่าการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้าจะไม่ทำให้แรงดันโหนดที่ความถี่มูลฐาน V_{Li} เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหนดในฮาร์มอนิกต่างๆที่อาจจะเกิดขึ้น จะมาจากอิมพีแดนซ์ที่เพิ่มเข้ามาในวงจรแล้วทำให้สัดส่วนของอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะแสดงให้เห็นในตัวอย่างต่อไป

4.2.2 กรณีระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหลดแบบอินดักทีฟเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนาน

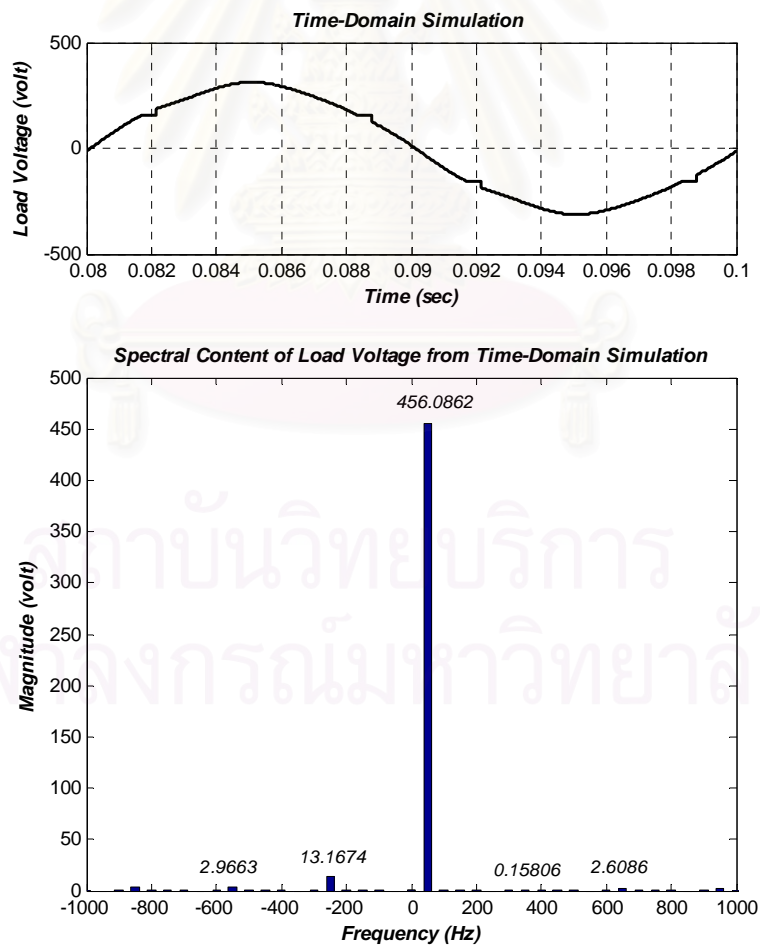
ในรูปที่ 4.10 เป็นตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟสที่มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองต่อกับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานที่ความถี่ 350 Hz (อันดับที่ 7) รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์แสดงในรูปที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดันเฟสของ v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์แสดงในรูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันและกระแสโหลดจากการทดลองกับระบบจริงแสดงในรูปที่ 4.13 และแสดงวงจรสมมูลในรูปที่ 4.15



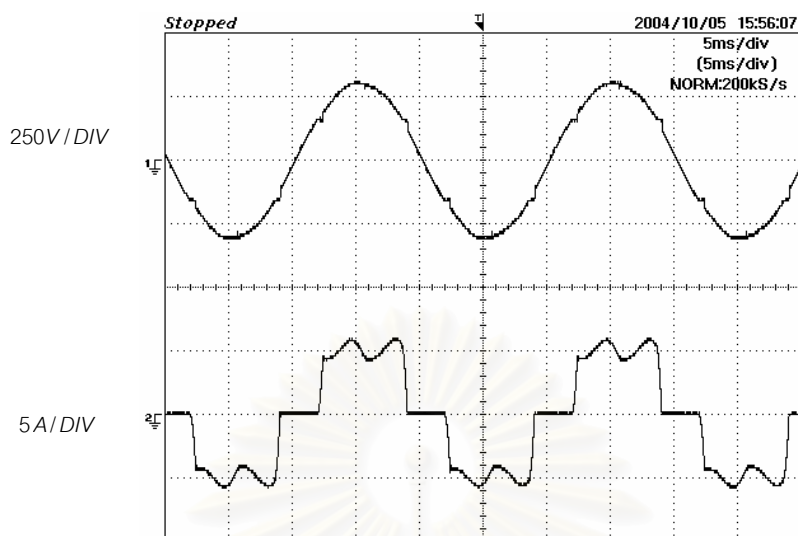
รูปที่ 4.10 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองกับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานอันดับที่ 7



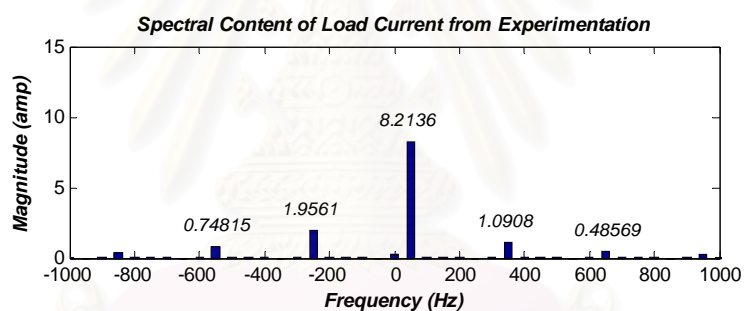
รูปที่ 4.11 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.10



รูปที่ 4.12 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.10



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด และกระแสโหลด จากการทดลอง ของรูป 4.10



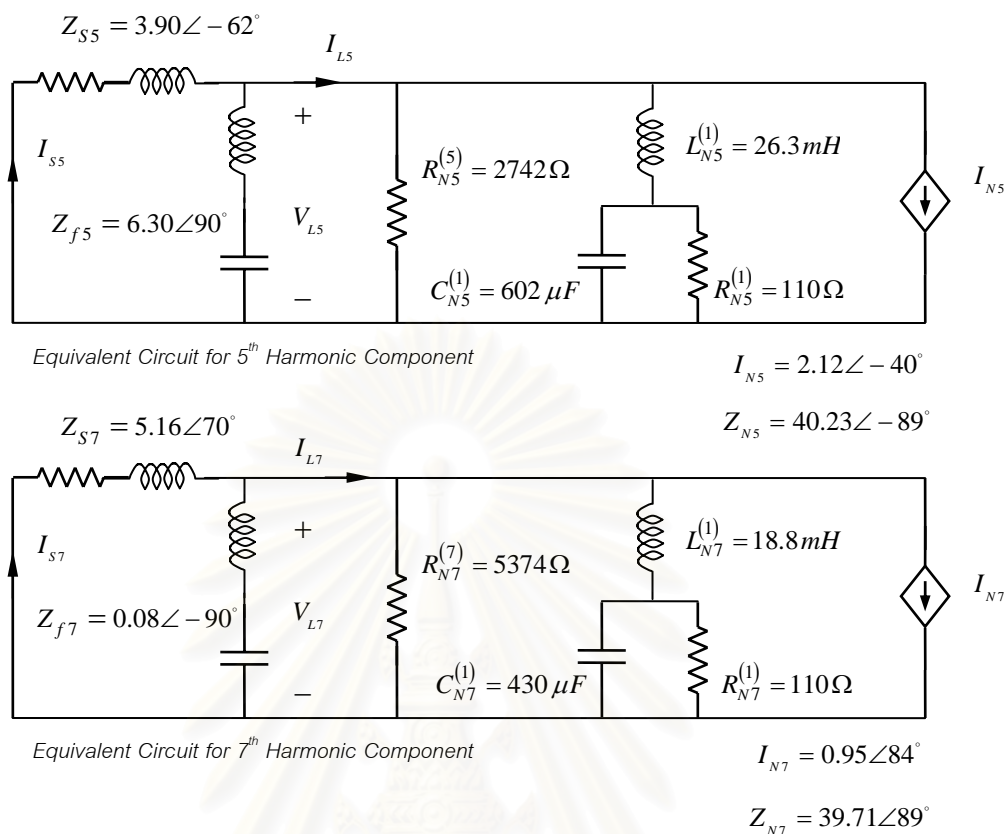
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมของสเปกตรัมของกระแสโหลด i_L จากการทดลอง ของรูป 4.10

การคำนวณกระแสฮาร์โมนิกโดยใช้วงจรมุมแสดงในสมการที่ (4.7)

$$I_{Lk} = \frac{Z_{Nk} Z_{Sk} + Z_{Nk} Z_{fk}}{Z_{fk} Z_{Sk} + Z_{Nk} Z_{Sk} + Z_{Nk} Z_{fk}} I_{Nk} \quad (4.7)$$

ในกรณีที่มีการติดตั้งวงจรกรองในความถี่ใดจะทำให้ฮาร์มอนิกในความถี่นั้นมีความถี่ $Z_{fk} \approx 0 \Omega$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.7) จะได้ว่า

$$I_{Lk} \approx I_{Nk} = Y_{Fk,1} V_{L1} + Y_{Bk,1} V_{L1}^* \quad (4.8)$$



รูปที่ 4.15 วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบแอดมิตแทนซ์ของระบบในรูปที่ 4.10

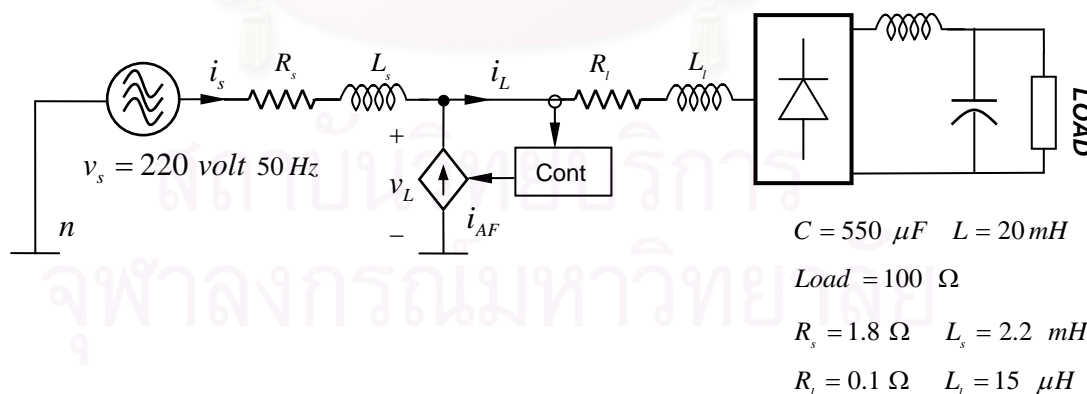
	แหล่งจ่ายกระแส ฮาร์มอนิก I_{Nk}	กระแสไหล จากคำนวณ	กระแสไหลจาก Simulation	กระแสไหล จากทดลอง	ความผิดพลาด
ลำดับที่ 5	2.12	1.92	1.84	1.96	4.35%
ลำดับที่ 7	0.95	0.95	1.03	1.09	7.77%

ในกรณีติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานอันดับที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบผลของแรงดันโหนดก่อนติดตั้งวงจรกรองในรูปที่ 4.6 และแรงดันโหนดหลังติดตั้งวงจรกรองในรูปที่ 4.12 พบว่าแรงดันโหนดที่ความถี่มูลฐานเปลี่ยนแปลงไม่มากไม่เกิน 2% และแรงดันฮาร์มอนิกยังคงมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับแรงดันโหนดที่ความถี่มูลฐาน ดังนั้นการติดตั้งวงจรกรองจึงไม่ทำให้แหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเปลี่ยนแปลง จึงสามารถใช้ค่าองค์ประกอบเดิมในการคำนวณด้วยวงจรสมมูล จากรูปที่ 4.15 การติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานอันดับที่ 7 จะส่งผลให้อิมพีแดนซ์ทางด้านแหล่งจ่ายของวงจรสมมูลลำดับที่ 7 ถูกลดวงจรเป็นศูนย์โอห์มซึ่งจะทำให้กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ทั้งหมดไหลออกมาทางด้านแหล่งจ่ายซึ่งจะสังเกตได้จากกระแสไหลในฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 มีขนาดเท่ากับกระแสจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกดังแสดงในตารางที่ 2 พฤติกรรมนี้ชี้ให้เห็นว่าหลังจากติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานกระแสไหลจะเพิ่มขึ้นไม่เกินแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่ถูกควบคุมด้วยแรงดันโหนดดังแสดงในสมการที่ (4.8)

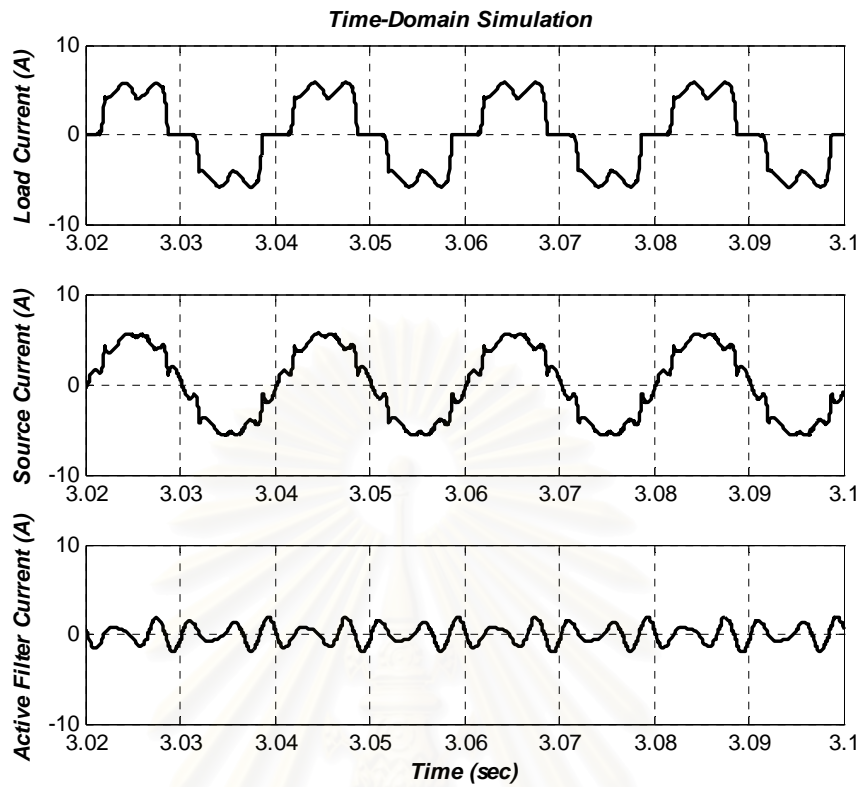
จากสมการที่ (4.8) จะเห็นว่ากระแสจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดจะไหลผ่านวงจรกรอง แต่อย่างไรก็ตามในการกำหนดพิกัดกระแสของวงจรกรองค่อนข้างลำบาก เนื่องจากขนาดของอิมพีแดนซ์ในค่าความถี่ที่ถูกกรองมีค่าต่ำ ทำให้กระแสจากแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกอื่นๆ ที่ความถี่เดียวกันในระบบทั้งหมดไหลมารวมกันที่วงจรกรองได้ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดพิกัดของกระแสได้ ดังนั้นในการออกแบบต้องคำนึงถึงปัจจัยนี้ด้วย

4.2.3 กรณีระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหลดแบบอินดักทีฟเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน

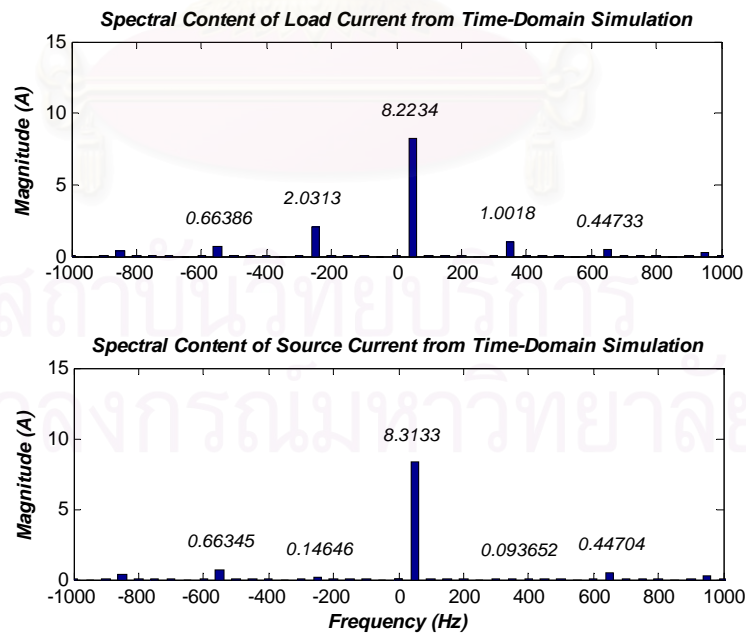
ระบบที่แสดงในรูปที่ 4.16 เป็นตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองต่อกับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานที่เลือกขจัดกระแสฮาร์มอนิกในอันดับที่ 5 และ 7 ซึ่งเป็นกรณีตัวอย่างในการศึกษาพฤติกรรมของโหลดแบบอินดักทีฟเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน รูปที่ 4.17 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_s และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสที่วงจรกรองที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาตามลำดับ รูปที่ 4.18 แสดงสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_s ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาตามลำดับ รูปที่ 4.19 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลา รูปที่ 4.20 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด และกระแสโหลดและกระแสแหล่งจ่าย ที่ได้จากการทดลองตามลำดับ รูปที่ 4.21 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด กระแสแหล่งจ่าย และกระแสวงจรกรองที่ได้จากการทดลองตามลำดับ รูปที่ 4.22 แสดงสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_s ที่ได้จากการทดลองตามลำดับ



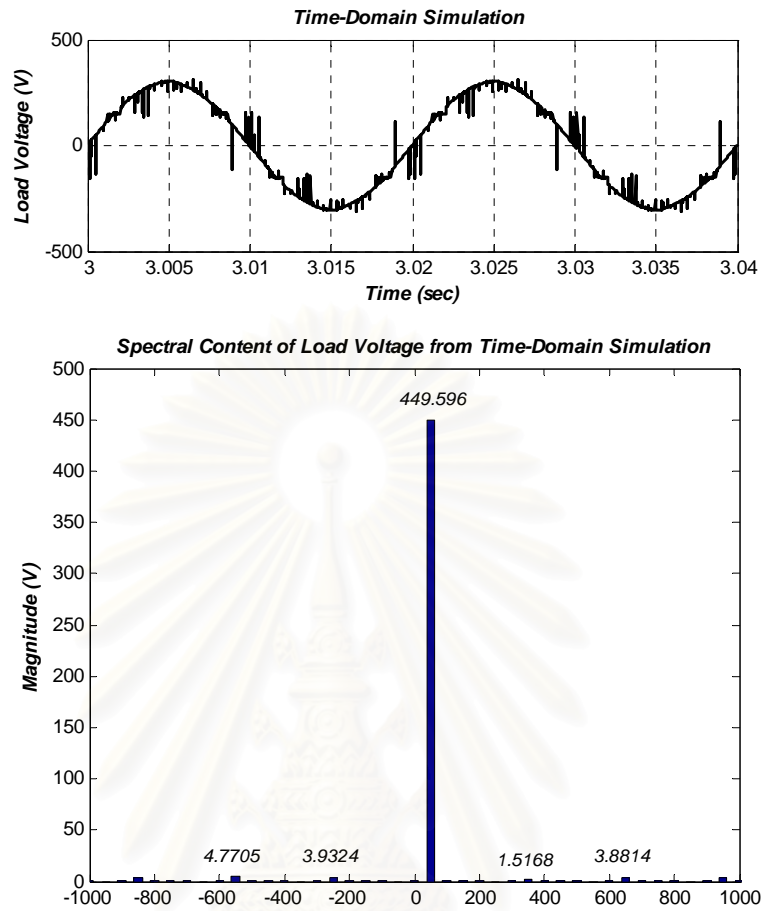
รูปที่ 4.16 ระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองกับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน



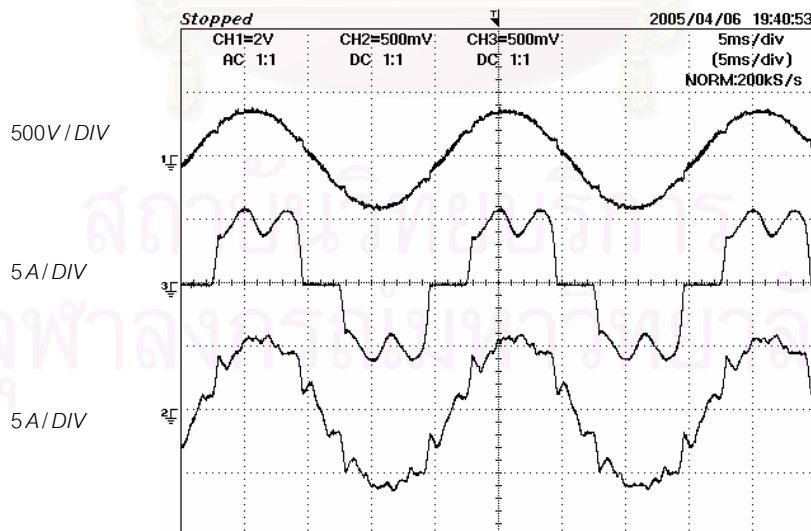
รูปที่ 4.17 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสที่วงจรรองที่ได้จากการจำลองเชิงเวลา ตามลำดับของรูป 4.16



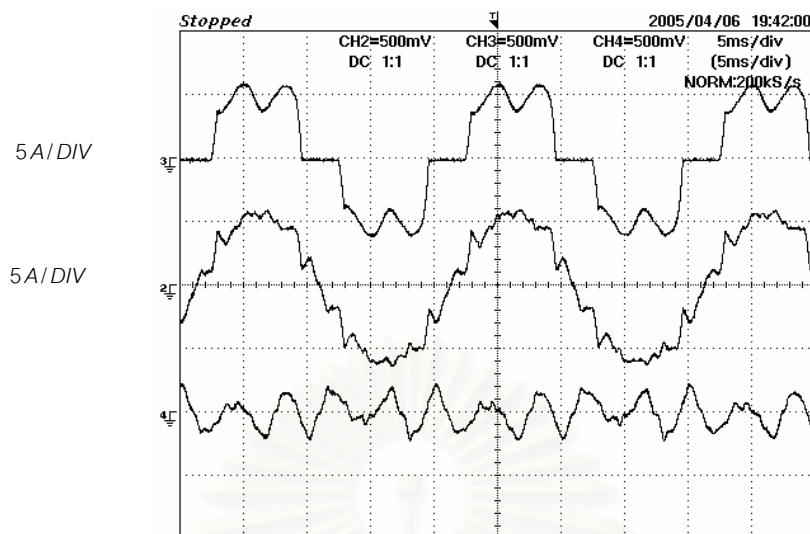
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S ตามลำดับ จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 4.16



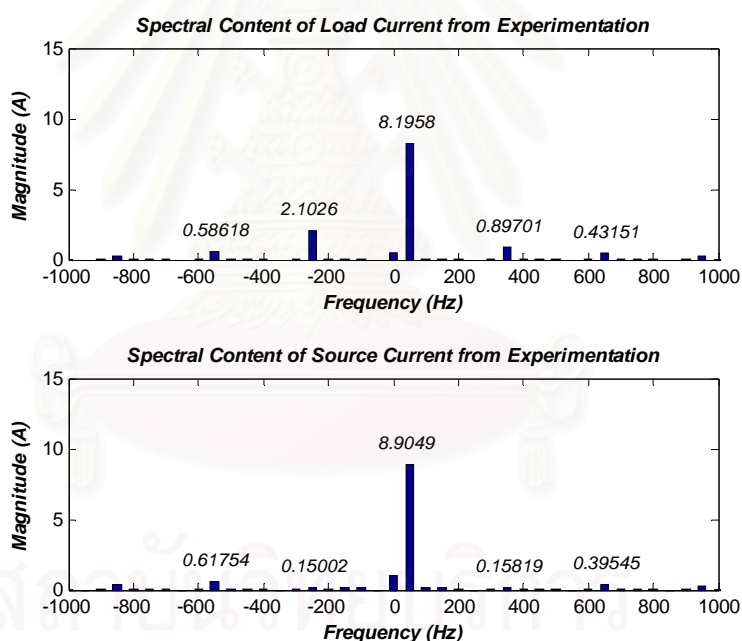
รูปที่ 4.19 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.16



รูปที่ 4.20 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด และกระแสโหลดและกระแสแหล่งจ่าย จากการทดลองของรูป



รูปที่ 4.21 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลดและกระแสแหล่งจ่ายและกระแสจากวงจรกรอง จากการทดลองของรูป 4.16



รูปที่ 4.22 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสแหล่งจ่าย i_s ที่ได้จากการทดลองตามลำดับของรูป 4.16

พิจารณาผลการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานจากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.23 แหล่งจ่ายกระแสควบคุม I_{AFk} ซึ่งจะสร้างกระแสเพื่อชดเชยกระแสโหลด I_{Lk} ที่ตรวจจับมาในแต่ละฮาร์มอนิก ดังนั้นจากหลักการทำงานวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน จะพบว่าเฉพาะวงจรทางด้านที่ถูกตรวจจับกระแสเท่านั้นที่จะเห็นวงจรกรองเสมือนถูกตัดวงจรซึ่งในกรณีนี้คือทางด้านโหลด ส่วนด้านแหล่งจ่ายจะเห็นวงจรกรองเปิดวงจร ทำให้วงจรกรองแอกทีฟสามารถชดเชยฮาร์มอนิกโดยเลือกแหล่งจ่ายได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหนือกว่าจากวงจรกรองพาสซีฟ จากวงจรสมมูลจะได้ว่า

$$I_{AFk} = GI_{Lk} \quad (4.9)$$

$$I_{Lk} = \frac{Z_{Nk}}{Z_{Nk} + Z_{Sk}} I_{Nk} + \frac{Z_{Sk}}{Z_{Nk} + Z_{Sk}} GI_{Lk} \quad (4.10)$$

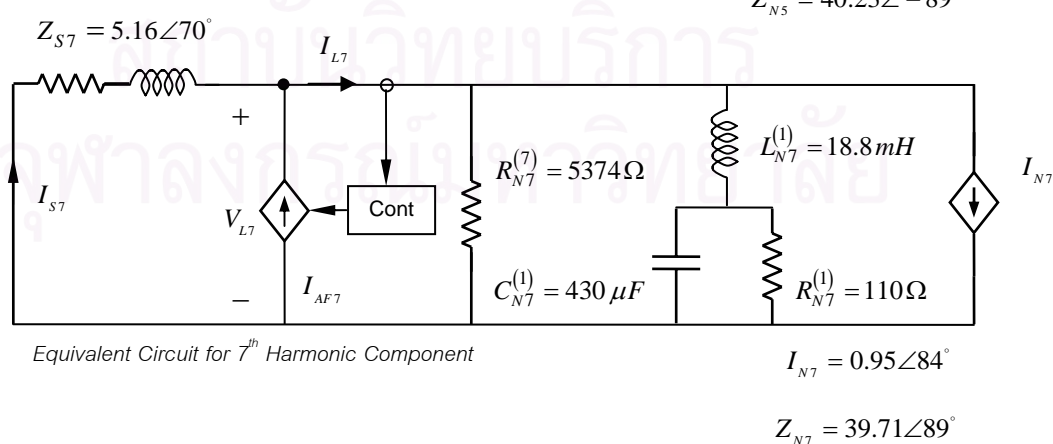
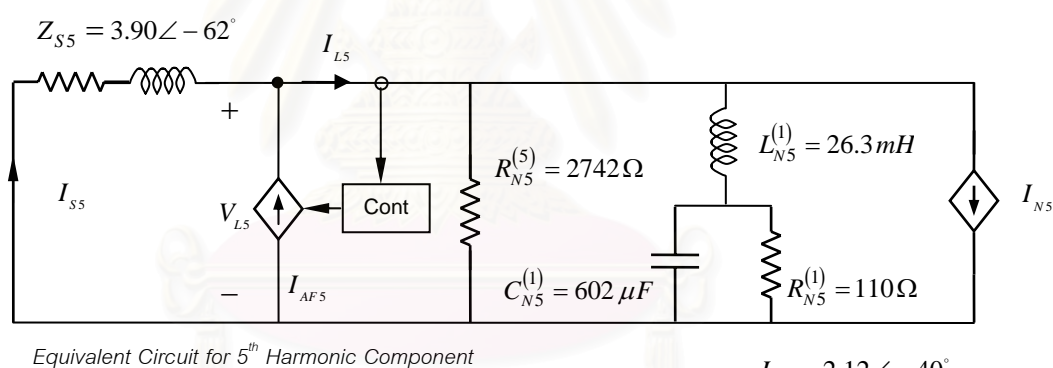
$$I_{Sk} = \frac{Z_{Nk}}{Z_{Nk} + Z_{Sk}} I_{Nk} - \frac{Z_{Nk}}{Z_{Nk} + Z_{Sk}} GI_{Lk} \quad (4.11)$$

โดยที่ G คือฟังก์ชันคอนย่ายของวงจรรองแอกทีฟ

จากสมการที่ (4.9) ในกรณีอุดมคติ $G=1$ ทำให้กระแสจรรองแอกทีฟมีค่าเท่ากับกระแสโหลด และจากสมการที่ (4.10) กระแสจรรองแอกทีฟจะมีค่าเท่ากับกระแสจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกด้วย ดังแสดงในสมการที่ (4.12)

$$I_{AFk} = I_{Lk} = I_{Nk} \quad (4.12)$$

จะเห็นว่ากระแสจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดจะไหลผ่านวงจรรองแอกทีฟ และจากสมการที่ (4.11) กระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายจะเป็นศูนย์



รูปที่ 4.23 วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบแอดมิตแทนซ์ของระบบในรูปที่ 4.16

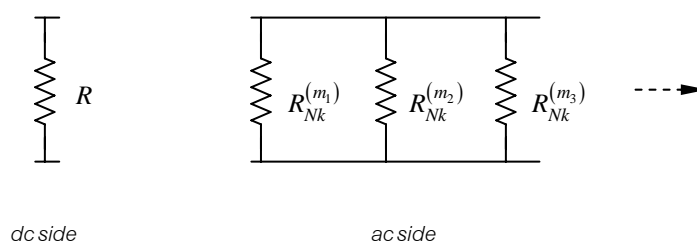
	แหล่งจ่ายกระแส ฮาร์มอนิก I_{Nk}	กระแสไหลออกจาก การคำนวณ	กระแสไหลจาก Simulation	กระแสไหลจาก การทดลอง	ความผิดพลาด
ลำดับที่ 5	2.12	2.12	2.03	2.10	4.43%
ลำดับที่ 7	0.95	0.95	1.00	0.90	5.00%

เนื่องจากการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟไม่ทำให้แรงดันโหนดที่ความถี่มูลฐานเปลี่ยนแปลงทำให้แหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก I_{Nk} ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมก่อนติดตั้งวงจรกรอง และสังเกตว่ากระแสไหล I_{Lk} ในตารางที่ 4.3 เพิ่มขึ้นไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสไหล I_{Lk} ในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นค่าก่อนการติดตั้งวงจรกรองเนื่องจากสัดส่วนของอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{Nk} ของโหนดมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย Z_{sk} จึงทำให้กระแสส่วนมากจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกไหลไปทางด้านแหล่งจ่ายอยู่แล้ว ดังนั้นเมื่อติดตั้งวงจรกรอง กระแสในส่วนที่เดิมเคยไหลผ่านอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{Nk} จึงไหลออกมาภายนอกด้วย อย่างไรก็ตามค่านี้มีขนาดเล็กจึงทำให้กระแสไหล I_{Lk} เพิ่มขึ้นไม่ พิกัด VA ของวงจรกรองแอกทีฟที่ต้องการสำหรับการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกก็มีค่าไม่สูงมากนัก โดยเมื่อเปรียบเทียบผลของกระแสไหลที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 4.3 กับผลที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 4.22 พบว่ามีความสอดคล้องเช่นกัน

พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในระบบที่อธิบายด้วยวงจรสมมูลที่นำเสนอถือว่าความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับกรจาลองเชิงเวลา ทำให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานออกแบบและกำหนดพิกัด VA ของวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานได้

4.2.4 กรณีระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหนดความต้านทานเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน

จากวงจรสมมูลของแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ที่ได้นำเสนอ จะเห็นว่าสามารถใช้ในการอธิบายหรือคาดการณ์พฤติกรรมของระบบได้ดีกับโครงสร้างด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสที่มีตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ (โหนดแบบอินดักทีฟ) นำวงจรสมมูลของแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ไปใช้กับโครงสร้างวงจรเรียงกระแสที่มีโหนดเป็นความต้านทาน ก็พบว่าสามารถใช้ได้ดีกับวงจรเรียงกระแสที่ไม่มีวงจรกรองเช่นเดียวกัน ดังแสดงต่อไปนี้

รูปที่ 4.24 โครงสร้างของความต้านทานสมมูล R_{Nk}

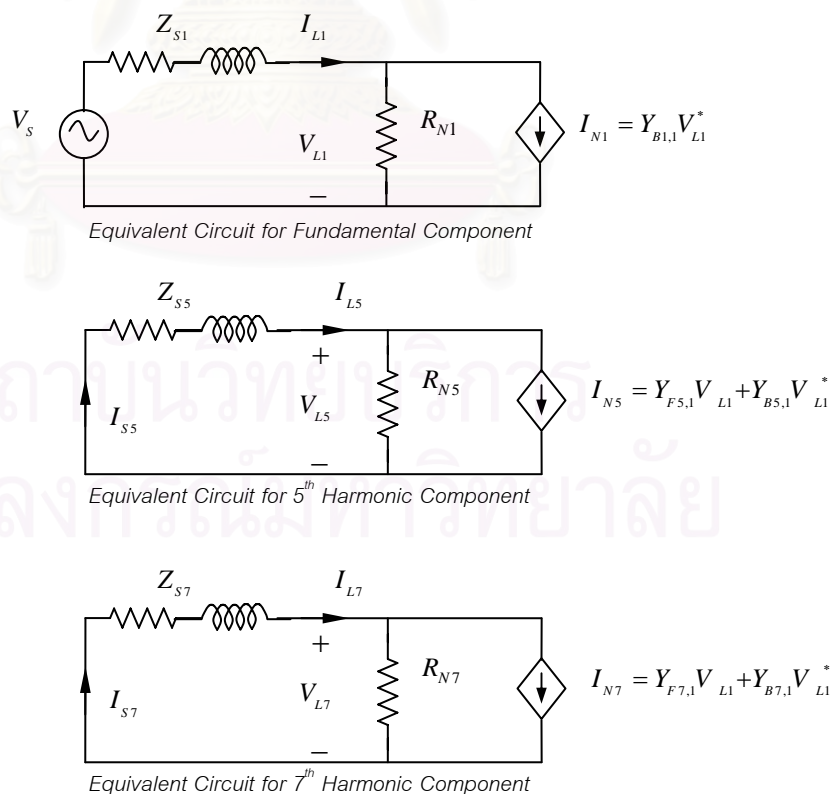
โครงสร้างของความต้านทานสมมูล R_{Nk} ที่แสดงในรูปที่ 4.24 ได้มาจากโครงสร้างของแอดมิตแทนซ์สมมูล Y_{Nk} ที่แสดงในรูปที่ 4.2 เราสามารถคำนวณค่าของความต้านทานสมมูล R_{Nk} ได้โดยอาศัยสมการที่ (4.3) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} R_{Nk} &= \sum_m R_{Nk}^{(m)} \\ &= \sum_m \frac{R}{3C_m C_m^*} = \frac{R}{3} \left(\frac{1}{C_1 C_1^*} + \frac{1}{C_5 C_5^*} + \frac{1}{C_7 C_7^*} + \dots \right) \end{aligned} \quad (4.13)$$

จากสมการที่ (4.13) จะเห็นว่าค่าของความต้านทานสมมูล R_{Nk} ในแต่ละฮาร์โมนิกมีค่าเท่ากันนั่นคือ

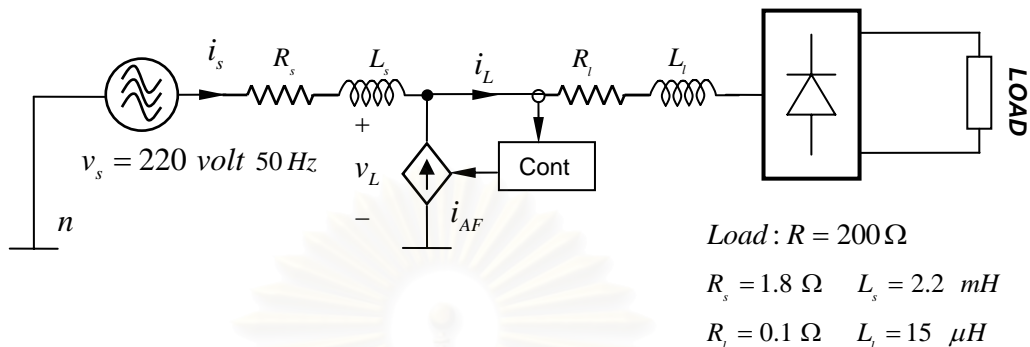
$$R_{N1} = R_{N5} = R_{N7} = \dots \quad (4.14)$$

ส่วนแหล่งจ่ายกระแสควบคุม I_{Nk} คำนวณได้จากสมการที่ (4.2) ดังนั้นเมื่อสามารถกำหนดค่าขององค์ประกอบวงจรสมมูลได้ครบถ้วนแล้วนำไปแสดงเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 4.25 จากวงจรสมมูลพบว่าพฤติกรรมของวงจรเรียงกระแสที่มีโหลดเป็นความต้านทานโดยที่ไม่มีวงจรรองด้านไฟตรงนั้น มีลักษณะคล้ายคลึงกับพฤติกรรมของวงจรเรียงกระแสในกรณีที่เป็นโหลดแบบอินดักทีฟ ดังแสดงในตัวอย่างการวิเคราะห์ระบบในรูปที่ 4.26



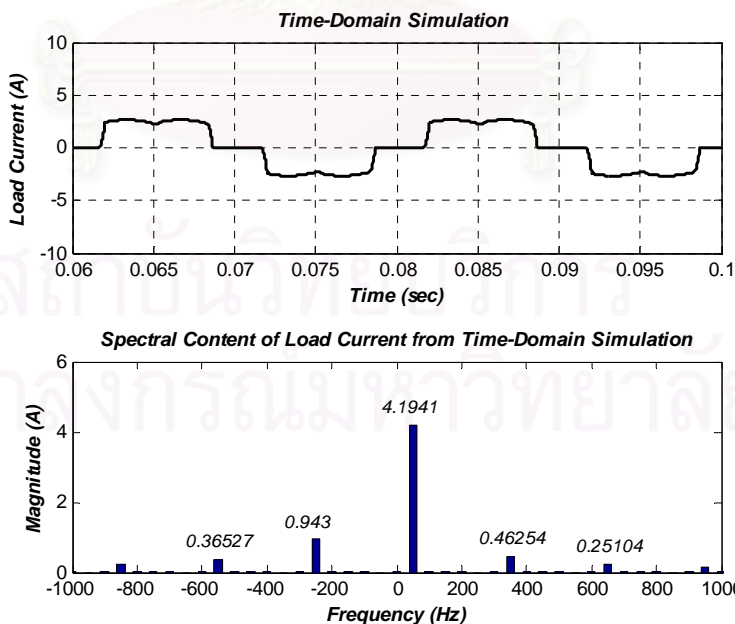
รูปที่ 4.25 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสที่มีโหลดเป็นความต้านทาน

ระบบในรูปที่ 4.26 เป็นตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่มีโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานโดยเลือกจัดฮาร์มอนิกเฉพาะในอันดับที่ 5 และ 7 เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบก่อนและหลังติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟด้วยวงจรสมมูลได้ผลดังต่อไปนี้

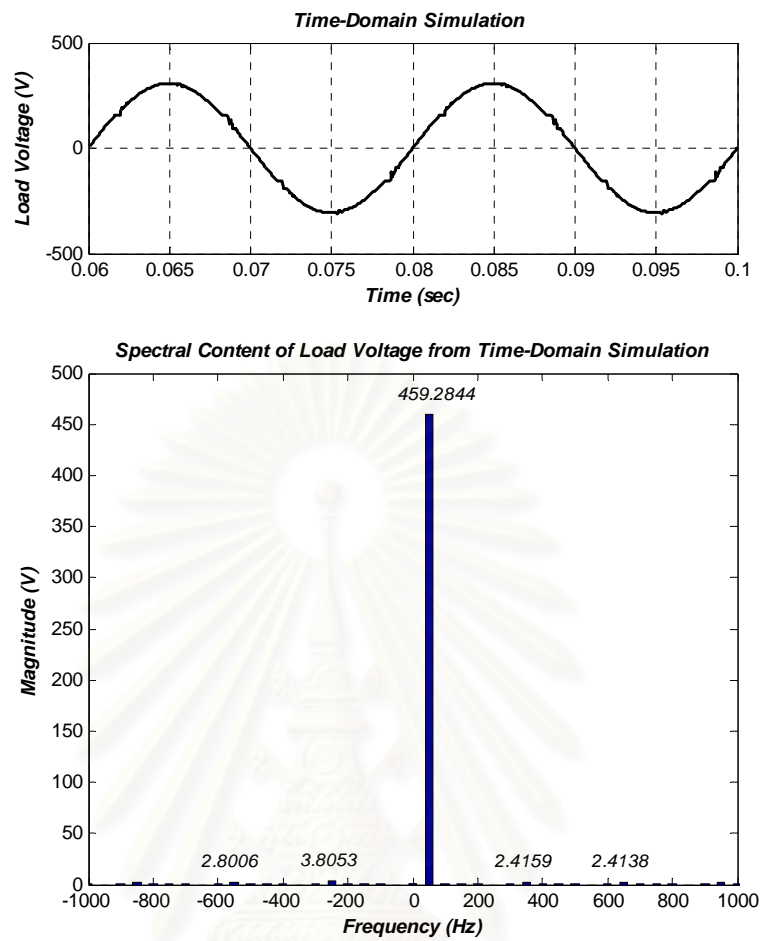


รูปที่ 4.26 ตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่มีโหลดความต้านทาน

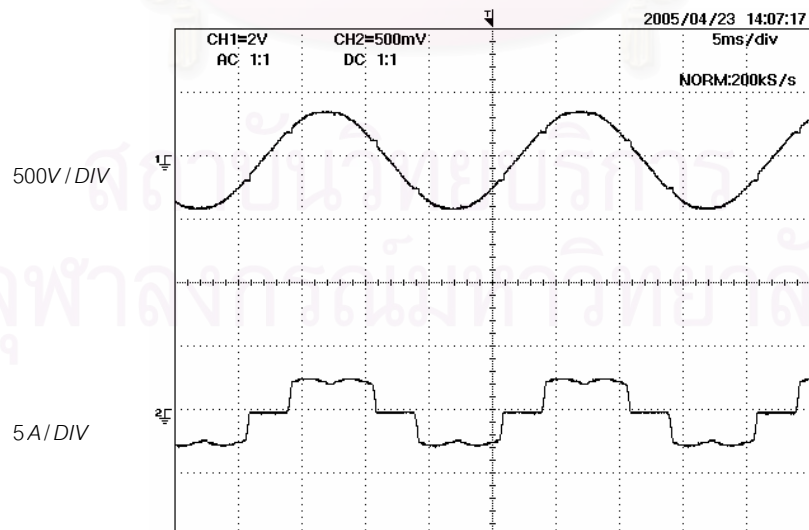
รูปที่ 4.27 ถึง 4.31 เป็นผลจากการจำลองเชิงเวลา รูปที่ 4.27 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ ก่อนติดตั้งวงจรกรอง รูปที่ 4.28 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ ก่อนติดตั้งวงจรกรอง และรูปที่ 4.31 แสดงวงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสที่มีโหลดเป็นความต้านทานก่อนติดตั้งวงจรกรอง รูปที่ 4.29 แสดงรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และกระแสโหลด i_L จากการทดลอง รูปที่ 4.30 แสดงสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสจากการทดลอง



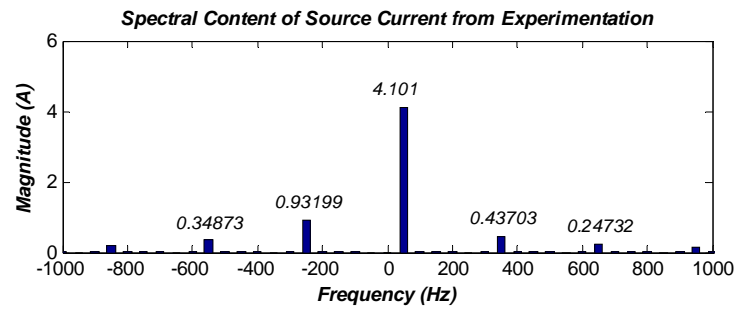
รูปที่ 4.27 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ ของรูป 4.26 ก่อนติดตั้งวงจรกรอง



รูปที่ 4.28 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปกตรัมของสเปกตรัมของรูป 4.26 ก่อนติดตั้งวงจร

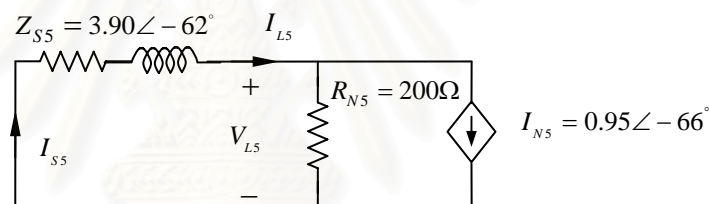


รูปที่ 4.29 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด และกระแสโหลด จากการทดลองของรูป 4.26 ก่อนติดตั้งวงจร

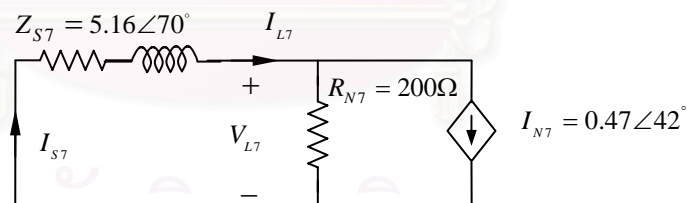


รูปที่ 4.30 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสไหลด i_L จากการทดลอง ของรูป 4.26 ก่อนติดตั้งวงจรกรอง

พิจารณาวงจรสมมูลในรูปที่ 4.31 พบว่าทั้งวงจรสมมูลฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 มีสัดส่วนในส่วนของอิมพีแดนซ์สมมูล R_{Nk} ที่มีขนาดใหญ่กว่าอิมพีแดนซ์ด้านแหล่งจ่ายมาก ส่งผลให้กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก I_{Nk} เกือบทั้งหมดไหลออกไปทางด้านแหล่งจ่าย ดังนั้นสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสไหลด i_L ในแต่ละฮาร์มอนิกจะมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในวงจรสมมูล

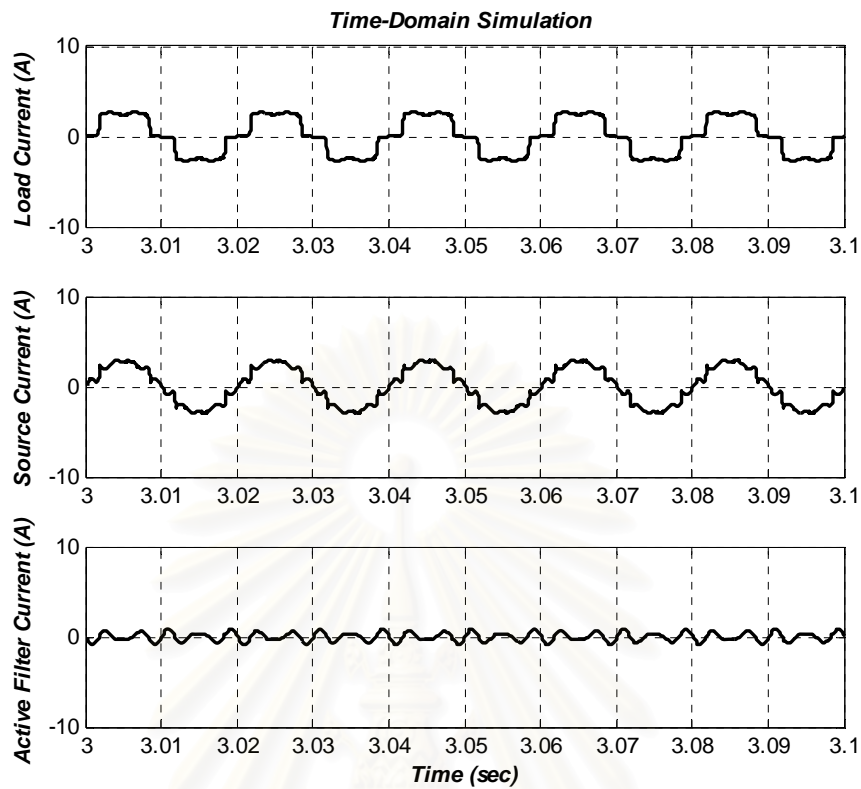


Equivalent Circuit for 5th Harmonic Component

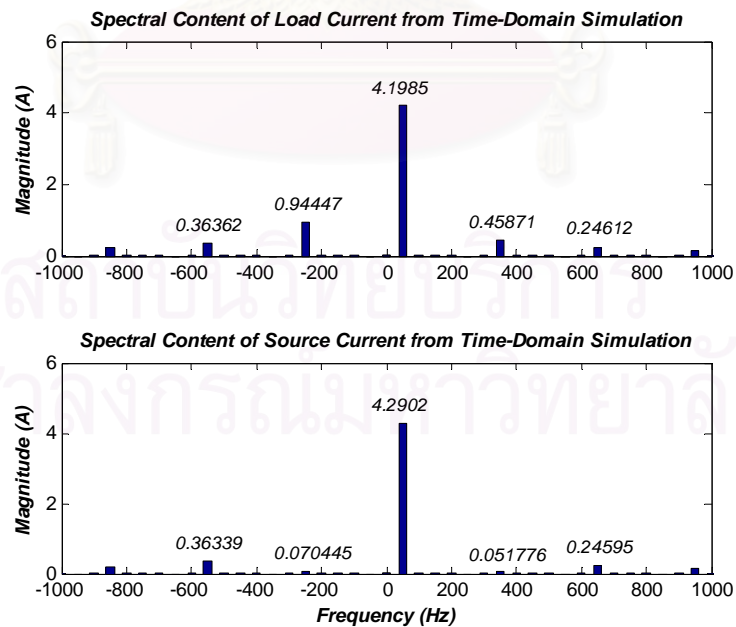


Equivalent Circuit for 7th Harmonic Component

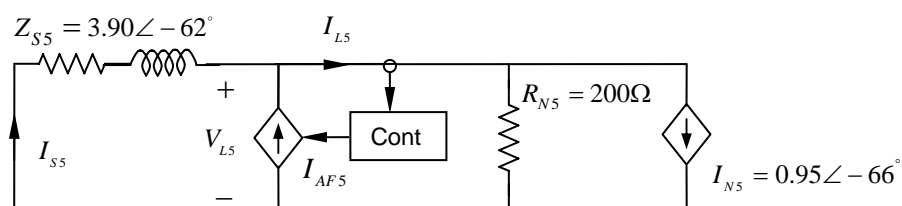
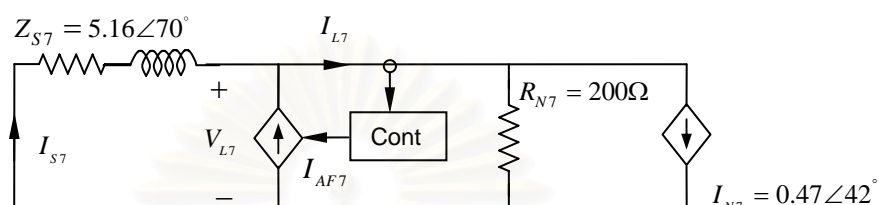
รูปที่ 4.31 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสที่มีไหลดเป็นความต้านทานก่อนติดตั้งวงจรกรอง



รูปที่ 4.32 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสที่วงจรกรองของรูป 4.26 หลังจากที่ตั้งวงจรถ่ายแอกทีฟแบบขนาน

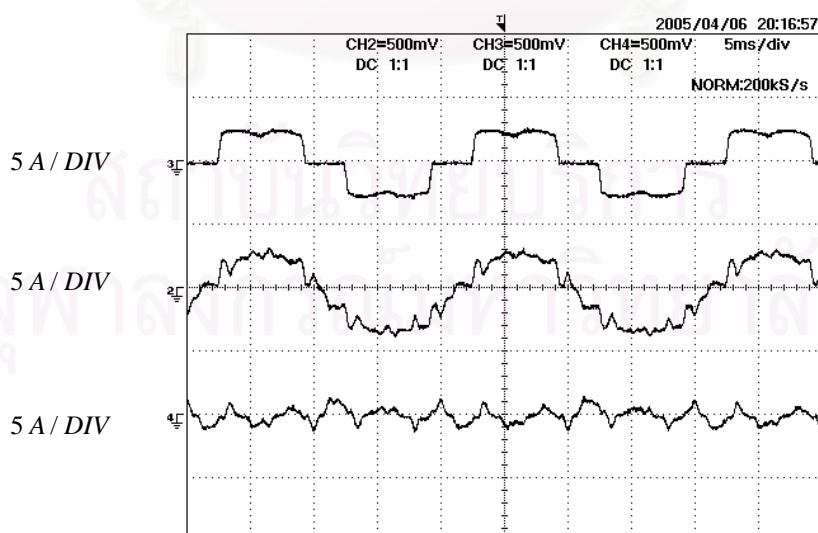


รูปที่ 4.33 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S ของรูป 4.26 หลังติดตั้งวงจรถ่ายแอกทีฟแบบขนานจากการจำลองเชิงเวลา

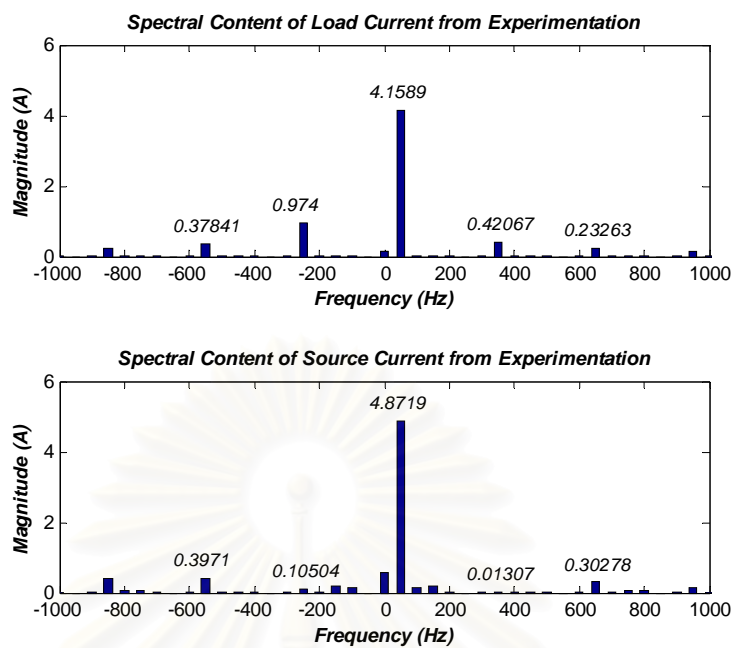
Equivalent Circuit for 5th Harmonic ComponentEquivalent Circuit for 7th Harmonic Component

รูปที่ 4.34 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสที่มีโหลดเป็นความต้านทานของรูป 4.26 หลังติดตั้งวงจรกรอง

รูปคลื่นสัญญาณกระแสหลังติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแสดงในรูปที่ 4.32 และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_g แสดงในรูปที่ 4.33 พิจารณาวงจรสมมูลหลังติดตั้งวงจรกรองในรูปที่ 4.34 จะเห็นว่า การติดตั้งวงจรกรองทำให้แรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ลดลงเป็นศูนย์โวลต์ แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงนี้ไม่มีผลต่อแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก เนื่องจากถูกควบคุมด้วยแรงดันโหลดในควมที่มีมูลฐานเป็นส่วนใหญ่ จากเหตุผลในข้อนี้ประกอบกับสัดส่วนของอิมพีแดนซ์ที่ $R_{Nk} \gg Z_{sk}$ ทำให้กระแสโหลดหลังติดตั้งวงจรกรองในรูปที่ 4.33 ไม่แตกต่างจากตอนก่อนติดตั้งมากนัก ซึ่งสามารถตรวจสอบความถูกต้องได้จากเปรียบเทียบกับจากผลจากการทดลองในรูปที่ 4.35 และ 4.36



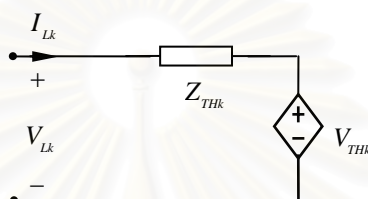
รูปที่ 4.35 ผลจากการทดลองแสดงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_g และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสที่วงจรกรองของรูป 4.26 หลังจากติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานจากการทดลอง



รูปที่ 4.36 ผลการทดลองแสดงสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S ของรูป 4.26 หลังติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน

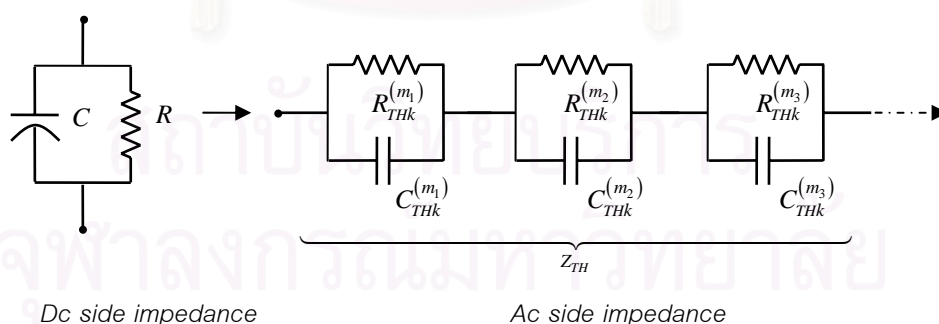
4.3 วงจรสมมูลที่สร้างจากแบบจำลองประเภทอิมพีแดนซ์

จากวงจรสมมูลของแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์ที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมาจนถึงแม้ว่าสามารถใช้ในการอธิบายหรือคาดการณ์พฤติกรรมของระบบได้ดีกับโครงสร้างด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสที่มีตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ (โหลดแบบอินดักทีฟ) และวงจรเรียงกระแสที่ไม่มีวงจรกรอง แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์นั้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับวงจรเรียงกระแสที่ใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เป็นวงจรกรอง (โหลดแบบคาปาซิทีฟ) ดังนั้นจากปัญหาดังกล่าวจึงได้พัฒนาแบบจำลองพร้อมด้วยวงจรสมมูลที่เหมาะสมกับโครงสร้างนี้ขึ้นมา ซึ่งแบบจำลองนั้นก็คือแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์



รูปที่ 4.37 วงจรสมมูลของแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์

รูปที่ 4.37 เป็นรูปแบบทั่วไปของวงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแส 3 เฟส ด้านไฟสลับในโดเมนความถี่ ซึ่งเป็นวงจรสมมูลที่สร้างจากแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์โดยที่องค์ประกอบของวงจรประกอบด้วย อิมพีแดนซ์สมมูล Z_{THk} และแหล่งจ่ายแรงดันควบคุม (Controlled Voltage Source) V_{THk} โดยรูปแบบโครงสร้างของอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{THk} แสดงในรูปที่ 4.38 มีโครงสร้างเดียวกับแอดมิตแทนซ์ด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสและต่ออนุกรมกันเป็นอันดับคู่ โดยที่รายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ที่เป็นองค์ประกอบของ Z_{THk} สามารถคำนวณได้จากค่าพารามิเตอร์ขององค์ประกอบด้านไฟตรงและสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันการสวิตช์ดังแสดงในสมการที่ (4.15) และ (4.16)



รูปที่ 4.38 โครงสร้างของอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{THk}

$$R_{THk}^{(m)} = \frac{3}{4} C_m C_m^* R \quad (4.15)$$

$$C_{THk}^{(m)} = \frac{4}{3} \frac{(k-m)}{k C_m C_m^*} C \quad (4.16)$$

ในส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันควบคุม V_{THk} ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมร่วมกันทางความถี่ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย V'_{THk} และ \tilde{V}_{THk} ตามสัญญาณควบคุม

กระแสไหลที่ต่างความถี่ $\{I_{Lk}, I_{Lk}^*\}$ จะมีการเชื่อมร่วมข้ามความถี่ (Cross Coupling) มาเป็นตัวควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันควบคุม V'_{THk} ผ่านทางสัมประสิทธิ์การเชื่อมร่วมที่สามารถคำนวณได้เมื่อทราบค่ามุมเริ่มนำกระแสของไดโอดและค่าพารามิเตอร์ทางด้านไฟตรงของวงจรวจรเรียงกระแสดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.17) ดังนั้น V'_{THk} จึงมีพฤติกรรมขึ้นอยู่กับผลรวมจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลในหลายความถี่

$$\begin{bmatrix} V'_{TH1} \\ V'_{TH5} \\ V'_{TH7} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{F1,5} & Z_{F1,7} & \cdots \\ Z_{F5,1} & 0 & Z_{F5,7} & \cdots \\ Z_{F7,1} & Z_{F7,5} & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L5} \\ I_{L7} \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{B1,1} & Z_{B1,5} & Z_{B1,7} & \cdots \\ Z_{B5,1} & Z_{B5,5} & Z_{B5,7} & \cdots \\ Z_{B7,1} & Z_{B7,5} & Z_{B7,7} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1}^* \\ I_{L5}^* \\ I_{L7}^* \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

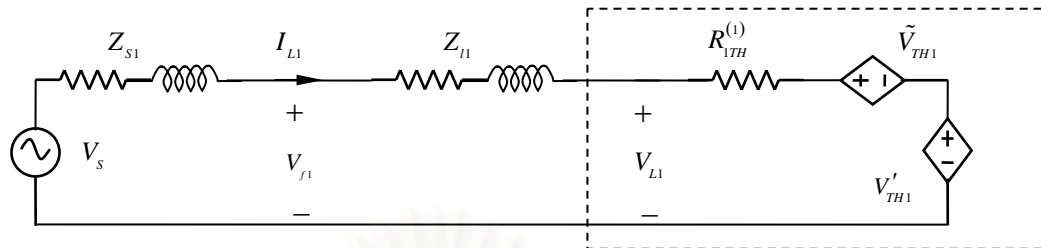
ในส่วนแหล่งจ่ายแรงดันควบคุม \tilde{V}_{THk} นั้น เป็นผลที่เกิดจากแรงดัน ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งวงจรอง $\{V_{fk}, V_{fk}^*\}$ เชื่อมร่วมข้ามความถี่มาเป็นแหล่งจ่ายแรงดันผ่านทางสัมประสิทธิ์การเชื่อมร่วมซึ่งขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการสวิตช์ ดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.18) แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก \tilde{V}_{THk} จึงเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันภายนอก

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_{TH1} \\ \tilde{V}_{TH5} \\ \tilde{V}_{TH7} \\ \vdots \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 1 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f5} \\ V_{f7} \\ \vdots \end{bmatrix} + \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \tilde{C}_{-2}^* & \tilde{C}_4^* & \tilde{C}_{-8}^* & \cdots \\ \tilde{C}_4^* & \tilde{C}_{10}^* & \tilde{C}_{-2}^* & \cdots \\ \tilde{C}_{-8}^* & \tilde{C}_{-2}^* & \tilde{C}_{-14}^* & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{f1}^* \\ V_{f5}^* \\ V_{f7}^* \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

ถ้านำอิมพีแดนซ์สมมูลที่คำนวณได้จากแบบจำลองแสดงในรูปที่ 4.37 มาร่วมพิจารณากับแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมทั้งสองนี้ก็จะทำให้ทราบพฤติกรรมของไหลตชนิดวงจรวจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรรอง และสามารถนำไปพิจารณาร่วมกับระบบทางด้านแหล่งจ่ายเพื่อวิเคราะห์ปัญหาทางฮาร์มอนิกได้

ลักษณะที่แตกต่างของวงจรมูลที่พัฒนาขึ้นมาที่บวกรวมมูลเดิมที่ใช้กันทั่วไปก็คือการคิดผลของพฤติกรรมเชื่อมร่วมกันของความถี่ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของไหลตชนิดเชิงเส้นและแปรผันกับเวลาที่เป็นรายคาบ (Linear Time Periodic) โดยผลและพฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงออกมาผ่านทางแหล่งจ่ายแรงดันควบคุม นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาค่าที่แน่นอนของอิมพีแดนซ์สมมูลของวงจรวจรเรียงกระแสในแต่ละฮาร์มอนิกได้ ซึ่งคุณสมบัติทั้ง 2 ข้อที่กล่าวมานั้นเป็นจุดเด่นที่ทำให้วงจรมูลที่นำเสนอนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบได้ดีกว่าจำลองแบบเดิมที่ใช้กันอยู่ทั่วไปที่กล่าวเอาไว้ว่า สามารถแสดงแทนวงจรวจรเรียงกระแสที่ใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เป็นวงจรรองได้ด้วยแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกที่มีขนาดคงที่อนุกรมอยู่กับอิมพีแดนซ์

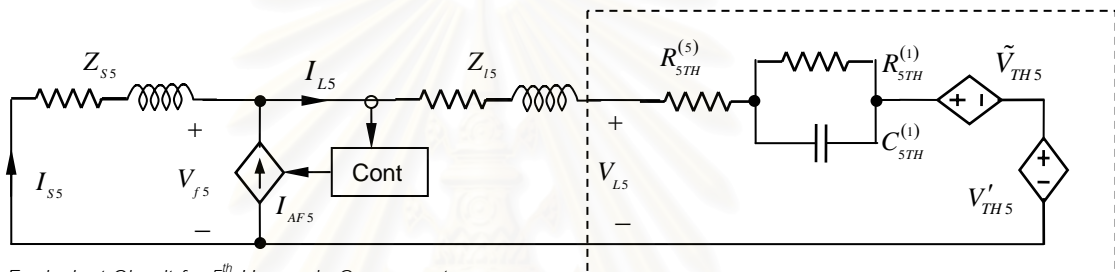
สมมูลขนาดเล็ก ซึ่งขาดความชัดเจนในส่วนของค่าที่แน่นอนของอิมพีแดนซ์สมมูลและที่มาของแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก



Equivalent Circuit for Fundamental Component

$$\tilde{V}_{TH1} = (V_{f1} + 3\tilde{C}_{-2}^* V_{f1}^* + 3\tilde{C}_{-4}^* V_{f5}^* + 3\tilde{C}_{-8}^* V_{f7}^* + \dots) / 2$$

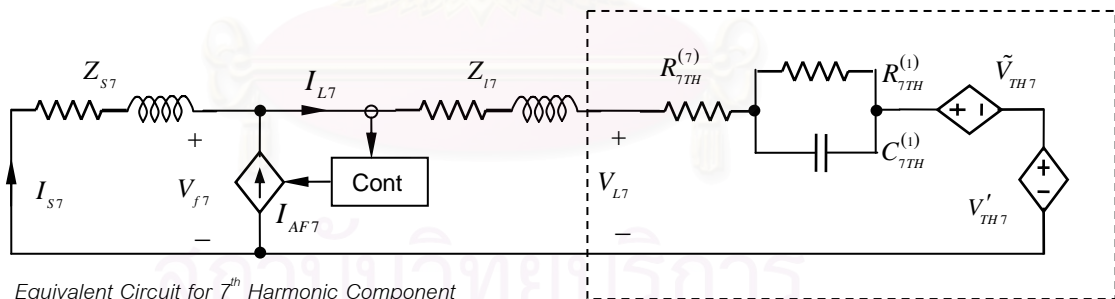
$$V'_{TH1} = Z_{F1,5} I_{L5} + Z_{F1,7} I_{L7} + \dots + Z_{B1,1} I_{L1}^* + Z_{B1,5} I_{L5}^* + Z_{B1,7} I_{L7}^* + \dots$$



Equivalent Circuit for 5th Harmonic Component

$$\tilde{V}_{TH5} = (V_{f5} + 3\tilde{C}_4^* V_{f1}^* + 3\tilde{C}_{10}^* V_{f5}^* + 3\tilde{C}_{-2}^* V_{f7}^* + \dots) / 2$$

$$V'_{TH5} = Z_{F5,1} I_{L1} + Z_{F5,7} I_{L7} + \dots + Z_{B5,1} I_{L1}^* + Z_{B5,5} I_{L5}^* + Z_{B5,7} I_{L7}^* + \dots$$



Equivalent Circuit for 7th Harmonic Component

$$\tilde{V}_{TH7} = (V_{f7} + 3\tilde{C}_{-8}^* V_{f1}^* + 3\tilde{C}_{-2}^* V_{f5}^* + 3\tilde{C}_{-14}^* V_{f7}^* + \dots) / 2$$

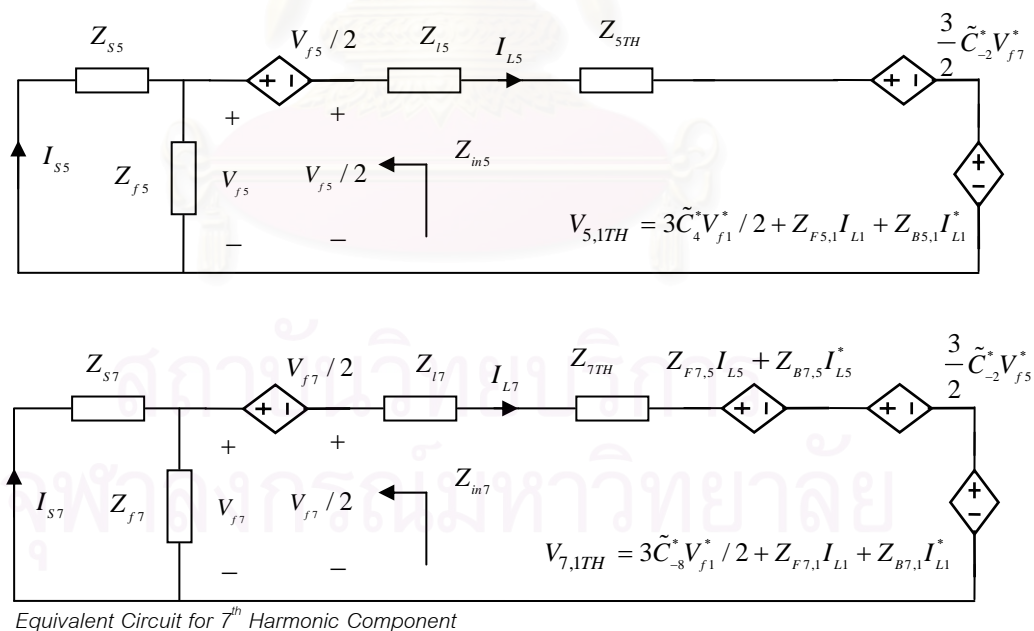
$$V'_{TH7} = Z_{F7,1} I_{L1} + Z_{F7,5} I_{L5} + \dots + Z_{B7,1} I_{L1}^* + Z_{B7,5} I_{L5}^* + Z_{B7,7} I_{L7}^* + \dots$$

รูปที่ 4.39 วงจรสมมูลในโดเมนความถี่ที่ความถี่มูลฐาน ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.39 จะเห็นว่าวงจรสมมูลในส่วนโหลดในแต่ละฮาร์มอนิกถูกแสดงแทนด้วยอิมพีแดนซ์อนุกรมอยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันควบคุม จำนวน 2 แหล่งจ่าย ส่วนระบบส่งจ่ายที่แสดงในวงจรสมมูลในแต่ละฮาร์มอนิกประกอบด้วยแหล่งจ่าย อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย อิมพีแดนซ์ของสายส่ง และวงจรกรอง

การวิเคราะห์ปัญหาทางฮาร์มอนิกโดยใช้วงจรสมมูลเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหรือใช้อธิบายพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระแสและแรงดันในแต่ละฮาร์มอนิกที่เกิดจากการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบส่งจ่าย จะต้องให้ความสนใจในการมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างระบบส่งจ่ายกับโหลด การติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวนอกจากจะทำให้โหมพีแดนซ์ของระบบเปลี่ยนแปลง และส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในระบบแล้ว ผลของการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลด I_{Lk} และแรงดันภายนอก V_{fk} ที่เกิดขึ้นจะกระทบไปถึงแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก ($V_{THk} = \tilde{V}_{THk} + V'_{THk}$) ในวงจรเรียงกระแสอีกด้วย โดยพิจารณาได้จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.39 และการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณภายนอกยังสามารถส่งผลกระทบต่อแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกได้ในหลายความถี่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกนี้จะส่งผลกระทบต่อย้อนกลับไปสู่ระบบส่งจ่ายภายนอกอีกที่หนึ่งเป็นลักษณะของวงรอบป้อนกลับ อันเป็นที่มาของการมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างระบบส่งจ่ายกับโหลด พฤติกรรมในลักษณะนี้ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยวงจรสมมูลที่ใช้กันโดยทั่วไปซึ่งกำหนดให้ แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกมีขนาดคงที่

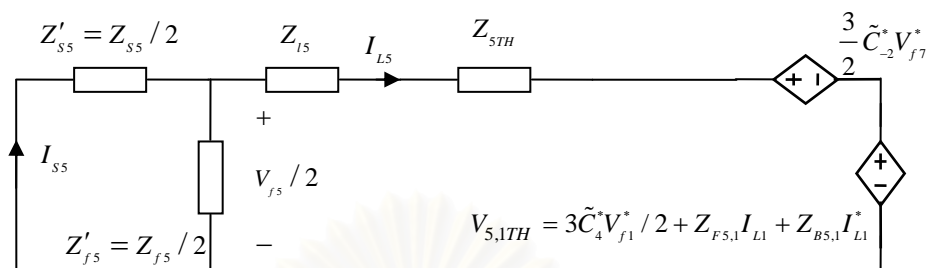
การวิเคราะห์ปัญหาทางฮาร์มอนิกโดยใช้วงจรสมมูลนอกจากต้องการความถูกต้องแม่นยำในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแล้วยังต้องการความสะดวกในการนำมาใช้เพื่อคาดการณ์พฤติกรรมของระบบอย่างคร่าวๆ ด้วย ดังนั้นวงจรสมมูลควรจะมีควมเรียบง่ายเพียงพอ วงจรสมมูลในรูปที่ 4.39 ยังมีความซับซ้อนเนื่องจากมีเทอมเชื่อมร่วมสัญญาณระหว่างความถี่มากเกินไป แต่สามารถแก้ไขได้โดยการประมาณเพื่อละเลยเทอมที่มีค่าน้อย คงเหลือเอาไว้เฉพาะเทอมที่มีค่ามาก รูปที่ 4.40 แสดงวงจรสมมูลที่ถูกประมาณแล้ว



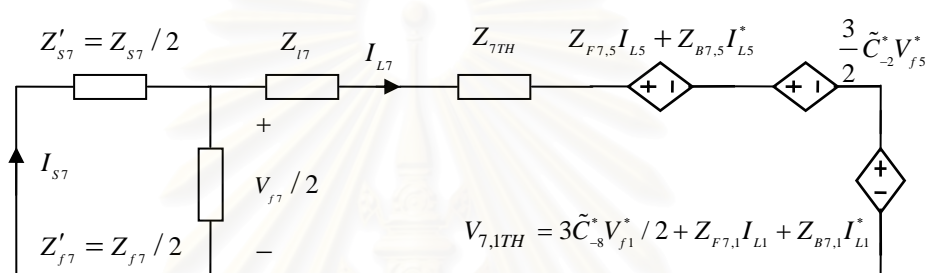
รูปที่ 4.40 วงจรสมมูลโดยประมาณที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7

จากวงจรในรูปที่ 4.40 แรงดันควมคุม $V_{fk} / 2$ ในวงจรสมมูลแต่ละฮาร์มอนิกสามารถย้ายไปรวมกับ V_{fk} ทางด้านแหล่งจ่าย จะทำให้ได้แรงดันสมมูล ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งวงจรกรองในวงจรสมมูลมีค่าเป็น $V_{fk} / 2$

ดังแสดงในรูปที่ 4.41 และอินพุทอิมพีแดนซ์ ที่มองจากตำแหน่งแรงดัน $V_{fk} / 2$ ไปทางด้านแหล่งจ่าย จะมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของค่าเดิม วงจรสมมูลในรูปที่ 4.41 เป็นวงจรสมมูลที่มีความเรียบง่ายพอที่จะเห็นพฤติกรรมของระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับแรกๆ ได้



Equivalent Circuit for 5th Harmonic Component



Equivalent Circuit for 7th Harmonic Component

รูปที่ 4.41 วงจรสมมูลโดยประมาณที่มีการลดทอนความซับซ้อน

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.41 ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จะเห็นว่าแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกภายในวงจรสมมูลนอกจากจะเกิดจากกระแสไหลตและแรงดันวงจรรองที่ความถี่มูลฐานแล้ว ยังขึ้นอยู่กับแรงดันวงจรรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ด้วย วงจรสมมูลที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ก็มีพฤติกรรมคล้ายกับในอันดับที่ 5 คือแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกภายในวงจรสมมูล นอกจากจะเกิดจากกระแสไหลตและแรงดันวงจรรองที่ความถี่มูลฐานแล้ว และขึ้นอยู่กับแรงดันฟิลเตอร์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ด้วย แต่จะแตกต่างกันตรงที่กระแสไหลตในฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จะมีผลกระทบต่อวงจรสมมูลในฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ผ่านทางแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมตามรูปที่ 4.41 ในขณะที่กระแสไหลตในฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 จะไม่มีผลกระทบต่อวงจรสมมูลในฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 อย่างไรก็ตามในความจริงแล้วแหล่งจ่ายแรงดันควบคุม $V_{5,1TH}$ และ $V_{7,1TH}$ ค่อนข้างจะคงที่เพราะกระแสไหลตและแรงดันวงจรรองที่ความถี่มูลฐานเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบส่งจ่าย จึงทำให้พอที่จะคาดการณ์พฤติกรรมกระแสไหลตในฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ได้ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงก็ต่อเมื่ออิมพีแดนซ์ในวงจรสมมูลฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เปลี่ยนแปลง หรือแรงดันที่วงจรรองที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 เปลี่ยนแปลง ซึ่งปัจจัยที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวก็คือการติดตั้งวงจรรองในฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และหรือ อันดับที่ 7 ในทำนองเดียวกันค่าสัญญาณกระแสและแรงดันในวงจรสมมูลฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของสัญญาณในวงจรสมมูลที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 แต่ในกรณีนี้ที่แรงดันวงจรรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 มีขนาดไม่เกินหนึ่งในสามของแรงดันวงจรรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ผลกระทบจากวงจรสมมูลฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ไปยังวงจรสมมูลที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 สามารถละเลยได้ ทำให้วงจรสมมูลในฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เป็นอิสระจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้นในวงจร

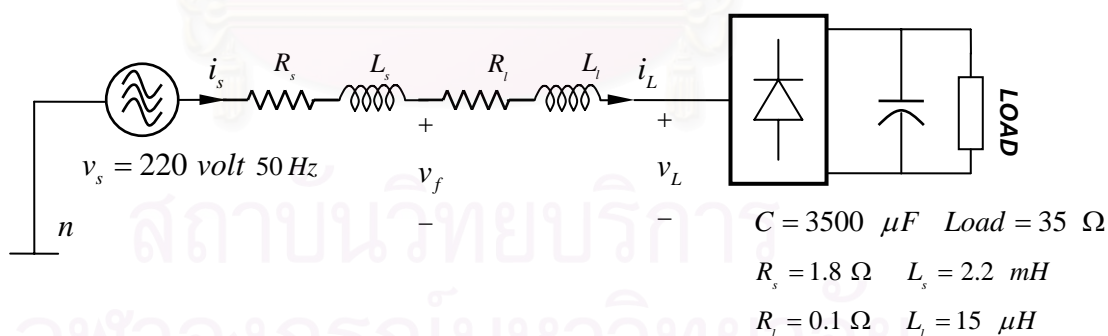
สมมูลในฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 ซึ่งจะทำให้สะดวกต่อการวิเคราะห์มากขึ้น พฤติกรรมในการทำงานเดียวกับที่กล่าวข้างต้นที่กล่าวข้างต้นจะเกิดขึ้นในคู่ฮาร์โมนิกลำดับถัดไปด้วยคือลำดับที่ 11 กับ 13 แต่ผลการวิเคราะห์จะถูกต้องดีภายใต้เงื่อนไขที่ค่าความต้านทานด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสมีขนาดเล็ก เพราะจะทำให้ขนาดของการเชื่อมร่วมระหว่างความถี่ลดลง เป็นผลให้วงจรสมมูลในแต่ละฮาร์โมนิกเป็นอิสระกันมากขึ้น ซึ่งสิ่งที่กล่าวมาข้างต้นจะแสดงให้เห็นในตัวอย่างต่อไป

4.4 การวิเคราะห์ระบบด้วยวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์

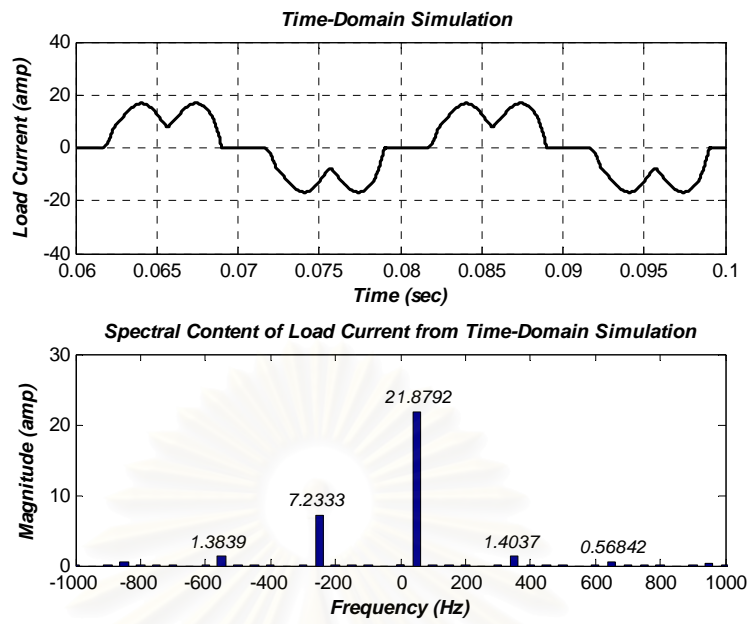
การวิเคราะห์พฤติกรรมด้วยวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์จะแยกเป็นกรณีตามประเภทของวงจรกรองที่ติดตั้งอยู่ในระบบเหมือนกับกรณีการวิเคราะห์ระบบด้วยวงจรสมมูลแบบแอดมิตแทนซ์ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับการจำลองเชิงเวลาเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการวิเคราะห์ในกรณีที่โหลดเป็นแบบคาปาซิทีฟจะต้องทดลองที่กระแสสูงจึงจะเห็นผลได้ชัดเจน ซึ่งอุปกรณ์ทดลองที่มีข้อจำกัดในด้านกระแสพิกัด ทำให้ไม่สามารถทดลองได้

4.4.1 กรณีระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหลดแบบคาปาซิทีฟเมื่อไม่มีการติดตั้งวงจรกรอง

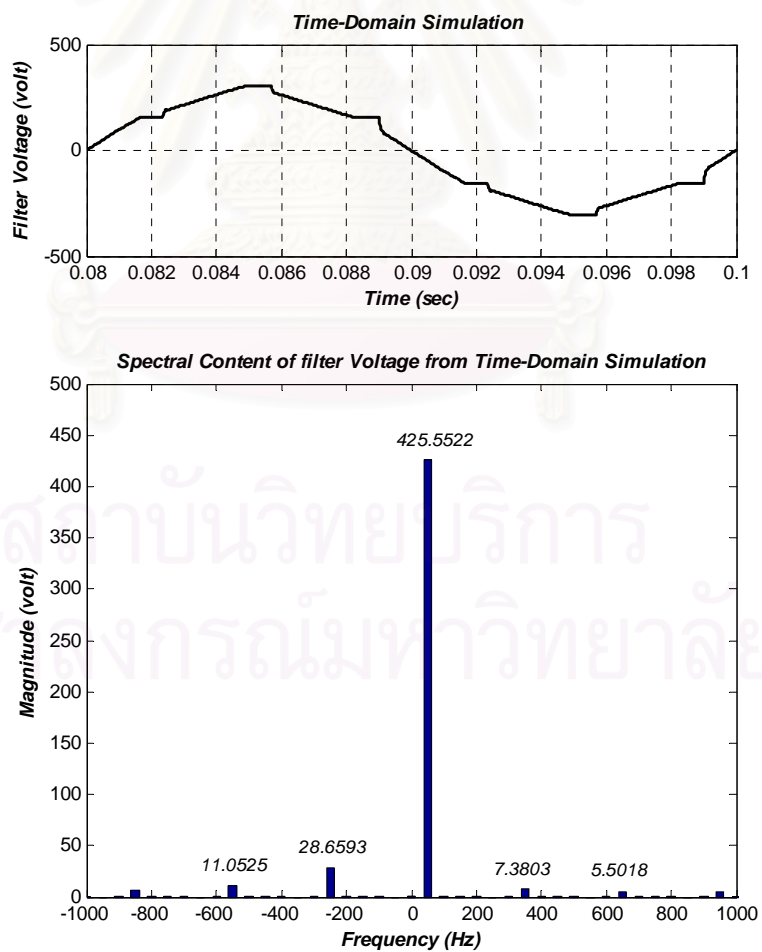
รูปที่ 4.42 แสดงตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองต่อกับโหลดความต้านทาน รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์แสดงในรูปที่ 4.43 รูปคลื่นแรงดันเฟสของ v_f และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์แสดงในรูปที่ 4.44 และวงจรสมมูลแสดงในรูปที่ 4.45



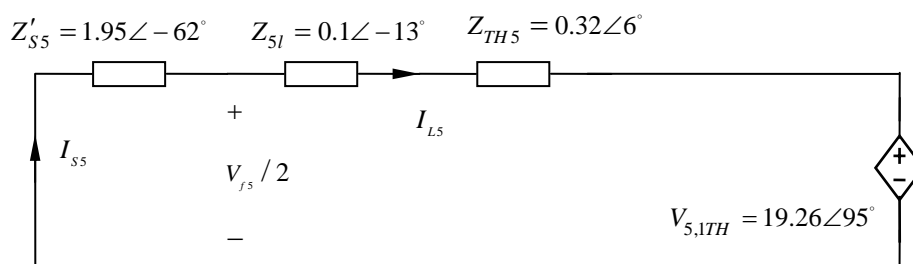
รูปที่ 4.42 ตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองต่อกับโหลดความต้านทาน



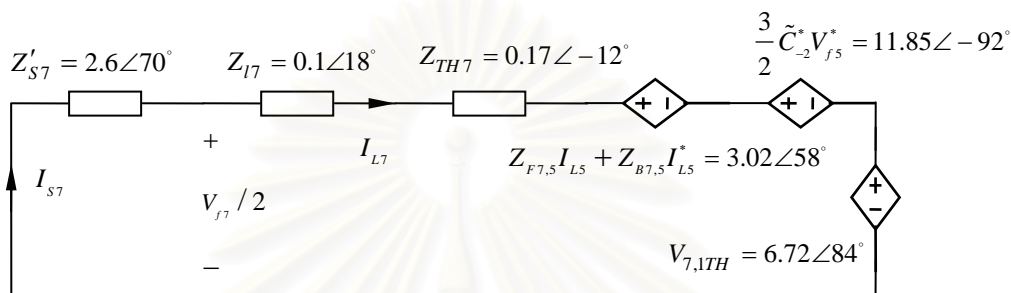
รูปที่ 4.43 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.42



รูปที่ 4.44 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันฟิวดเตอร์ v_f และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของรูป 4.42



Equivalent Circuit for 5th Harmonic Component



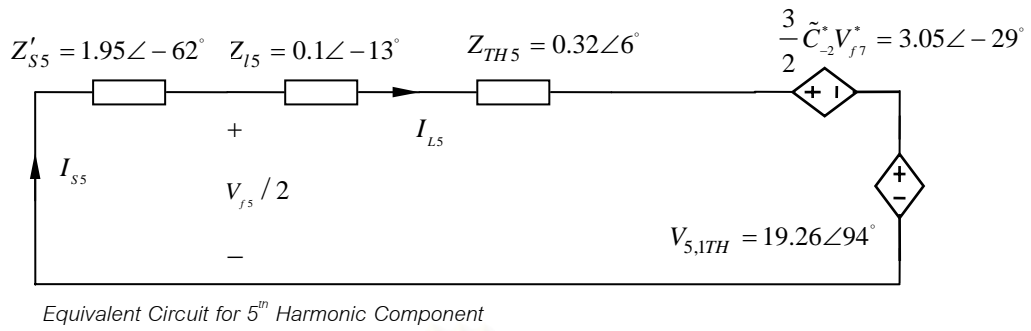
Equivalent Circuit for 7th Harmonic Component

รูปที่ 4.45 วงจรสมมูลโดยประมาณของระบบในรูปที่ 4.42

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณแบบประมาณจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปที่ 4.42

	แหล่งจ่าย แรงดันฮาร์โมนิก V_{THk}	อิมพีแดนซ์รวม	กระแสไหล คำนวณ I_{Lk}	กระแสไหล Simulation	ความผิดพลาด ของกระแส ไหล
ลำดับที่ 5	19.26	2.17	8.90	7.23	23.10%
ลำดับที่ 7	3.18	2.68	1.19	1.40	15.00%

ตารางที่ 4.4 แสดงการคำนวณค่าของกระแสไหลโดยใช้วงจรสมมูลโดยประมาณในรูปที่ 4.45 ซึ่ง
 จากผลการคำนวณพบว่าวิธีการประมาณจากเทอมที่สำคัญช่วยทำให้การคำนวณง่ายขึ้นและมีความถูกต้อง
 พอสมควร ส่วนในรูปที่ 4.46 และตารางที่ 4.5 แสดงการคำนวณในวงจรสมมูลฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 แบบไม่
 ละเลยเทอม $\frac{3}{2} \tilde{C}_{-2}^* V_{f7}^*$ เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 และ 4.5 จะเห็นว่า ในกรณีที่
 V_{f7} มีขนาดไม่ถึงหนึ่งในสามของ V_{f5} ก็สามารถคำนวณโดยละเลยเทอม $\frac{3}{2} \tilde{C}_{-2}^* V_{f7}^*$ ในวงจรสมมูลฮาร์โมนิก
 ที่ 5 ได้



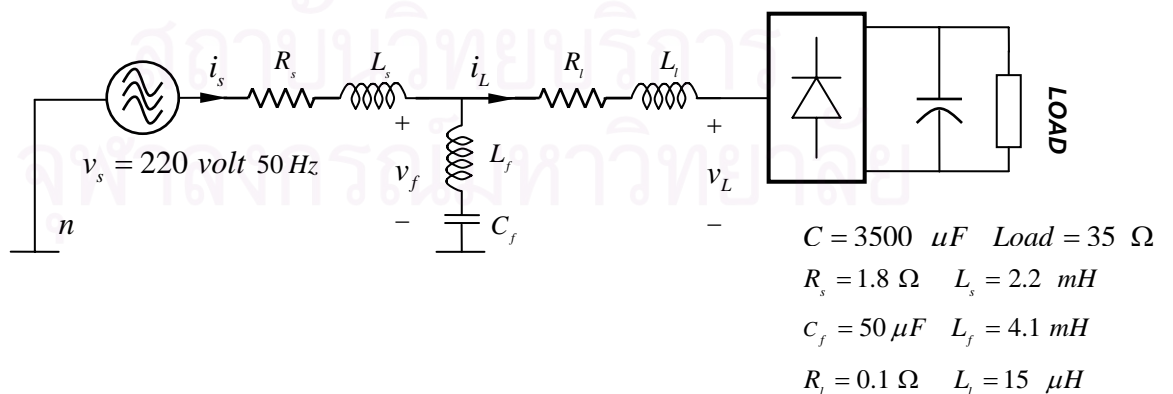
รูปที่ 4.46 วงจรสมมูลโดยละเอียดของระบบในรูป 4.42

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณแบบละเอียดจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปที่ 4.42

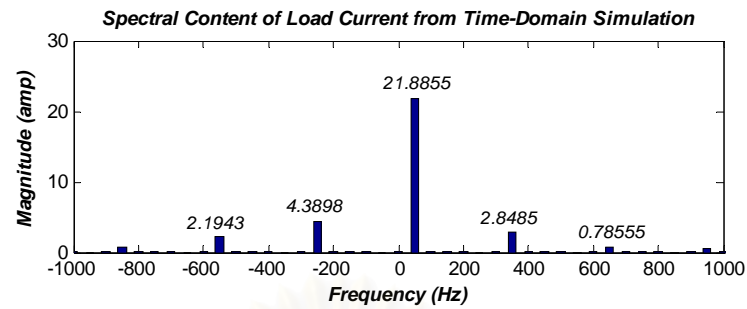
	แหล่งจ่าย แรงดันฮาร์โมนิก อันดับที่ 5 นิก V_{THk}	อิมพีแดนซ์รวม	กระแสไหล คำนวณ I_{Lk}	กระแสไหล Simulation	ความผิดพลาด ของกระแส ไหล
ลำดับที่ 5	17.74	2.17	8.19	7.23	13.28%

4.4.2 กรณีระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหลดแบบคาปาทีฟเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนาน

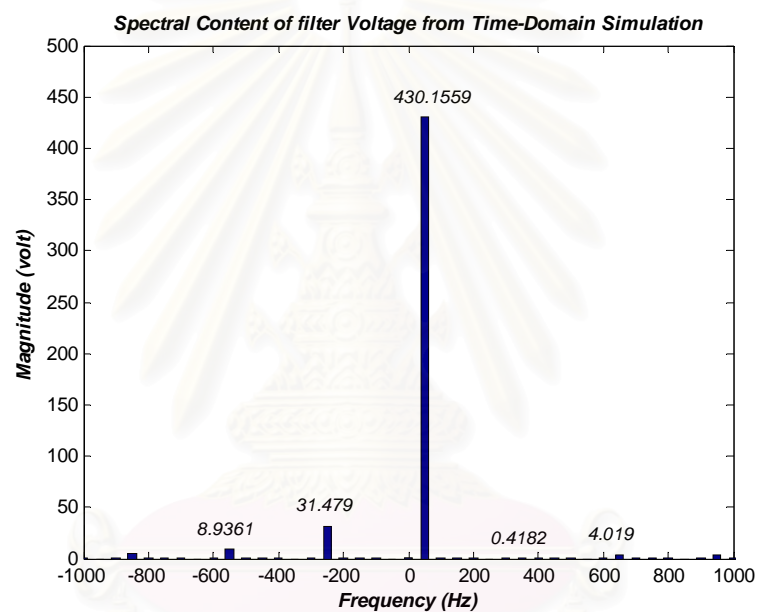
รูปที่ 4.47 แสดงการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานโดยเลือกกำจัดเฉพาะอันดับที่ 7 สาเหตุที่เลือกกำจัดเป็นบางอันดับก็เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเพียงบางสัญญาณในวงจรสมมูลเนื่องจากการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนาน (แรงดันวงจรกรองอันดับที่ 7 จะเป็นศูนย์โวลต์)



รูปที่ 4.47 ตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็น วงจรกรองต่อกับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานอันดับที่ 7



รูปที่ 4.48 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสโหลด i_L ของรูป 4.47



รูปที่ 4.49 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของแรงดันที่วงจรรอง v_f ของรูป 4.47

การคำนวณกระแสฮาร์โมนิกโดยใช้วงจรสมมูลแสดงในสมการที่ (4.19)

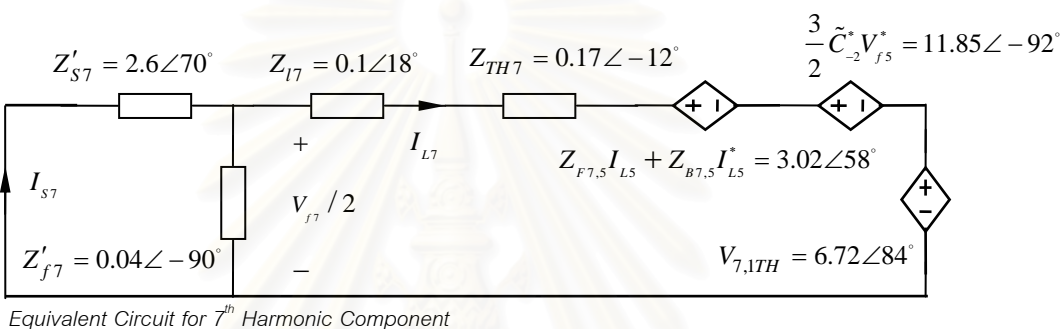
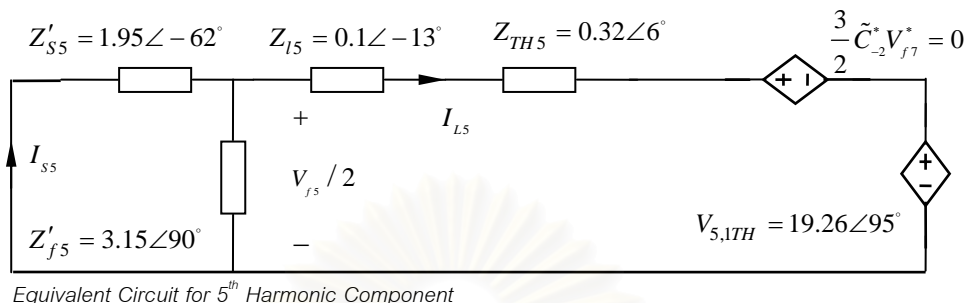
$$I_{Lk} = \frac{V_{THk}}{Z_{(total)k}} \quad (4.19)$$

โดยที่

$$Z_{(total)k} = \frac{Z'_{Sk} Z'_{fk}}{Z'_{Sk} + Z'_{fk}} + Z_{lk} + Z_{THk}$$

ในกรณีที่มีการติดตั้งวงจรรองที่ความถี่ฮาร์โมนิกหนึ่ง จะทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรรองที่ความถี่นั้น มีขนาดต่ำ $Z'_{fk} \approx 0\Omega$ และจากสมการที่ (4.19) จะได้ว่า

$$I_{Lk} = \frac{V_{THk}}{Z_{lk} + Z_{THk}} \tag{4.20}$$



รูปที่ 4.50 วงจรสมมูลโดยประมาณของระบบในรูป 4.47

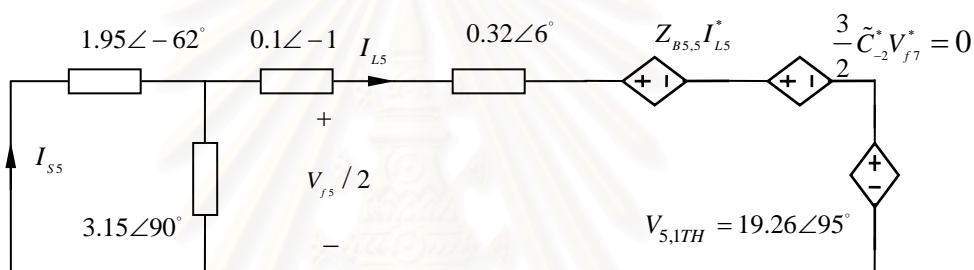
ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปที่ 4.47

	แหล่งจ่าย แรงดันฮาร์โมนิก V_{THk}	อิมพีแดนซ์รวม $Z_{(total)k}$	กระแสไหล คำนวณ I_{Lk}	กระแสไหล Simulation	ความผิดพลาด ของกระแส ไหล
ลำดับที่ 5	19.26	4.01	4.80	4.34	10.60%
ลำดับที่ 7	4.84	0.27	17.93	2.85	529.12%

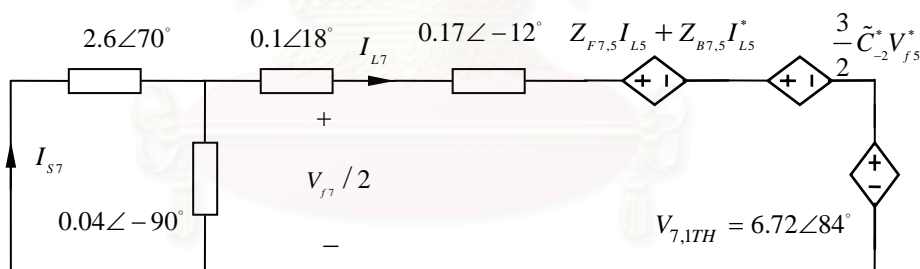
จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.50 หลังจากติดตั้งวงจรรองพาสซีฟแบบขนานที่ความถี่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวงจรสมมูลฮาร์โมนิกที่ 5 คือทำให้แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับวงจรสมมูลในรูป 4.46 เนื่องจาก $v_{f7}/2 = 0$ และ $v_{f5}/2$ เปลี่ยนแปลงตามอิมพีแดนซ์ของวงจรรอง แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์โมนิกภายในวงจรสมมูลจะมีขนาดที่ไม่คงที่เหมือนกับแบบจำลองที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป แต่จะเกิดปฏิกิริยาต่อกันระหว่างโหลดกับระบบส่งจ่าย จากผลการคำนวณขนาดของกระแส I_{L5} ในตารางที่ 4.6 พบว่ามีความถูกต้องในระดับพอใช้ได้ อย่างไรก็ตามในการคำนวณ ฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 จะพบความผิดพลาดค่อนข้างมาก เนื่องจากการละเลยผลของการเชื่อมร่วมทางความถี่ของฮาร์โมนิกอันดับสูงที่มากกระทบแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์โมนิกอันดับต่ำ ซึ่งปกติแล้วค่าเหล่านี้จะมีค่าน้อยทำให้

สามารถละลายได้ถ้าขนาดของอิมพีแดนซ์รวมมีค่าสูง แต่ในกรณีที่มีการติดตั้งวงจรกรอง ขนาดของค่าอิมพีแดนซ์รวม ณ ความถี่ฮาร์มอนิกที่ติดตั้งวงจรกรองจะมีค่าต่ำ การคำนวณขนาดของกระแสโดยละเอียดการเชื่อมร่วมความถี่ดังกล่าวจะทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าสูงขึ้น

ในการทำงานเดียวกันหลังติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนานที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ภายในวงจรสมมูลจะมีค่าไม่คงที่เหมือนกับที่เกิดขึ้นกับแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันและกระแสในฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ส่งผลกระทบ ผลการคำนวณมีความผิดพลาดมากเนื่องจากการละเลยเทอมเชื่อมร่วมความถี่ การคำนวณแบบทำซ้ำ (Iteration) กับวงจรสมมูลฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 พร้อมกันทั้ง 2 วงจรได้ดังตารางที่ 4.7 และอาจเพิ่มเติมเทอมที่สำคัญลงไปในวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 4.51 ซึ่งใช้ในการคำนวณแบบทำซ้ำเพื่อหาค่าของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7



Equivalent Circuit for 5th Harmonic Component



Equivalent Circuit for 7th Harmonic Component

รูปที่ 4.51 วงจรสมมูลที่มีความละเอียดมากขึ้นของระบบในรูป 4.47

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณแบบทำซ้ำจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปที่ 4.47

	กระแสไหล คำนวณ I_{Lk}	กระแสไหล Simulation	ความผิดพลาดของ กระแสไหล
ลำดับที่ 5	4.13	4.34	4.84%
ลำดับที่ 7	9.98	2.85	250.00%

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าถึงแม้จะใช้การคำนวณแบบทำซ้ำความผิดพลาดของกระแสไหลในฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 ยังคงสูงอยู่ สาเหตุที่ความผิดพลาดของกระแสไหลในฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ยังคงสูงอยู่นั้น

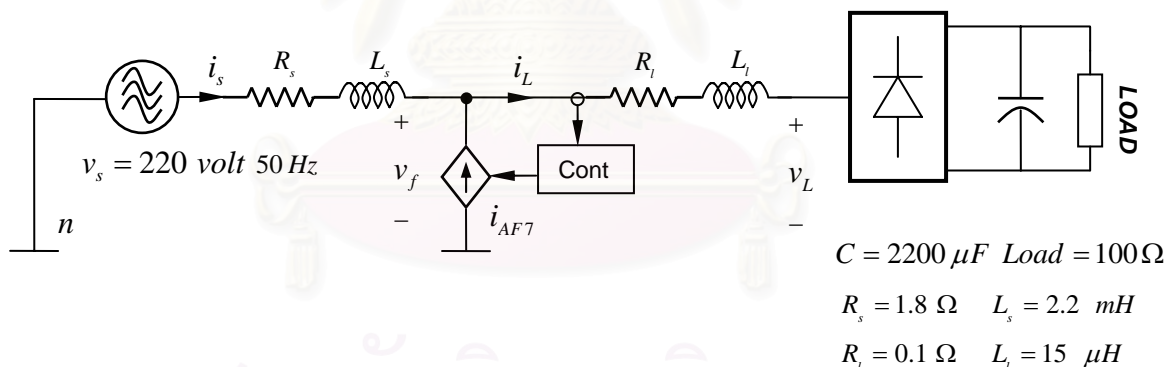
เนื่องจากในผลการคำนวณที่แสดงในตารางที่ 4.7 ไม่ได้รวมผลของการเชื่อมร่วมทางความถี่ของฮาร์มอนิกอันดับสูงกว่า 7 ที่กระทบแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกอันดับต่ำ แต่สำหรับในตารางที่ 4.8 เป็นการคำนวณแบบทำซ้ำที่รวมผลของฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 และ 13 จะเห็นว่ามีความถูกต้องมากขึ้น

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณอย่างละเอียดแบบทำซ้ำจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปที่ 4.47

	กระแสไหลด คำนวณ I_{Lk}	กระแสไหลด Simulation	ความผิดพลาดของ กระแสไหลด
ลำดับที่ 5	4.35	4.34	0.23%
ลำดับที่ 7	3.36	2.85	17.89%

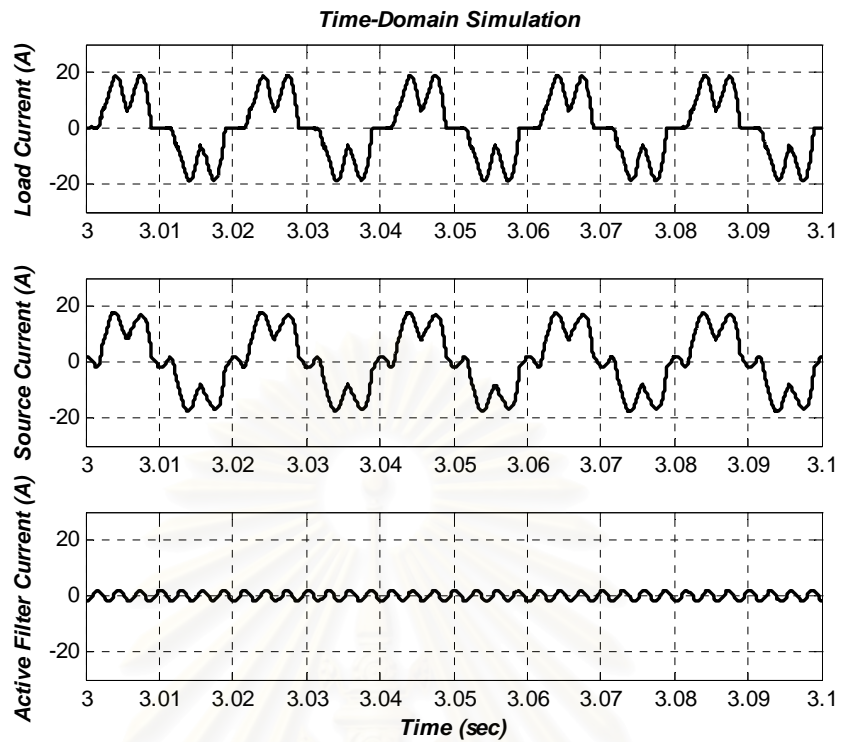
4.4.3 กรณีระบบส่งจ่าย 3 เฟสกับโหลดแบบคาปาทีฟเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน

กรณีนี้ที่ 1 เมื่อติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานอันดับที่ 7 รูปที่ 4.52 เป็นตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองต่อกับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ดังนั้นลักษณะพฤติกรรมของกระแสไหลดในกรณีนี้จะคล้ายกับในกรณีที่มีการติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟแบบขนาน

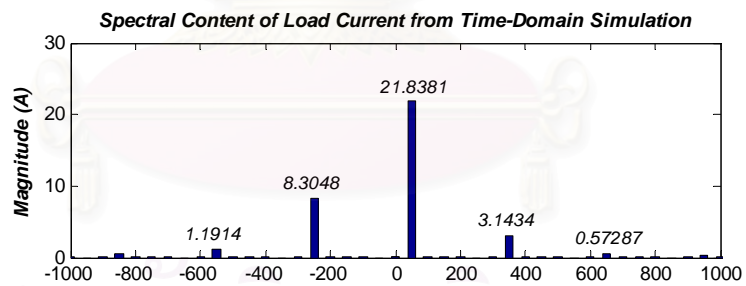


รูปที่ 4.52 ตัวอย่างระบบส่งจ่าย 3 เฟส มีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่ใช้ตัวเก็บประจุเป็นวงจรกรองกับโหลดความต้านทาน และมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน

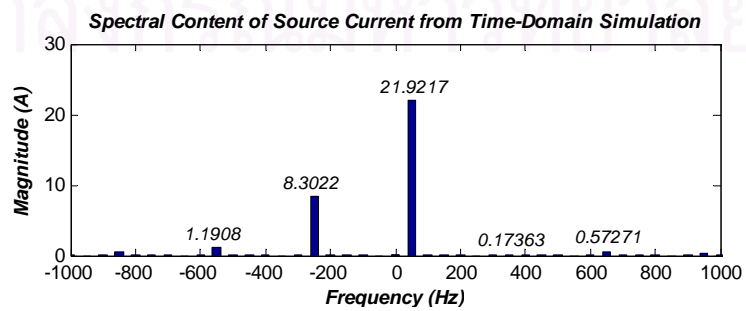
รูปคลื่นสัญญาณของกระแสไหลด i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_s และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสที่วงจรกรอง i_{AF7} แสดงในรูปที่ 4.53 และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาแสดงในรูปที่ 4.54 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_s^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาแสดงในรูปที่ 4.55 และรูปคลื่นสัญญาณกระแสไหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาแสดงในรูปที่ 4.56



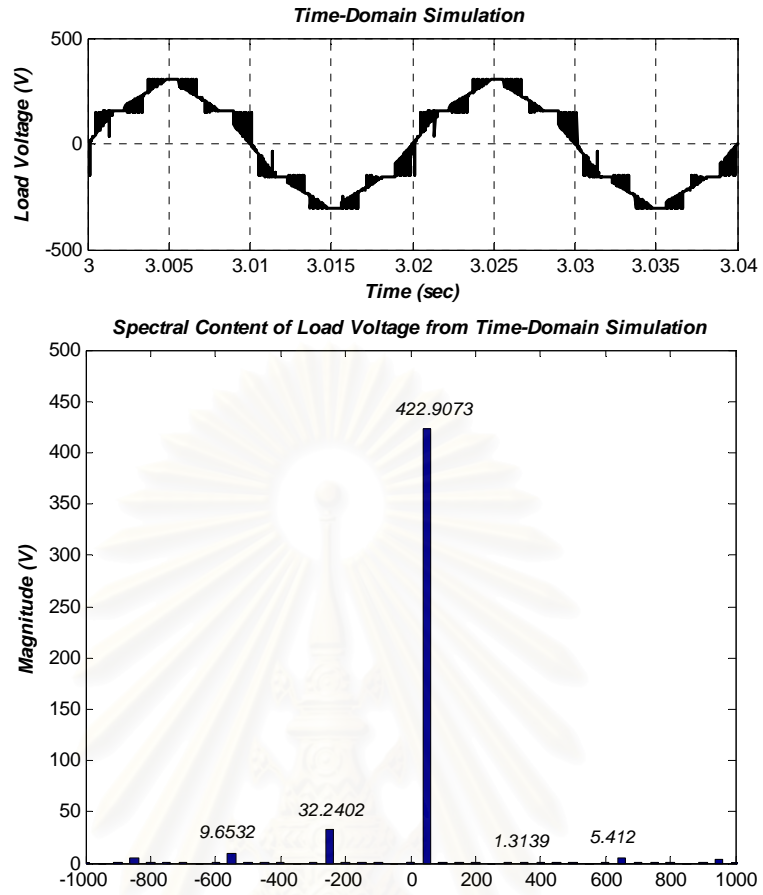
รูปที่ 4.53 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสที่วงจรกรอง i_{AF7} ตามลำดับของรูป 4.52



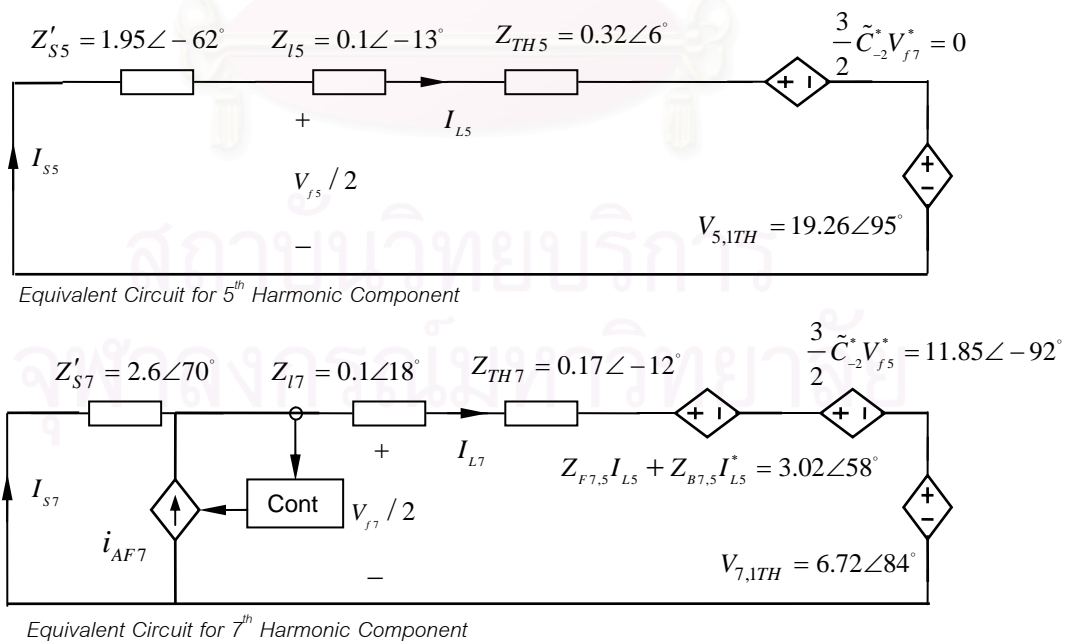
รูปที่ 4.54 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 4.52



รูปที่ 4.55 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_S^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 4.52



รูปที่ 4.56 รูปคลื่นสัญญาณของแรงดันโหลด v_L และสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูป 4.52



รูปที่ 4.57 วงจรสมมูลโดยประมาณของระบบในรูปที่ 4.52 เมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองแอกที่ฟิที่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 7

การติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ทำให้ $v_{r7}/2 = 0$ ดังนั้นจากวงจรสมมูลสามารถคำนวณค่าของกระแสในฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ได้ดังแสดงในสมการที่ (4.21) ซึ่งในกรณีนี้ $Z_{(total)k} = Z'_{Sk} + Z_{Ik} + Z_{THk}$ ซึ่งแตกต่างจากในกรณีที่ติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟตรงที่ค่าของ $Z_{(total)k}$ จะไม่มีผลของอิมพีแดนซ์ของวงจรกรอง Z_{rk} เข้ามาเกี่ยวข้อง ผลการคำนวณในตารางที่ 4.9 มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ส่วนการคำนวณกระแสที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 จะมีปัญหาเหมือนกับในกรณีที่ติดตั้งวงจรกรองพาสซีฟทำให้ต้องใช้การคำนวณแบบทำซ้ำ

$$I_{Lk} = \frac{V_{THk}}{Z_{(total)k}} \quad (4.21)$$

โดยที่

$$Z_{(total)k} = Z'_{Sk} + Z_{Ik} + Z_{THk}$$

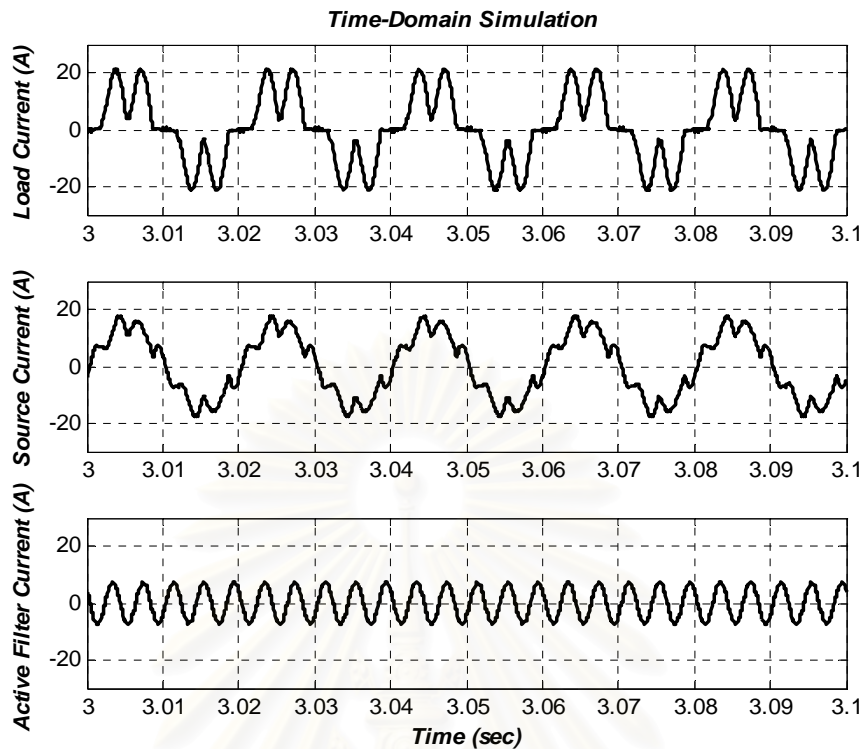
ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปแบบที่ 4.52

	แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก V_{THk}	อิมพีแดนซ์รวม $Z_{(total)k}$	กระแสโหลดคำนวณ I_{Lk}	กระแสโหลด Simulation	ความผิดพลาดของกระแสโหลด
ลำดับที่ 5	19.26	2.17	8.88	8.34	6.41%

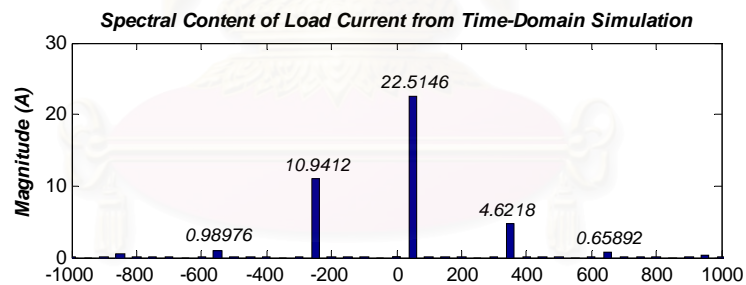
จะเห็นว่า การติดตั้งวงจรกรองที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 จะส่งผลให้กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่แรงดัน $v_{r7}/2 = 0$ ทำให้แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกภายในวงจรสมมูล V_{TH5} มีขนาดเพิ่มขึ้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมของระบบมากขึ้น จึงทำการวิเคราะห์ในกรณีที่มีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เพิ่มเติมเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับในกรณีแรก

กรณีที่ 2 เมื่อติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

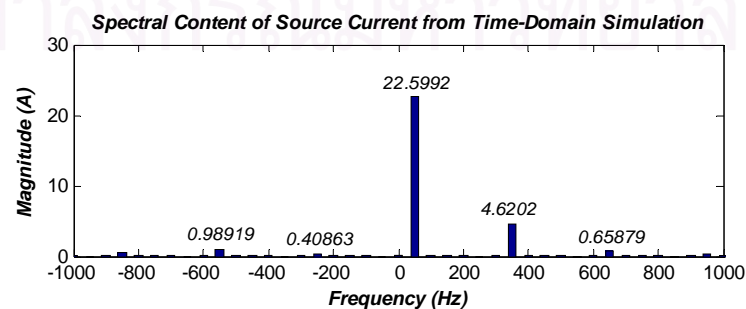
เมื่อทำการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ในระบบในรูปแบบที่ 4.52 ได้ผลการทดสอบดังนี้ รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสที่วงจรกรอง i_{AF7} แสดงในรูปที่ 4.58 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาแสดงในรูปที่ 4.59 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_S^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาแสดงในรูปที่ 4.60 และแสดงสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาแสดงในรูปที่ 4.61



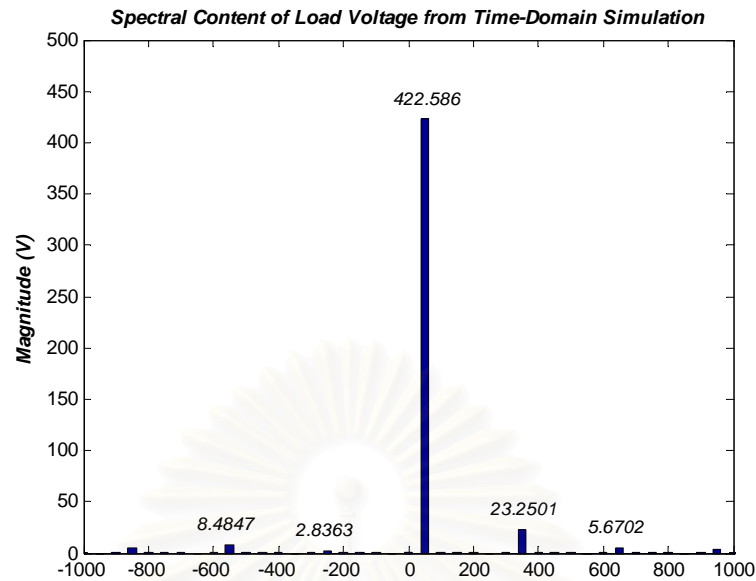
รูปที่ 4.58 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสโหลด i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสที่วงจรกรอง i_{AF5} ของรูปที่ 4.52 เมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5



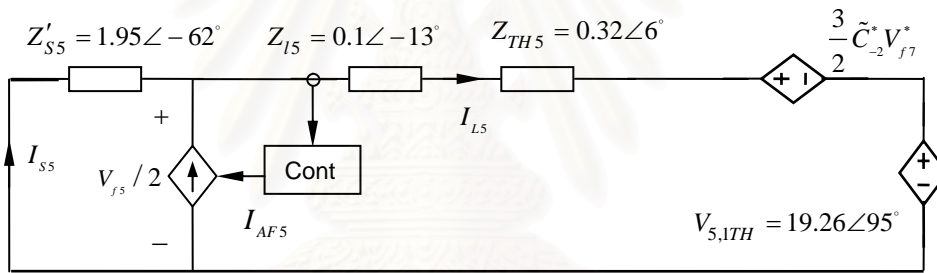
รูปที่ 4.59 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูปที่ 4.52 เมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5



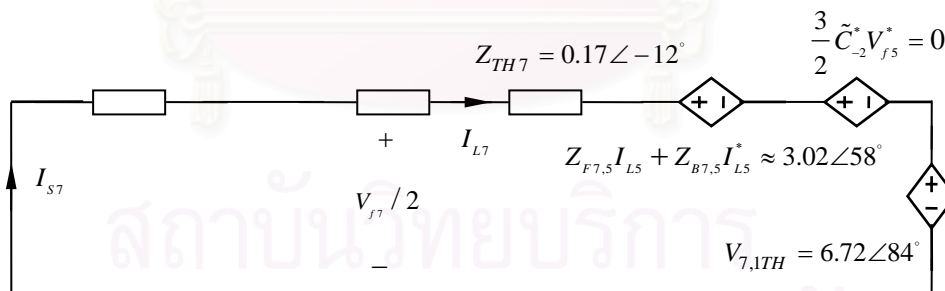
รูปที่ 4.60 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_S^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูปที่ 4.52 เมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5



รูปที่ 4.61 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ v_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาของรูปที่ 4.52 เมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5



Equivalent Circuit for 5th Harmonic Component



Equivalent Circuit for 7th Harmonic Component

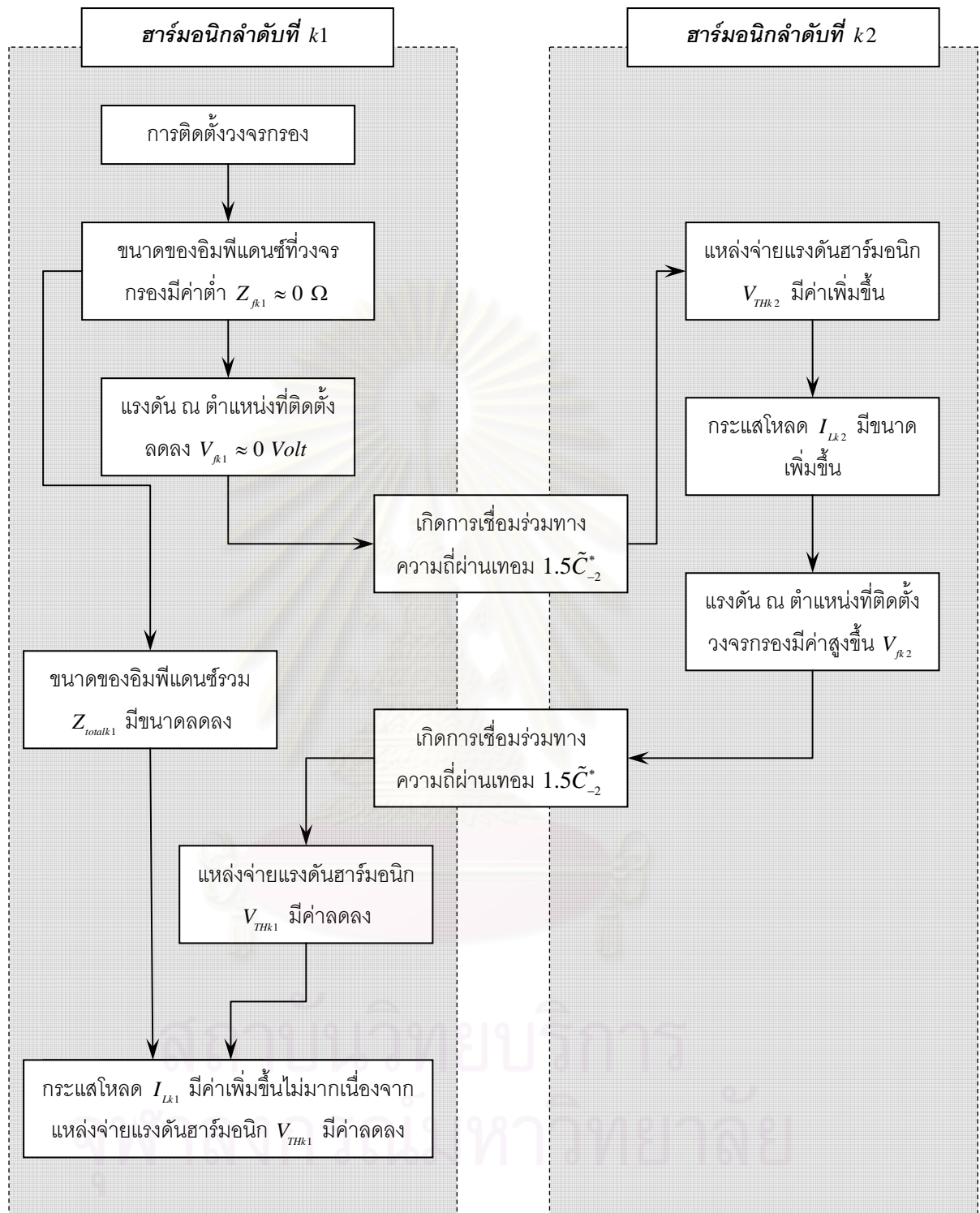
รูปที่ 4.62 วงจรสมมูลของระบบในรูปที่ 4.52 เมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองแยกที่ฟิที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณจากวงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปที่ 4.52 เมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองแยกที่ฟิที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

	แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก V_{THk}	อิมพีแดนซ์รวม	กระแสไหลดคำนวณ I_{Lk}	กระแสไหลด Simulation	ความผิดพลาดของกระแสไหลด
ลำดับที่ 7	10.00	2.68	3.73	4.62	40.91%

พิจารณาวงจรสมมูลในรูปที่ 4.62 เมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จะทำให้แรงดันวงจรกรองที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ลดลงเป็นศูนย์โวลท์ ($V_{f5}/2 = 0$) จะทำให้แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก V_{TH7} มีขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสไหลดที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 จะมีขนาดเพิ่มขึ้นจากเดิมดังแสดงในตารางที่ 4.10 และการเพิ่มขึ้นของแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก V_{TH7} จะทำให้แรงดันวงจรกรองที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 $V_{f7}/2$ เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งในกรณีนี้จะเพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่าจากเดิม ส่งผลกระทบทำให้แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก V_{TH5} มีขนาดลดลงจึงเป็นเหตุให้กระแสไหลดที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เพิ่มขึ้นไม่มากดังแสดงในรูปที่ 4.59 ซึ่งเป็นสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองลำดับที่ 5 อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ที่กล่าวมาเป็นเพียงการคาดการณ์พฤติกรรมอย่างคร่าวๆเท่านั้น จึงมีความผิดพลาดสูงซึ่งในกรณีนี้ถ้าต้องการความถูกต้องมาก ต้องใช้การคำนวณแบบทำซ้ำ

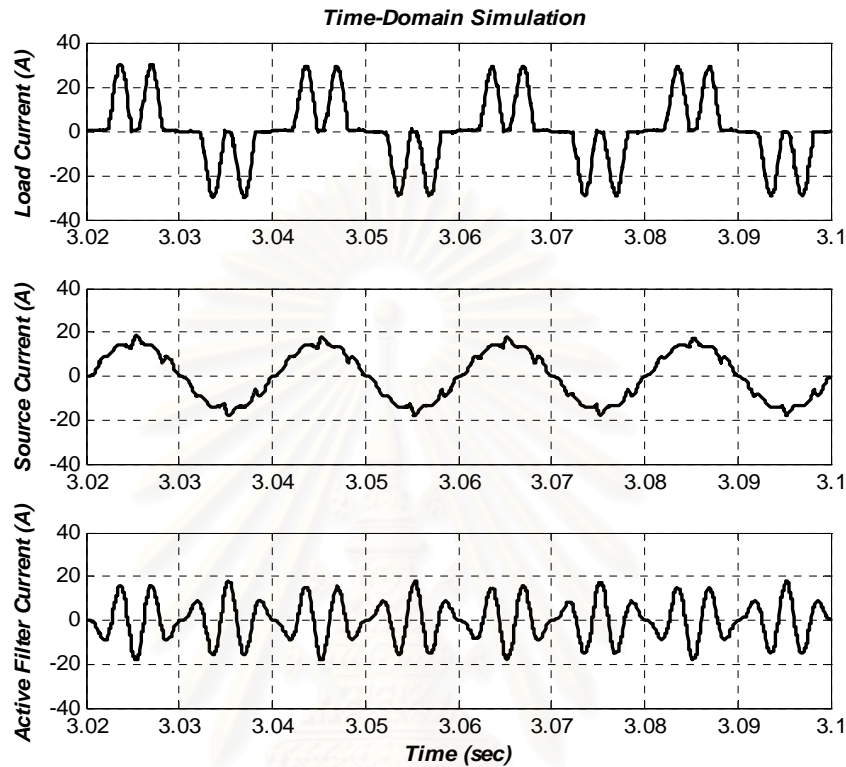
จากกรณีศึกษาทั้ง 2 กรณีที่วิเคราะห์พฤติกรรมของระบบเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนาน จะเห็นว่าในกรณีโหลดแบบคาปาซิทีฟ ขนาดของแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกค่อนข้างจะอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันภายนอกซึ่งในที่นี้หมายถึงแรงดันที่วงจรกรอง ดังนั้นเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกครั้งละ 1 อันดับ แรงดันวงจรกรองที่ลดลงเนื่องจากการติดตั้งวงจรกรองจะส่งผลทำให้แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกในอันดับที่ใกล้เคียงมีขนาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสไหลดและแรงดันวงจรกรองในลำดับใกล้เคียงมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้แรงดันวงจรกรองที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลย้อนกลับไปที่กระทบแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกในอันดับที่ติดตั้งวงจรกรองอีกรอบหนึ่ง โดยจะทำให้แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกมีขนาดลดลงซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแสไหลดที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ติดตั้งวงจรกรองดังแสดงขั้นตอนการมีปฏิสัมพันธ์กันในรูปที่ 4.63 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันฮาร์มอนิกภายนอกมีบทบาทต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลดอย่างมาก โดยสาเหตุที่ทำให้โหลดแบบคาปาซิทีฟมีพฤติกรรมเช่นนี้ก็เพราะว่าอิมพีแดนซ์สมมูล Z_{THK} ภายในมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ภายนอกในที่นี้หมายถึงอิมพีแดนซ์ด้านแหล่งจ่าย ส่งผลให้แรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกที่มีเกือบทั้งหมดปรากฏออกมาภายนอกที่แรงดันโหลด (มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันที่วงจรกรอง) ซึ่งแรงดันนี้จะเป็นตัวควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกในทุกๆความถี่ นอกจากนี้เพราะว่าอิมพีแดนซ์มีขนาดเล็กจึงทำให้เทอมที่เชื่อมร่วมจากกระแสไหลดมาเป็นแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกจึงมีขนาดเล็กตามไปด้วย ส่งผลให้บทบาทของกระแสในการควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกจึงลดน้อยลงไป ดังนั้นแรงดันฮาร์มอนิกภายนอกจึงเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของโหลดแบบคาปาซิทีฟผ่านทางแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกในวงจรสมมูล อย่างไรก็ตามในกรณีที่อิมพีแดนซ์ของโหลดมีขนาดเพิ่มสูงขึ้น เทอมที่เชื่อมร่วมจากกระแสไหลดมาเป็นแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าสูงขึ้น ทำให้กระแสฮาร์มอนิกของโหลดมีบทบาทมากขึ้น และพฤติกรรมของโหลดแบบคาปาซิทีฟจะต่างออกไปจากแผนภาพในรูปที่ 4.63 โดยจะมีความซับซ้อนมากขึ้นเนื่องจากมีเทอมที่เชื่อมร่วมกันระหว่างฮาร์มอนิกมากขึ้น



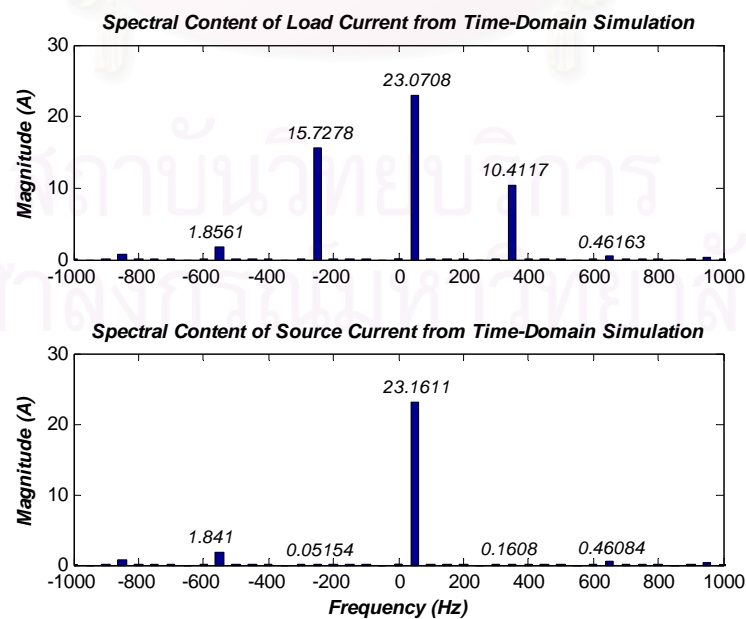
รูปที่ 4.63 รูปแบบการมีปฏิริยาต่อกันระหว่างคู่ฮาร์มอนิกลำดับใกล้เคียง

จากพฤติกรรมของโหลดแบบคาปาซิทีฟที่แสดงในรูปที่ 4.63 ทำให้พอคาดการณ์ได้ว่า ถ้ามีการติดตั้งวงจรกรองทั้ง 2 ลำดับพร้อมกัน กระแสไหลในทั้ง 2 ฮาร์มอนิกจะเพิ่มมากขึ้นกว่าในกรณีติดตั้งวงจรกรองครั้งละ 1 อันดับ เนื่องแต่ละฮาร์มอนิกจะได้รับผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกและผลจาก

การลดลงของอิมพีแดนซ์รวมด้วย สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ในรูปที่ 4.65 จะเห็นว่ากระแสไหลดที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 เพิ่มขึ้นมากกว่าในรูปที่ 4.54 และ 4.59 ซึ่งเป็นสเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ของกระแสไหลดเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 และ 5 ที่ละอันดับ



รูปที่ 4.64 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสไหลด i_L รูปคลื่นสัญญาณของกระแสด้านแหล่งจ่าย i_S และรูปคลื่นสัญญาณของกระแสที่วงจรกรอง i_{AF} เมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7



รูปที่ 4.65 สเปกตรัมของสเปซเวกเตอร์ i_L และ i_S เมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการหาแบบจำลองในโดเมนความถี่ของเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอด โดยได้พัฒนาแบบจำลองขึ้นมา 2 ชนิด คือแบบจำลองแบบแอดมิตแทนซ์และแบบจำลองแบบอิมพีแดนซ์ซึ่งใช้แนวคิดและกระบวนการในการพัฒนาที่คล้ายกัน จะแตกต่างกันที่การนิยามตัวแปรด้านเข้าและตัวแปรด้านออกที่สลับกัน จากแบบจำลองทั้ง 2 ชนิดจะได้มาซึ่งสมการความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมของกระแสและสเปกตรัมของแรงดันไฟสลับของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสในโดเมนความถี่ ซึ่งสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปใช้ในการหาผลตอบสนองของระบบส่งจ่ายเมื่อมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแสได้ ผลจากการคำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาและผลที่ได้จากการทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกัน

นอกจากนี้งานวิจัยยังได้นำเสนอวิธีการสร้างวงจรสมมูลในโดเมนความถี่จากแบบจำลองทั้ง 2 แบบอย่างมีระบบที่เข้าใจง่ายและมีความชัดเจนในรายละเอียด ทำให้วงจรสมมูลมีความง่ายและสะดวกในการนำไปใช้งาน องค์ประกอบของวงจรสมมูลทั้งในส่วนของแอดมิตแทนซ์หรืออิมพีแดนซ์สมมูลและแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกมีความชัดเจนมากกว่างานวิจัยในอดีต เนื่องจากสามารถกำหนดค่าที่แน่นอนของแอดมิตแทนซ์หรืออิมพีแดนซ์สมมูลและสามารถระบุพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกที่มีสาเหตุมาจากการเชื่อมร่วมกันทางความถี่ได้ และได้แสดงให้เห็นว่าโหลดแบบอินดักทีฟเหมาะที่จะใช้วงจรสมมูลแบบแอดมิตแทนซ์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมส่วนโหลดแบบคาปาซิทีฟเหมาะที่จะใช้วงจรสมมูลแบบอิมพีแดนซ์ในการวิเคราะห์พฤติกรรม รวมทั้งได้ชี้ให้เห็นถึงข้อแตกต่างระหว่างวงจรสมมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนากับวงจรสมมูลเดิมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป นอกจากนี้ได้จากตัวอย่างการวิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมของวงจรเรียงกระแสจากก่อนการติดตั้งวงจรรองกับเมื่อมีการติดตั้งวงจรรองพาสซีฟแบบขนานและวงจรรองแยกที่เฟสขนานด้วยวงจรสมมูล พบว่าสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองเชิงเวลาและผลจากการทดลองเป็นอย่างดี

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในลำดับถัดไป

ถึงแม้ว่าแบบจำลองที่ได้นำเสนอสามารถใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกได้ดี แต่ประเด็นที่ควรได้รับการพิจารณาคึกษาเพิ่มเติมคือ แบบจำลองควรที่จะสามารถใช้ในโหมดที่กระแสด้านไฟตรงของวงจรเรียงกระแสไม่ต่อเนื่องหรือในสถานะที่แรงดันทั้ง 3 เฟสไม่สมดุลได้ด้วย ซึ่งจะทำให้แบบจำลองสามารถครอบคลุมสถานะการทำงานของวงจรเรียงกระแสได้มากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] F.Z. Peng. Application issues and characteristics of active power filters. IEEE Ind. Appl. Mag. vol. 4, Sept./Oct., pp. 21-30, 1998.
- [2] A. Monsoor, W.M. Grady, R.S. Thallam, M.T. Doyle, S.D. Krein and M.J. Samotyj. Effect of supply voltage harmonics on the input current of single-phase diode bridge rectifier load. IEEE Trans. Power Delivery. vol. 10, no. 3, pp. 1416-1422, Jul. 1994.
- [3] L. Jinjun, H. Yihong, L. Hongyu, Z. Fang and W. Zhaoan. Quantitative analysis of shunt active filter compensation characteristics under different rectifier load situation. in Proc. IEEE-ISIE, 2002. vol. 4, pp. 1241-1246, July 2002.
- [4] B. Revol, J. Roudet, J.L. Schanen and P. Loizelet. Estimation method of disturbances by a voltage diode rectifier in discontinuous mode in association with a LISN. Conf. Record of IEEE- PESC Annu. Meeting 2002. pp. 1785-1790.
- [5] E. Möllerstedt and B. Bernhardsson. Harmonic transfer function model for a diode converter train. IEEE PES Winter Meeting . 2000, pp. 957-962.
- [6] M. Sakui and H. Fujita. An analytic method for calculating harmonic currents of a three-phase diode bridge rectifier with dc filter. IEEE Trans. Power Electron. vol. 9, No. 6, pp. 631-637, Nov. 1994.
- [7] H. Laird, S. Round and R. Duke. An analytic frequency domain domain of voltage source single phase rectifier. IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 47, no. 3, pp. 525-532, Jun. 2000.
- [8] E. Möllerstedt and B. Bernhardsson. Out of control because of harmonic-an analysis of the harmonic response of an inverter locomotive. IEEE. Contr. Syst. Mag. vol. 20, issue 4, Aug., pp.70-81, 2000.
- [9] N.M. Wereley. Analysis and control of linear periodically time varying systems. Ph.D. dissertation. Dept. of Aeronautics and Astronautics, MIT, 1991.
- [10] H. Akagi and T. Tanaka. Proposal for a new equivalent circuit of diode rectifiers with respect to harmonic. Conf. Record of PCC. ,pp.508-513, 1993.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบจำลองในโดเมนความถี่และวงจรสมมูล ของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอดสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก Frequency Domain Model and Equivalent Circuit of a Three-Phase Diode Rectifier for Harmonic Analysis

ชาติร์ สรรคอนุรักษ์ สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร (02) 218-6534 E-mail:sananurak@hotmail.com

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์ผลของการมีปฏิสัมพันธ์กันของระบบส่งจ่ายไฟ วงจรกรองกับโหลดชนิดวงจรเรียงกระแส 3 เฟส เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทำความเข้าใจพฤติกรรมของระบบเมื่อมีการออกแบบและติดตั้งวงจรกรอง บทความนี้จึงมีเป้าหมายที่จะหาแบบจำลองในโดเมนความถี่ของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอดและแสดงเป็นวงจรสมมูลสำหรับการวิเคราะห์เชิงฮาร์มอนิก โดยได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบกับผลของการจำลองเชิงเวลา

คำสำคัญ: วงจรเรียงกระแสแบบไดโอด, แบบจำลองในโดเมนความถี่, วงจรสมมูล

Abstract

In order to analyze the interaction among the power system and load as three-phase diode rectifier is necessary for understanding the behavior of the overall system when the filter is designed and install. This paper aims to obtain a frequency-domain analytical model of the three-phase diode rectifier as well as its equivalent circuit for harmonic analysis. Accuracy of the proposed model is confirmed by comparison with the result of time-domain simulation.

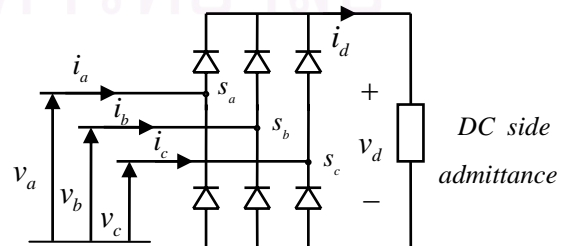
Keywords: Diode Rectifier, Frequency Domain Model, Equivalent Circuit

1. คำนำ

ในปัจจุบันวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์รุ่นใหม่และอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับกันมากขึ้น ซึ่งโหลดประเภทวงจรเรียงกระแสนี้จะสร้างปัญหาให้กับแหล่งจ่ายไฟด้วยการสร้างกระแสฮาร์มอนิกย้อนกลับไปสู่ระบบ ดังนั้นผลกระทบต่อระบบเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกจึงมีมากตามการใช้งานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงคุณภาพของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังเป็นประเด็นที่ถูกให้ความสำคัญมากขึ้นในปัจจุบัน จึงมีการนำอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น วงจรกรองแอกทีฟ วงจรกรอง

พาสซีฟและตัวเก็บประจุที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง มาติดตั้งในระบบเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบให้ได้อยู่เสมอ แต่ในหลายครั้งจะพบว่าเกิดปัญหาหลังจากการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าว เช่น มีการเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์มอนิกทางด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดเมื่อมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟแบบขนานเพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิก จากปัญหาที่เกิดขึ้นการวิเคราะห์ผลกระทบของการมีปฏิสัมพันธ์กัน (interaction) ระหว่างระบบส่งจ่าย วงจรกรองกับ โหลดจึงเป็นสิ่งที่จะต้องได้รับการพิจารณา การหาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอดเพื่อใช้วิเคราะห์ถึงสาเหตุของปัญหาจึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญมาก ถึงแม้ว่าในงานวิจัยที่ผ่านมาจะมีการนำเสนอแบบจำลองเป็นวงจรสมมูลไว้บ้างแล้ว แต่ที่มานั้นยังคลุมเครือเนื่องจากไม่มีรายละเอียดการคำนวณหาวงจรสมมูลในเชิงทฤษฎีแต่เป็นเพียงการอ้างอิงจากพฤติกรรมโดยรวมของวงจรเท่านั้น[1] อีกทั้งยังมีการละเลยผลของการเชื่อมร่วมระหว่างความถี่ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของโหลดประเภทวงจรเรียงกระแส งานวิจัยในระยะหลังจึงได้มีการนำเสนอแบบจำลองโดยใช้เทคนิคทางโดเมนความถี่ในการวิเคราะห์วงจรเรียงกระแสแบบไดโอด แต่ส่วนใหญ่จะเป็นการวิเคราะห์ในวงจรเรียงกระแสแบบเฟสเดียว [2] และไม่มีมีการนำเสนอเป็นวงจรสมมูล[3] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะหาแบบจำลองอย่างละเอียดในโดเมนความถี่และวงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาต่างๆในเชิงฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีโหลดเป็นวงจรเรียงกระแส

2. การหาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแส 3 เฟส



รูปที่ 1 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส

วงจรเรียงกระแส 3 เฟสในรูปที่ 1 เป็นโพลชนิดไม่เชิงเส้น ซึ่งมีลักษณะทางพลวัตแปรผันตามเวลา ขึ้นกับการทำงานของไดโอด วิธีการหาแบบจำลองในโดเมนความถี่ (frequency domain)[3],[4] เป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมและเหมาะกับวงจรประเภทนี้สำหรับการนำแบบจำลองที่ได้ไปวิเคราะห์ปัญหาทางฮาร์มอนิก

หน้าที่ของวงจรเรียงกระแสคือการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณด้านเข้า (50 Hz) ไปเป็นไฟกระแสตรง (0 Hz) การจะทำแบบนี้ได้จะอาศัยการทำงานของสวิตช์ (ไดโอด) โดยที่ลักษณะการเปิด-ปิดวงจรของไดโอดจะเป็นสัญญาณรายคาบดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเราเรียกว่าฟังก์ชันการสวิตช์ (switching function) $[S_\phi] = [s_a \ s_b \ s_c]^T$ โดยจะมีหน้าที่มอดูเลต (modulate) สัญญาณแรงดันด้านเข้า $[v_\phi] = [v_a \ v_b \ v_c]^T$ ไปเป็นสัญญาณแรงดันด้านออก v_d ทางด้านไฟตรง ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันการสวิตช์ สัญญาณแรงดันด้านเข้าและสัญญาณแรงดันด้านออก จึงแสดงได้ดังสมการที่ (1)

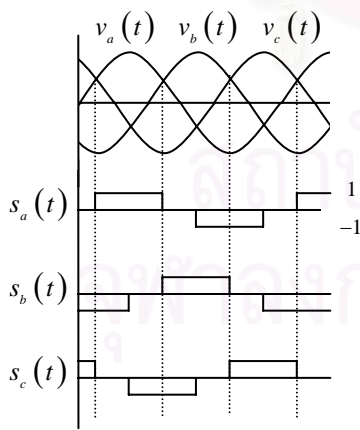
$$[v_d] = [S_\phi]^T [v_\phi] \quad (1)$$

สัญญาณแรงดัน v_d ใน (1) จะทำให้เกิดกระแส i_d ซึ่งคำนวณได้จากค่าแอดมิตแตนซ์ทางด้านไฟตรง $N(s)/D(s)$

$$i_d(s) = \frac{N(s)}{D(s)} v_d(s) \quad (2)$$

กระแสไฟตรง i_d ทางด้านไฟตรงจะถูกมอดูเลตกลับไปทางด้านไฟสลับผ่านฟังก์ชันการสวิตช์กลายเป็นกระแสไฟสลับ $[i_\phi] = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ ทางด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสดังแสดงในสมการที่ (3)

$$[i_\phi] = [S_\phi] i_d \quad (3)$$

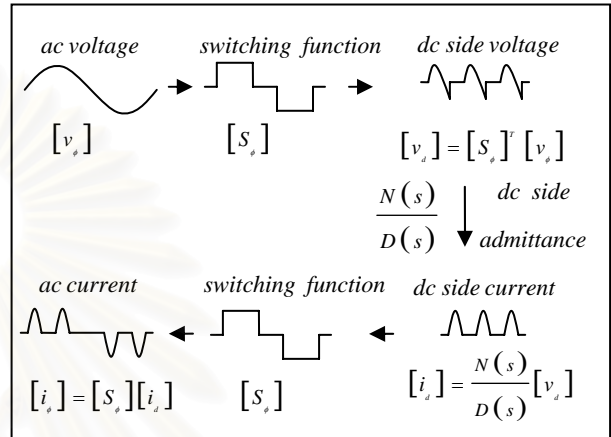


รูปที่ 2 สัญญาณแรงดันด้านเข้าและฟังก์ชันการสวิตช์ในกรณีกระแสต่อเนื่อง

ความสัมพันธ์ของสัญญาณต่างๆที่แสดงในรูปที่ 3 นำไปใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟสลับได้ดังสมการที่ (4) โดยมีข้อกำหนดว่าลักษณะสัญญาณแรงดันและกระแสทั้ง 3 เฟสมีรูปร่าง

เหมือนกันเพียงแต่มุมเฟสต่างกัน 120° เท่านั้น, กระแส i_d มีความต่อเนื่อง, ผลที่เกิดจากการเหลื่อมกันของกระแสสามารถละเลยได้และฟังก์ชันการสวิตช์จะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะมุมเริ่มนำกระแสเท่านั้น โดยมีรูปร่างเหมือนเดิม

$$[i_\phi] = [S_\phi] \frac{N(s)}{D(s)} [S_\phi]^T [v_\phi] \quad (4)$$



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของสัญญาณต่างๆ ในวงจรเรียงกระแส

การคำนวณจะแปลงสัญญาณไปอยู่ในรูปของอนุกรมฟูริเยร์และเพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงเปลี่ยนปริมาณ 3 เฟสเป็นปริมาณสเปซเวกเตอร์โดยใช้เมตริกซ์การแปลง T จากสมการที่ (4) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในรูปปริมาณสเปซเวกเตอร์ $[i_{ac}]$ กับแรงดัน ในรูปปริมาณสเปซเวกเตอร์ $[v_{ac}]$ ในสมการที่ (5)

$$[i_{ac}] = \frac{2}{3} [S] \frac{N(s)}{D(s)} [S]^T [v_{ac}] \quad (5)$$

นิยาม

$$[v_{ac}] = T [v_\phi] = [v_\alpha \ v_\beta]^T \text{ สเปซเวกเตอร์ของแรงดัน}$$

$$[i_{ac}] = T [i_\phi] = [i_\alpha \ i_\beta]^T \text{ สเปซเวกเตอร์ของกระแส}$$

$$[S] = T [S_\phi] = [S_\alpha \ S_\beta]^T \text{ สเปซเวกเตอร์ของฟังก์ชันการสวิตช์}$$

โดยที่

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & 1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์เชิงความถี่เราจะแปลงปริมาณสเปซเวกเตอร์องค์ประกอบ $\alpha\beta$ ไปเป็นปริมาณสเปซเวกเตอร์ในรูปจำนวนเชิงซ้อน 2 องค์ประกอบ โดยใช้เมตริกซ์การแปลง C_f (Forward-Backward Transformation Matrix) ดังนิยามต่อไปนี้

$$[v^+ \ v^-]^T = C_f [v_{ac}] \quad [i^+ \ i^-]^T = C_f [i_{ac}]$$

โดยที่

$$C_f = \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix}$$

ความสัมพันธ์ในสมการที่ (5) ซึ่งเป็นปริมาณในองค์ประกอบ $\alpha\beta$ เมื่อทำการแปลงด้วย C_f จะได้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (6) ซึ่งเป็นปริมาณจำนวนเชิงซ้อน 2 องค์ประกอบ

$$\begin{bmatrix} i^+ \\ i^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} S^+ \\ S^- \end{bmatrix} \frac{N(s)}{D(s)} \begin{bmatrix} S^- & S^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^+ \\ v^- \end{bmatrix} \quad (6)$$

เมื่อกำหนดให้สัญญาณของฟังก์ชันการสวิตช์ของเฟส a ในรูปที่ 3 แสดงในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังสมการที่ (7) ส่วนเฟส b และ c มีการเลื่อนเฟสไป 120 และ 240 องศาตามลำดับ ดังนั้น $[S^+ \ S^-]^T$ ในสมการที่ (6) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (8)

$$s_a = \sum_{n=1,5,7,\dots}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} [S^+ \ S^-]^T &= (C_f^T [S_\phi])^T \\ &= \sum_{n=1,-5,7,-11,\dots} \frac{3}{2} [C_n e^{jn\omega t} \quad C_n^* e^{-jn\omega t}]^T \end{aligned} \quad (8)$$

โดยที่ $C_n = A_n - jB_n$

เมื่อแทนสมการที่ (8) ลงในสมการที่ (6) จะได้ความสัมพันธ์ในรูปปริมาณสเปซเวกเตอร์ในรูปจำนวนเชิงซ้อน 2 องค์ประกอบดังแสดงในสมการที่ (9) และจะเห็นว่า i^+ และ i^- เป็นคอนจูเกต (Conjugate) ซึ่งกันและกัน เพราะฉะนั้นจึงเลือกพิจารณาเฉพาะ i^+ เท่านั้นดังแสดงในสมการที่ (10)

$$\begin{bmatrix} i^+ \\ i^- \end{bmatrix} = \frac{3}{4} \sum_n \sum_m \begin{bmatrix} C_n C_m^* e^{j(n-m)\omega t} & C_n C_m e^{j(n+m)\omega t} \\ C_n^* C_m^* e^{-j(n+m)\omega t} & C_n^* C_m e^{-j(n-m)\omega t} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{N(s-jm\omega)}{D(s-jm\omega)} & 0 \\ 0 & \frac{N(s+jm\omega)}{D(s+jm\omega)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^+ \\ v^- \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} i^+ &= \frac{3}{4} \sum_n \sum_m C_n C_m^* e^{j(n-m)\omega t} \frac{N(s-jm\omega)}{D(s-jm\omega)} v^+ + \\ &\quad \frac{3}{4} \sum_n \sum_m C_n C_m e^{j(n+m)\omega t} \frac{N(s+jm\omega)}{D(s+jm\omega)} v^- \end{aligned} \quad (10)$$

ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสบนโดเมนความถี่ดังแสดงในสมการที่ (10) สังเกตว่ามีเทอม $e^{j(n-m)\omega t}$ และ $e^{j(n+m)\omega t}$ ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากส่วนของระบบที่แปรผันกับเวลาในลักษณะเป็นสัญญาณรายคาบ (time periodic) ซึ่งสัญญาณดังกล่าวก็คือฟังก์ชันการสวิตช์นั่นเอง โดยบทบาทที่สำคัญของเทอม $e^{j(n-m)\omega t}$ และ $e^{j(n+m)\omega t}$ ทำให้เกิดการเชื่อมร่วมความถี่ (frequency coupling) ขององค์ประกอบฮาร์มอนิกในแรงดัน v^+ กับกระแส i^+ ทางด้านไฟสลับซึ่ง

เป็นสัญญาณด้านเข้าของวงจรเรียงกระแส เพื่อผลการเชื่อมร่วมความถี่กำหนดให้สเปซเวกเตอร์แรงดันไฟสลับ v^+ แสดงเป็นอนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังสมการที่ (11)

$$v^+ = \sum_k V_k e^{jk\omega t}; k = 1, -5, 7, -11, \dots \quad (11)$$

เมื่อแทนสเปซเวกเตอร์แรงดันไฟสลับ v^+ และส่วนคอนจูเกต v^- ลงในสมการ (10) จะได้สมการของกระแส i^+ เป็น

$$\begin{aligned} i^+ &= \frac{3}{4} \sum_n \sum_m \sum_k C_n C_m^* \frac{N(j(k-m)\omega)}{D(j(k-m)\omega)} V_k e^{j(n-m+k)\omega t} + \\ &\quad \frac{3}{4} \sum_n \sum_m \sum_k C_n C_m \frac{N(j(m-k)\omega)}{D(j(m-k)\omega)} V_k^* e^{j(n+m-k)\omega t} \end{aligned} \quad (12)$$

สังเกตว่า i^+ ในสมการที่ (12) สามารถแสดงเป็นผลรวมเชิงเส้น (linear combination) ของเทอม $\{e^{j(n-m+k)\omega t}; n, m, k = 1, -5, 7, \dots\}$ และ $\{e^{j(n+m-k)\omega t}; n, m, k = 1, -5, 7, \dots\}$ ได้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโดยทั่วไปแล้วกระแสของวงจรเรียงกระแสในสภาวะคงตัวจะมีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากที่หลายความถี่แม้ว่าแหล่งจ่ายแรงดันจะไม่มีฮาร์มอนิกก็ตาม กลไกการเชื่อมร่วมความถี่ที่แสดงในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (13)

$$I = [Y_F \ Y_B] \begin{bmatrix} V \\ V^* \end{bmatrix} \quad (13)$$

จากสมการที่ (13) แสดงแทนกระแส i^+ และแรงดัน v^+ ได้ด้วยเวกเตอร์องค์ประกอบฮาร์มอนิกได้เป็น I และ V ตามลำดับ ส่วนแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์ Y_F, Y_B มีรูปแบบดังแสดงในสมการที่ (14) และ (15) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมร่วมความถี่

$$I = [I_1 \ I_5 \ I_7 \ I_{11} \ \dots]^T \quad V = [V_1 \ V_5 \ V_7 \ V_{11} \ \dots]^T$$

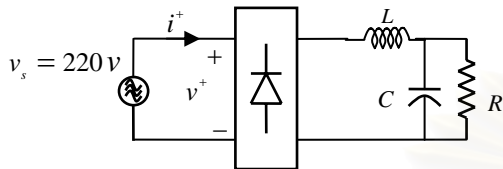
$$Y_F = \begin{bmatrix} Y_{F1,1} & Y_{F1,5} & Y_{F1,7} & \dots \\ Y_{F5,1} & Y_{F5,5} & Y_{F5,7} & \dots \\ Y_{F7,1} & Y_{F7,5} & Y_{F7,7} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Y_B = \begin{bmatrix} Y_{B1,1} & Y_{B1,5} & Y_{B1,7} & \dots \\ Y_{B5,1} & Y_{B5,5} & Y_{B5,7} & \dots \\ Y_{B7,1} & Y_{B7,5} & Y_{B7,7} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (15)$$

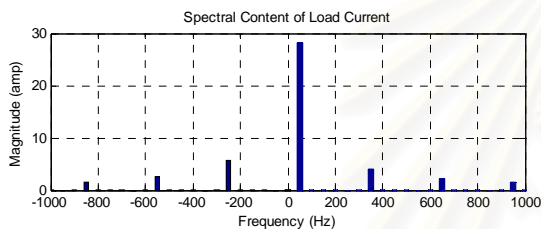
3. ตัวอย่างแบบจำลองที่ได้จากการประยุกต์ทฤษฎีที่พัฒนา

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอ เราจะกำหนดค่าแรงดัน v^+ ให้กับแบบจำลองแล้วคำนวณ

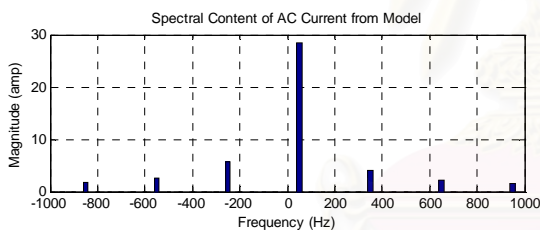
กระแส i^+ จากสมการที่ (12) และผลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับ การจำลองวงจรในเชิงเวลา (time-domain simulation) ในกรณีนี้โหลดของ วงจรเรียงกระแสเป็นความต้านทานขนาด 30 โอห์มและมีตัวเหนี่ยวนำ ขนาด 50 mH และตัวเก็บประจุขนาด $500 \mu F$ เป็นวงจรกรองแสดงใน รูปที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของกระแส i^+ ที่ได้จากการจำลองเชิง เวลาในรูปที่ 5 กับสเปกตรัมกระแส i^+ ที่ได้จากการคำนวณในรูปที่ 6 จะ พบว่ามีความสอดคล้องกันดี



รูปที่ 4 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสที่โหลดความต้านทานและมิกวงจรกรอง



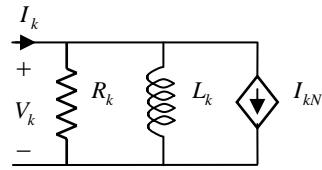
รูปที่ 5 องค์ประกอบฮาร์มอนิกของ i^+ ที่ได้จากการจำลองเชิงเวลา



รูปที่ 6 องค์ประกอบฮาร์มอนิกของ i^+ ที่ได้จากการคำนวณจาก แบบจำลองที่นำเสนอ

ผลจากการวิเคราะห์ ยังสามารถแสดงแบบจำลองเป็นวงจรสมมูลทางด้าน ไฟสลับได้ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลของวงจร เรียงกระแสในรูปที่ 4 จะเห็นความต้านทานสมมูล R_k และตัวเหนี่ยวนำ สมมูล L_k เป็นค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่า แอคมิตแทนซ์ทางด้านไฟสลับของแบบจำลอง โดยจะมีขนาดแตกต่างกัน ไปตามแต่ละความถี่ของวงจรสมมูล ซึ่งมีสาเหตุมาจากกลไกการเชื่อม ร่วมความถี่ที่หลากหลายของฟังก์ชันการสวิตช์โดยความหลากหลายนี้จะ ส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลให้มีขนาดแตกต่างกันในแต่ละ ความถี่ผ่านทางสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันการสวิตช์ ส่วนแหล่งจ่ายกระแส ความคุม (voltage control current source) I_{kN} นั้นเป็นส่วนหนึ่งของกระแสที่ เกิดมาจากการเชื่อมร่วมของแรงดันในค่าหนึ่งมาสร้างเป็นกระแสใน ความถี่ที่ต่างออกไป ดังนั้น I_{kN} จะไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงตามแรงดัน

ของค่าอื่น ๆ $\{V_k\}$ ดังนั้นในการวิเคราะห์ปัญหาเชิงฮาร์มอนิกโดย ใช้วงจรสมมูล ต้องคำนึงถึงพฤติกรรมดังกล่าวด้วย



รูปที่ 7 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอด มองจาก ทางด้านไฟสลับ

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาแบบจำลองในโดเมนความถี่ของ เรียงกระแส 3 เฟสแบบไดโอด และตรวจสอบความถูกต้องของ แบบจำลองที่นำเสนอโดยการเปรียบเทียบกับผลการจำลองเชิงเวลา พบว่ามี ความสอดคล้องกัน สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปใช้ ในการหาผลตอบสนองและสร้างวงจรสมมูล เพื่อดูผลจากการเชื่อมร่วม ความถี่ที่เกิดขึ้นซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์พฤติกรรมของวงจรเรียง กระแสเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพระบบส่งจ่ายไฟได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] F.Z. Peng, "Application issues and characteristics of active power filters," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 4, pp. 21-30, Sept./Oct. 1998.
- [2] E. Möllerstedt and B. Bernhardsson, "Harmonic transfer function model for a diode converter train," *Proc. of IEEE PES Winter Meeting*, 2000, pp. 957-962.
- [3] M. Sakui and H. Fujita, "An analytic method for calculating harmonic currents of a three-phase diode bridge rectifier with dc filter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 9, No. 6, pp. 631-637, Nov. 1994.
- [4] H. Laird, S. Round and R. Duke, "An analytic frequency domain of voltage source single phase rectifier," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 3, pp. 525-532, Jun. 2000.



ชชาติร์ สรรคอนรักษ์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สมบุรณ์ แสงวงศ์วามิชย์ จบการศึกษาระดับ ปริญญาตรี โท และเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก มหาวิทยาลัย NAGOYA ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2528, 2530, และ 2533 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรง ตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชาติรี สรรคอนุรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดชัยนาท สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจาก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2544 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ของปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย