

การปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
แบบกระตุ้นตัวเองด้วยวงจรกรองแอกทีฟ



นาย ประจวบ เขียมสำอาง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3559-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF VOLTAGE QUALITY OF A SELF-EXCITED
INDUCTION GENERATOR USING AN ACTIVE FILTER

Mr. Prachuab Iamsamang

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 2003

ISBN 974-17-3559-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ กระตุ้นตัวเองด้วยวงจรกรองแอกทีฟ
โดย	นายประจวบ เอี่ยมล้ำอาจ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.สมบุญณ์ แสงวงศ์วานิชย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิฑิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.สมบุญณ์ แสงวงศ์วานิชย์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ สุวิทย์ นาคพีระยุทธ)

สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประจวบ เขียมสำอาง : การปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ
กระตุ้นตัวเองด้วยวงจรกรองแอกทีฟ. (IMPROVEMENT OF VOLTAGE QUALITY OF A
SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR USING AN ACTIVE FILTER) อ. ที่ปรึกษา :
อ.ดร. สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์, 96 หน้า. ISBN 974-17-3559-6.

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกมีความเหมาะสมกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโคร
นัสสำหรับการประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานทุติยภูมิเนื่องจากมีราคาถูก มีความคงทน ไม่ต้องการการ
บำรุงรักษามาก เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำสามารถนำมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ
กระตุ้นตัวเองได้โดยการต่อชุดตัวเก็บประจุค่าเหมาะสมคร่อมที่ขั้วต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอาศัย
สภาวะแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กโรเตอร์เหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยแรงดันที่ขั้ว
ต่อในสภาวะอยู่ตัวจะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วโรเตอร์ โหลดและค่าตัวเก็บประจุ อย่างไรก็ตามในทาง
ปฏิบัติเราจะพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีปัญหาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันเมื่อ
ใช้กับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ รวมทั้งเกิดความเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันเมื่อใช้กับโหลดไม่เชิงเส้น
หรือโหลดไม่สมดุล

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่อง
กำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยใช้วงจรกรองแอกทีฟต่อขนานกับตัวเก็บประจุ วงจรกรอง
แอกทีฟจะตรวจจับและชดเชยกระแสฮาร์มอนิก กำลังงานรีแอกทีฟและโหลดไม่สมดุลเพื่อควบคุมให้
แรงดันออกมีขนาดคงที่ มีความสมดุลและปราศจากฮาร์มอนิก ผลการทดสอบระบบแสดงให้เห็นถึง
คุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ดีขึ้นเมื่อมีการชดเชยโดยวงจรกรองแอกทีฟ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2546.....

4370652021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: ACTIVE FILTER / INDUCTION GENERATOR / LOAD COMPENSATION

PRACHUAB IAMSAMANG : IMPROVEMENT OF VOLTAGE QUALITY OF A SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR USING AN ACTIVE FILTER. THESIS ADVISOR: DR. SOMBOON SANGWONGWANICH, 96 pp. ISBN 974-17-3559-6.

Squirrel-cage induction generators are more suitable for renewable energy system than synchronous generators because of their low costs, robustness and less maintenance requirements. The induction machine can be operated as an induction generator by connecting external capacitors across its stator terminals and using the residual flux in the rotor core to build up the voltage. The steady-state output voltage depends on the rotor speed, the load and the capacitor value. However, in practice, it is found that the induction generator exhibits a large voltage drop when feeding inductive loads, and produces voltage distortion and imbalance when feeding nonlinear and unbalanced loads.

To overcome these problems, this thesis presents an improvement of voltage quality of a self-excited induction generator using an active filter connected in parallel with a capacitor. The function of the active filter is to detect and compensate harmonics, current imbalance, and reactive power caused by loads so as to restore a balanced and undistorted output voltage of constant amplitude. Experimental results are given to confirm the effectiveness of the proposed techniques.

Department.....Electrical Engineering..... Student's signature.....
 Field of study.....Electrical Engineering..... Advisor's signature.....
 Academic year...2003.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเอาใจใส่และความใส่ใจอย่างยิ่งจาก อาจารย์ ดร.สมบุญ ธรรมแสงวงศ์วณิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยตลอดมา รวมถึง บริษัท เอ.พี.วาย. เอ็นจิเนียริง ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย ขอขอบคุณโครงการผู้ช่วยสอน (TA) ที่ทำให้มีทุนสำหรับดำเนินชีวิตตลอดจนรุ่นน้องรุ่นพี่และรวมถึงเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ให้ทั้งความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจเล็ก ๆ ที่ยิ่งใหญ่ในการพัฒนางานวิจัย รวมถึงท่านอาจารย์ทั้งหลายที่ให้ความรู้ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบัน

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และน้องสาวผู้ซึ่งให้โอกาสทางการศึกษา สนับสนุนทางการเงินและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
รายการสัญลักษณ์.....	ณ

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง.....	6
2.1 แบบจำลองลักษณะทางพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	6
2.2 การคำนวณขนาดของตัวเก็บประจุกระตุ้น.....	8
2.3 ผลกระทบต่อคุณภาพแรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลด.....	9
3 การปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองด้วย วงจรกรองแอกทีฟ.....	15
3.1 ทฤษฎีการคำนวณองค์ประกอบกระแสด้วยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟที.....	16
3.2 การคุมค่าแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	18
3.3 การคำนวณหากระแสกำลังรีแอกทีฟ.....	22
3.4 การคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกในสายเฟส.....	23
3.5 การคำนวณหากระแสลำดับลบและศูนย์ที่เกิดจากโหลดไม่สมดุล.....	25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6 การคำนวณกระแสค่าส่งชดเชยในกรณีชดเชยทั้งกระแสกำลังรีแอกทีฟ กระแสฮาร์มอนิก และ กระแสไม่สมดุล.....	26
3.7 ผลการจำลองการทำงาน.....	28
4 การออกแบบตัวควบคุม PI สำหรับควบคุมแรงดันบัลไฟตรงและแรงดัน กึ่งกลางบัลไฟตรง.....	40
4.1 การออกแบบส่วนควบคุมแรงดันบัลไฟตรง.....	41
4.2 การออกแบบส่วนควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัล.....	44
5 การควบคุมกระแสแบบทำซ้ำ.....	48
5.1 การสร้างและควบคุมกระแสชดเชย.....	48
5.2 ตัวควบคุมแบบทำซ้ำ.....	50
5.3 ตัวควบคุมแบบทำซ้ำที่มีการปรับแต่ง.....	53
5.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	55
5.5 ผลการทดสอบการทำงาน.....	58
6 การสร้างระบบจริง.....	60
6.1 ฮาร์ดแวร์ของระบบ.....	60
6.2 ซอฟต์แวร์ของระบบ.....	62
7 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ.....	66
7.1 การทดสอบในสภาวะไร้โหลด.....	66
7.2 การควบคุมขนาดแรงดัน.....	69
7.3 การทดสอบในสภาวะโหลดไม่สมดุล.....	75
7.4 การทดสอบในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้น.....	78
8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	89
8.1 สรุปผลงานวิจัย.....	89
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	89

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....91

ภาคผนวก.....93

 ภาคผนวก ก การพิสูจน์สมการ Recursive ของการทำ DFT แบบเต็มคาบ.....94

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....96



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

6.1 พิกัดและค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในงานวิจัย.....61



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 แผนภาพการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง.....	1
1.2 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองซึ่งใช้วงจรกรองแอกทีฟ ต่อขนานเพื่อปรับปรุงการทำงาน.....	4
2.1 แผนภาพการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง.....	6
2.2 วงจรสมมูลต่อเฟสที่สภาวะอยู่ตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง.....	8
2.3 จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง.....	9
2.4 ผลการจำลองการทำงานขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเริ่มจ่ายโหลดความต้านทาน 210 Ω อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ 800 mH.....	10
2.5 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นกระแส-แรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลด มอเตอร์ที่มีค่าความเหนี่ยวนำ.....	11
2.6 ผลการจำลองการทำงานขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเริ่มจ่ายโหลดไม่สมดุล.....	12
2.7 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นกระแส-แรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จ่ายโหลดไม่สมดุล.....	12
2.8 ผลการจำลองการทำงานขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น.....	13
2.9 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นกระแส-แรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จ่ายโหลดไม่เชิงเส้น.....	14
3.1 วงจรโดยรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองซึ่งใช้วงจรกรองแอกทีฟ ต่อขนานเพื่อปรับปรุงการทำงาน.....	15
3.2 แผนภาพการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกจากฟังก์ชันอินยัย $D_h(z)$	17
3.3 การทำรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีบนแกนอ้างอิงหมุน.....	18
3.4 กระแสกำลังรีแอกทีฟในส่วนต่าง ๆ ในระบบ.....	19
3.5 แผนภาพแนวคิดการควบคุมแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	19
3.6 การประมาณเชิงเส้นแบบท่อนของ magnetization curve	20
3.7 แกนอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหากระแสกำลังรีแอกทีฟที่องค์ประกอบมูลฐาน.....	22
3.8 แผนภาพการคำนวณหากระแสกำลังรีแอกทีฟ.....	23
3.9 แกนอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก.....	24
3.10 แผนภาพการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกในสายเฟส.....	24
3.11 แกนอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหากระแสลำดับลบที่องค์ประกอบมูลฐาน.....	25
3.12 แผนภาพการคำนวณหากระแสมูลฐานลำดับลบ.....	26

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 การคำนวณกระแสชดเชยกรณีสดเชยทุกองค์ประกอบกระแส.....	27
3.14 การคำนวณกระแสชดเชยที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	28
3.15 ผลจำลองการสร้างแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง.....	29
3.16 ผลจำลองสภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อวงจรรองแยกที่ฟเริ่มทำงาน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในสภาวะไร้โหลด.....	30
3.17 ผลจำลองที่สภาวะอยู่ตัวของกระแส-แรงดัน (U-phase) เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อยู่ในสภาวะไร้โหลด.....	30
3.18 ผลจำลองสภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อจ่ายโหลดแบบขั้นขนาดใกล้เคียงค่าพิกัด....	32
3.19 การคำนวณกระแสชดเชยที่ใช้ในการจำลองการทำงานโดยมีกระแสป้อนไปหน้า ในวงรอบควบคุมแรงดันผ่านอัตราขยาย K.....	32
3.20 ผลจำลองสภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อจ่ายโหลดแบบขั้นขนาดใกล้เคียงค่าพิกัด โดยใช้การป้อนไปหน้าช่วยในการควบคุมแรงดัน.....	33
3.21 ผลจำลองที่สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อปลดโหลดโดยใช้การป้อนไปหน้า ช่วยในการควบคุมแรงดัน.....	33
3.22 ผลการจำลองที่สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ.....	34
3.23 ผลการจำลองที่สภาวะอยู่ตัวของกระแส-แรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ.....	35
3.24 ผลการจำลองที่สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันขณะวงจรรองแยกที่ฟเริ่มทำงาน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่สมดุล.....	36
3.25 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จ่ายโหลดไม่สมดุลโดยมีวงจรรองแยกที่ฟทำงานอยู่.....	36
3.26 ผลการจำลองของกระแสนิวทรัลด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและด้านโหลด ขณะวงจรรองแยกที่ฟเริ่มทำงาน.....	37
3.27 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแส-แรงดันที่สภาวะชั่วคราวขณะวงจรรองแยกที่ฟเริ่มทำงาน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น.....	38
3.28 ผลการจำลองที่สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดัน (U-phase) เมื่อวงจรรองแยกที่ฟ เริ่มทำงานโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น (ภาพขยายของรูปที่ 3.27).....	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.29 ผลการจำลองที่สภาวะอยู่ตัวของกระแส-แรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จ่ายโหลดไม่เชิงเส้น.....	39
4.1 แผนภาพของการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง.....	41
4.2 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่ใช้ในการออกแบบ.....	42
4.3 แผนภาพของส่วนควบคุมแรงดันบัลไฟตรงหลังจากประมาณส่วนคำนวณ รากที่สองให้เป็นเชิงเส้น.....	43
4.4 นิยามการแยกไหลของกระแสเข้าตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2	45
4.5 แผนภาพการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัลไฟตรง.....	46
5.1 การเชื่อมต่อวงจรกรองแอกทีฟเข้ากับระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	48
5.2 แผนภาพวงรอบควบคุมกระแสของวงจรกรองแอกทีฟ.....	49
5.3 ตัวควบคุมแบบทำซ้ำในเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง.....	50
5.4 ตำแหน่งขั้วและศูนย์ของตัวควบคุมแบบทำซ้ำ.....	51
5.5 ผลตอบเชิงความถี่ของตัวควบคุมแบบทำซ้ำ.....	51
5.6 ระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำ.....	52
5.7 ระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำที่มีการปรับแต่ง.....	54
5.8 ผลตอบเชิงความถี่ของตัวกรองผ่านต่ำ $Q(z)$	54
5.9 ผลตอบเชิงความถี่ของตัวควบคุมแบบทำซ้ำเมื่อใส่ตัวกรองผ่านต่ำ $Q(z)$	55
5.10 ระบบควบคุมสมมูลของระบบควบคุมแบบทำซ้ำในรูปที่ 5.7.....	56
5.11 อัตราขยายของ $Q(z)$ และ $1+KL(z)$	57
5.12 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำ.....	58
5.13 ผลการทดลองจริงของระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำกรณีสั่งงานด้วย กระแสคำสั่งชดเชยทุกองค์ประกอบกระแส.....	59
5.13 ผลการทดลองจริงของระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำกรณีสั่งงานด้วย กระแสคำสั่งชดเชยโหลดไม่สมดุล.....	59
6.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรกรองแอกทีฟซึ่งต่อขนานเข้ากับระบบของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง.....	60
6.2 แผนภาพการคำนวณในส่วนซอฟต์แวร์ของวงจรกรองแอกทีฟ.....	65
7.1 การสร้างแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง.....	67

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.2 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อวงจรรองแยกที่ฟเริ่มทำงาน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในสภาวะไร้โหลด.....	67
7.3 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (U-phase) ที่สภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อยู่ในสภาวะไร้โหลด.....	68
7.4 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (V-phase) ที่สภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อยู่ในสภาวะไร้โหลด.....	68
7.5 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (W-phase) ที่สภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ อยู่ในสภาวะไร้โหลด.....	69
7.6 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อจ่ายโหลดแบบขั้นขนาดใกล้เคียงค่าพิกัด เมื่อไม่มีการป้อนไปหน้าของกระแส.....	70
7.7 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อจ่ายโหลดแบบขั้นขนาดใกล้เคียงค่าพิกัด โดยใช้การป้อนไปหน้าของกระแสช่วยในการควบคุมแรงดัน.....	71
7.8 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อปลดโหลดโดยใช้การป้อนไปหน้าของกระแส ช่วยในการควบคุมแรงดัน.....	72
7.9 รูปคลื่นกระแส-แรงดันขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ.....	73
7.10 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (U-phase) ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ.....	74
7.11 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (V-phase) ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ.....	64
7.12 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (W-phase) ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ.....	75
7.13 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันขณะวงจรรองแยกที่ฟเริ่มทำงานโดย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่สมดุล.....	76
7.14 สภาวะชั่วคราวของกระแสในทรานส์ดักชันโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขณะวงจรรองแยกที่ฟเริ่มทำงาน.....	77
7.15 รูปคลื่นกระแส-แรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเริ่มจ่ายโหลดไม่สมดุล ในขณะที่วงจรรองแยกที่ฟทำงาน.....	77
7.16 รูปคลื่นกระแสโหลดเฟส w, กระแสในทรานส์ดักชันโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อเริ่มจ่ายโหลดไม่สมดุลในขณะที่วงจรรองแยกที่ฟทำงาน.....	78

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.17 รูปคลื่นกระแส-แรงดันขณะวงจรรองแอกทีฟเริ่มทำงาน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น.....	80
7.18 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดัน (U-phase) ขณะวงจรรองแอกทีฟเริ่มทำงาน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น.....	80
7.19 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดัน (V-phase) ขณะวงจรรองแอกทีฟเริ่มทำงาน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น.....	81
7.20 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดัน (W-phase) ขณะวงจรรองแอกทีฟเริ่มทำงาน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น.....	81
7.21 รูปคลื่นกระแส-แรงดันขณะเริ่มจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นโดยที่วงจรรองแอกทีฟทำงาน.....	82
7.22 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดัน (U-phase) ขณะเริ่มจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น โดยที่วงจรรองแอกทีฟทำงาน.....	82
7.23 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดัน (V-phase) ขณะเริ่มจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น โดยที่วงจรรองแอกทีฟทำงาน.....	83
7.24 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดัน (W-phase) ขณะเริ่มจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น โดยที่วงจรรองแอกทีฟทำงาน.....	83
7.25 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน(U-phase) ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จ่ายโหลดไม่เชิงเส้นและวงจรรองแอกทีฟทำงาน.....	84
7.26 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (V-phase) ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จ่ายโหลดไม่เชิงเส้นและวงจรรองแอกทีฟทำงาน.....	84
7.27 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน(W-phase)ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จ่ายโหลดไม่เชิงเส้นและวงจรรองแอกทีฟทำงาน.....	85
7.28 สเปกตรัมของกระแสในสายเฟส (U-phase) ก่อนและหลังวงจรรองแอกทีฟทำงาน.....	85
7.29 สเปกตรัมของกระแสในสายเฟส (V-phase) ก่อนและหลังวงจรรองแอกทีฟทำงาน.....	86
7.30 สเปกตรัมของกระแสในสายเฟส (W-phase) ก่อนและหลังวงจรรองแอกทีฟทำงาน.....	86
7.31 สเปกตรัมของแรงดันเฟส (U-phase) ก่อนและหลังวงจรรองแอกทีฟทำงาน.....	87
7.32 สเปกตรัมของแรงดันเฟส (V-phase) ก่อนและหลังวงจรรองแอกทีฟทำงาน.....	87
7.33 สเปกตรัมของแรงดันเฟส (W-phase) ก่อนและหลังวงจรรองแอกทีฟทำงาน.....	88
ก.1 แสดงหลักการเลื่อนกรอบข้อมูลในการทำ Running DFT.....	94

รายการสัญลักษณ์

- $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{s0}$: องค์ประกอบของกระแสในขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta - 0$
- $i_{m\alpha}, i_{m\beta}$: องค์ประกอบของกระแสกระตุ้นบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$
- $i_{r\alpha}, i_{r\beta}$: องค์ประกอบของกระแสในโรเตอร์บนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$
- i_{Lu}, i_{Lv}, i_{Lw} : กระแสไหลดเฟส $u - v - w$
- $i_{L\alpha}, i_{L\beta}, i_{L0}$: องค์ประกอบของกระแสไหลดบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta - 0$
- i_{Ld}, i_{Lq} : องค์ประกอบของกระแสไหลดบนแกนอ้างอิง $d - q$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วพื้นฐานในทิศบวก
- i_{1d}, i_{1q} : องค์ประกอบมูลฐานลำดับบวกของกระแสไหลดบนแกนอ้างอิงหมุน $d - q$
- $i_{1q\alpha}, i_{1q\beta}$: องค์ประกอบกระแสกำลังรีแอกทีฟที่ความเร็วพื้นฐานบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$
- i_{L-1d}, i_{L-1q} : องค์ประกอบของกระแสไหลดบนแกนอ้างอิง $d - q$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วพื้นฐานในทิศลบ
- i_{-1d}, i_{-1q} : องค์ประกอบมูลฐานลำดับลบของกระแสไหลดบนแกนอ้างอิงหมุน $d - q$
- $i_{-1\alpha}, i_{-1\beta}$: กระแสมูลฐานลำดับลบบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$
- i_{Lhd}, i_{Lhq} : องค์ประกอบของกระแสไหลดบนแกนอ้างอิง $d - q$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วฮาร์มอนิก
- i_{hd}, i_{hq} : องค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสไหลดบนแกนอ้างอิงหมุน $d - q$
- $i_{h\alpha}, i_{h\beta}$: กระแสฮาร์มอนิกบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$
- i_{uq} : กระแสควบคุมขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
- $i_{uq\alpha}, i_{uq\beta}$: กระแสควบคุมขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$
- $i_{F\alpha}, i_{F\beta}, i_{F0}$: กระแสชดเชยทุกองค์ประกอบบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta - 0$
- i_{Ld} : องค์ประกอบฮาร์มอนิกรวมของกระแสไหลดบนแกนอ้างอิงหมุน d
- i_{dc} : กระแสควบคุมแรงดันบัสไฟตรง
- $i_{dc\alpha}, i_{dc\beta}$: กระแสควบคุมแรงดันบัสไฟตรงบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$
- i_{mp} : กระแสควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัส

\hat{I}_L	: เฟสเซอร์ของกระแสไหลด
\hat{I}_s	: เฟสเซอร์ของกระแสในขดลวดสเตเตอร์
\hat{I}_c	: เฟสเซอร์ของกระแสตัวเก็บประจุกระตุ้น
\hat{I}_r	: เฟสเซอร์ของกระแสโรเตอร์ที่อ้างอิงด้านสเตเตอร์
\hat{I}_m	: เฟสเซอร์ของกระแสกระตุ้น
\bar{u}_s	: สเปซเวกเตอร์ของแรงดันเฟส
$u_{s\alpha}, u_{s\beta}, u_{s0}$: แรงดันเฟสบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta - 0$
u_{sd}, u_{sq}	: องค์ประกอบของแรงดันเฟสบนแกนอ้างอิง $d - q$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วพื้นฐานในทิศทาง
\hat{U}_s	: เฟสเซอร์ของแรงดันเฟส
\hat{U}_m	: เฟสเซอร์ของ magnetizing voltage
$\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}, \Psi_{s0}$: ฟลักซ์คลื่นขดลวดสเตเตอร์บนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta - 0$
$\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$: ฟลักซ์คลื่นขดลวดโรเตอร์บนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$
$\Psi_{m\alpha}, \Psi_{m\beta}$: ฟลักซ์ร่วมบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$
L_{ls}, L_{lr}	: ความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์ และโรเตอร์ตามลำดับ
R_s, R_r	: ความต้านทานขดลวดสเตเตอร์และโรเตอร์ตามลำดับ
ω_m, ω_r	: ความเร็วโรเตอร์ทางกล และ ทางไฟฟ้าตามลำดับ
R_L, L_L	: ความต้านทานและความเหนี่ยวนำของไหลดตามลำดับ
L_m	: ความเหนี่ยวนำร่วม
R_c	: ความต้านทานสมมูลของกำลังสูญเสียในแกนเหล็ก
T_e	: แรงบิดต้านกลับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
C	: ขนาดของตัวเก็บประจุ
ω_b	: ค่าฐานของความถี่เชิงมุมเท่ากับ 100π rad/s
s	: ค่าสลิป

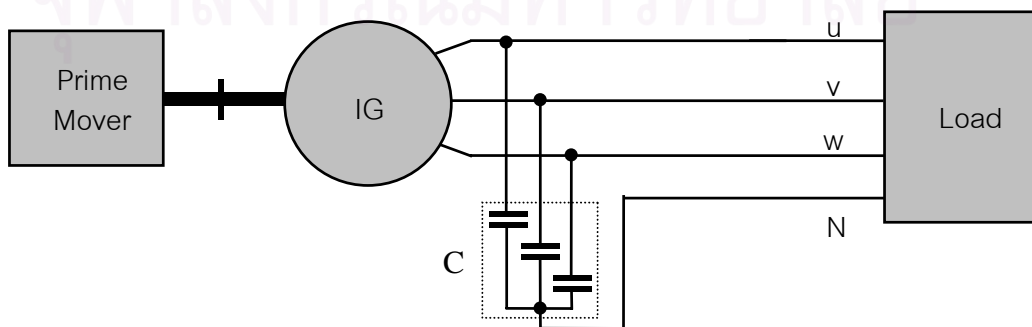
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากความต้องการในการใช้พลังงานของมนุษย์นั้นเพิ่มขึ้นตลอดเวลา แต่แหล่งพลังงานจากธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน น้ำมัน หรือ แก๊สธรรมชาตินั้นมีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งการใช้พลังงานเหล่านี้ก็ได้สร้างมลภาวะให้เกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นมนุษย์จึงมีแนวคิดที่จะหันมาใช้แหล่งพลังงานแหล่งใหม่ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและราคาถูก แหล่งพลังงานดังกล่าวเรียกว่า แหล่งพลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานเชื้อเพลิงชีวะภาพ หรือ ฝ่ายทดน้ำขนาดเล็ก ซึ่งเราสามารถนำพลังงานเหล่านี้มาใช้ในหลาย ๆ ลักษณะงาน รูปแบบหนึ่งคือเป็นพลังงานของตัวต้นกำลังสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า

ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้พลังงานทดแทนนี้เป็นระบบผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกจึงมีความเหมาะสมกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสำหรับการประยุกต์ใช้กับแหล่งพลังงานเหล่านี้ เนื่องจากมีราคาถูก มีความคงทน ไม่ต้องการการบำรุงรักษามาก[2,5,7] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถใช้งานได้ทั้งในลักษณะการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าอื่นหรือใช้งานเป็นระบบเดี่ยว เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่ออยู่กับแหล่งจ่ายอื่น ๆ (เช่น แหล่งจ่ายจากการไฟฟ้า) แรงดันและความถี่ด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับแรงดันและความถี่ของแหล่งจ่ายที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะรับกำลังงานรีแอกทีฟซึ่งจำเป็นในการสร้างฟลักซ์มาจากแหล่งจ่าย ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะส่งกำลังงานเข้าสู่ระบบก็ต่อเมื่อความเร็วรอบมีค่าสูงกว่าความเร็วซิงโครนัส แต่ช่วงในการแปรค่าความเร็วรอบก็จะถูกจำกัดด้วยค่าสลลิปโดยสลลิปต้องไม่มากเกินไปเพื่อไม่ให้เกิดการไหลเกินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 แผนภาพการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง

การทำงานอีกรูปแบบหนึ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือการทำงานในโหมดกระตุ้นตัวเอง เครื่องจักรกลเหนี่ยวนำสามารถนำมาใช้งานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองได้โดยการต่อชุดตัวเก็บประจุค่าเหมาะสมคร่อมที่ขั้วต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และอาศัยสภาวะแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กโรเตอร์เหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า เมื่อเราจ่ายแรงบิดทางกลทำให้โรเตอร์หมุนก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำค่าเล็ก ๆ ขึ้นที่ขั้วต่อ ทำให้เกิดการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่จ่ายกระแสกระตุ้นไปสร้างฟลักซ์เสริมกับฟลักซ์ตกค้างทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลสะท้อนกลับทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุและกระแสกระตุ้นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันจะถูกจำกัดด้วยการอิ่มตัวของแกนเหล็กในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยแรงดันที่ขั้วต่อในสภาวะอยู่ตัวจะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วโรเตอร์, โหลด และค่าตัวเก็บประจุ

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเราจะพบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีปัญหาเรื่องการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันเมื่อจ่ายโหลดแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำเนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองจำเป็นต้องใช้กำลังรีแอกทีฟจากแหล่งจ่ายภายนอก(ตัวเก็บประจุ)ในการสร้างฟลักซ์ ดังนั้นตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเองจึงไม่สามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำได้ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุจะแบ่งจ่ายกำลังรีแอกทีฟบางส่วนไปให้โหลด ทำให้กำลังรีแอกทีฟสำหรับการสร้างฟลักซ์ลดลงเป็นผลให้แรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟาลดลงอย่างมาก และโดยปกติแม้ในกรณีที่จ่ายโหลดความต้านทานอย่างเดียวก็ทำให้แรงดันลดลงพอสมควรอยู่แล้วเนื่องจากการลดลงของความถี่ด้านออกทางไฟฟ้าเพื่อเพิ่มค่าสลิปและค่ากำลังงานขาเข้า ทำให้จุดสมดุลใหม่ของแรงดันเลื่อนไปในทิศทางที่แรงดันลดลง นอกจากนั้นแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังมีปัญหาเรื่องการเกิดความเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันเมื่อจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น หรือเกิดความไม่สมดุลเมื่อจ่ายโหลดไม่สมดุล[10] เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ทำงานในโหมดกระตุ้นตัวเองนี้จ่ายโหลดที่เป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์ โหลดเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกไหลในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นผลให้แรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นด้วยกระแสฮาร์มอนิกทำให้มีการสูญเสียมากขึ้นในขดลวดเกิดเป็นความร้อนสูงกว่าปกติ ส่วนในกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดที่ไม่สมดุล องค์ประกอบลำดับลบ (negative sequence component) ของกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากโหลดไม่สมดุลทำให้เกิดระลอกในแรงบิดด้านกลับและเป็นผลให้เกิดการสั่นในโรเตอร์ ถ้าความถี่ธรรมชาติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใกล้เคียงกับความถี่ในการสั่นนี้ก็จะทำให้การสั่นเพิ่มความรุนแรงขึ้นจนสร้างความเสียหายแก่โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

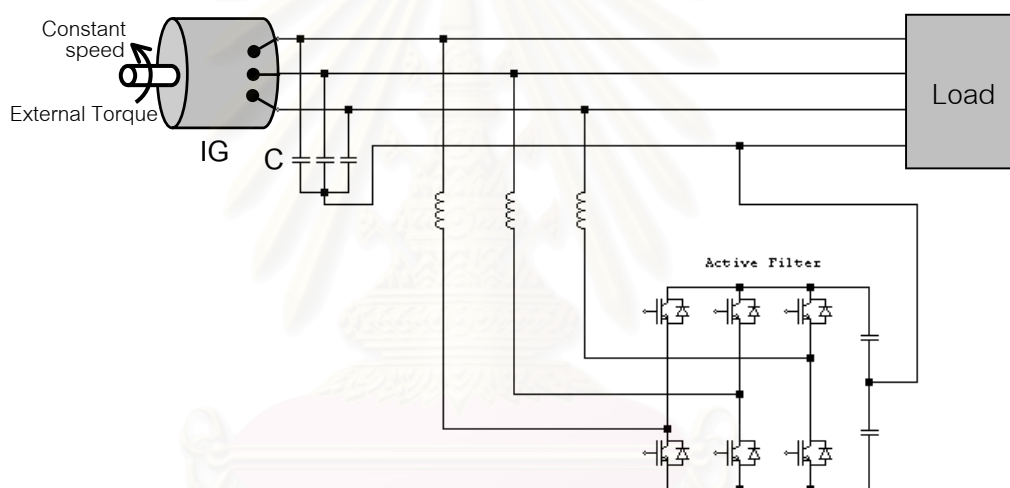
งานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้มีการนำเสนอมาแล้วอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น

Shashauk Wekhande และ Vivek Agarwal (1999)[10] ได้นำเสนอการใช้อินเวอร์เตอร์ต่อขนานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำและใช้หลักการควบคุมแบบง่าย ๆ เพื่อให้สามารถสร้างระบบในเชิงแอนะล็อกได้ โดยจะควบคุมกระแสด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับค่าคำสั่งซึ่งกำหนดโดยวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงร่วมกับวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากวงรอบควบคุมแรงดันด้านออกไม่มีการป้อนไปหน้าของสัญญาณกระแสกำลังรีแอกทีฟขององค์ประกอบมูลฐานและวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงไม่มีการป้อนไปหน้าของสัญญาณกระแสกำลังแอกทีฟขององค์ประกอบมูลฐาน ดังนั้นระบบจึงให้ผลตอบในสภาวะชั่วคราวที่ไม่ดีนัก

S.C.Kuo และ L.Wang (2001)[7] ได้นำเสนอวิธีปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีสมรรถนะดีขึ้น กล่าวคือใช้การตรวจจับกระแสด้านโหลดแล้วใช้การย้ายแกนอ้างอิงจากแกนนิ่งไปเป็นแกนหมุน (d-q axis synchronous rotating reference frame) แยกองค์ประกอบกระแสโหลดออกเป็นสองส่วนคือ กระแสกำลังแอกทีฟและกระแสกำลังรีแอกทีฟ โดยสัญญาณกระแสกำลังรีแอกทีฟจะถูกนำไปรวมกับสัญญาณกระแสที่มาจากวงรอบควบคุมแรงดันคล้ายกับเป็นสัญญาณป้อนไปหน้าทำให้สภาวะชั่วคราวของวงรอบควบคุมแรงดันมีผลตอบดีขึ้นเมื่อปลดหรือจ่ายโหลดที่ดิ่งกำลังรีแอกทีฟ ในส่วนของสัญญาณกระแสกำลังแอกทีฟได้นำไปกรองแยกเอากระแสกำลังแอกทีฟที่ความถี่ฮาร์มอนิกออกมาแล้วนำไปรวมกับสัญญาณกระแสที่มาจากวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงเสมือนเป็นสัญญาณป้อนไปหน้าเช่นกัน แต่การใช้ตัวกรองเพื่อกรองแยกเอากระแสกำลังแอกทีฟที่ความถี่ฮาร์มอนิกออกมาอาจทำได้ไม่สมบูรณ์ ทำให้มีสัญญาณกระแสกำลังแอกทีฟในส่วนขององค์ประกอบมูลฐานปนอยู่ในกระแสคำสั่งซึ่งเป็นผลให้วงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงต้องทำงานหนักขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยอาศัยวงจรกรองแอกทีฟสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย[1]ต่อขนานเข้ากับระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยมีวงจรเป็นดังรูปที่ 1.2 วงจรกรองแอกทีฟนี้ใช้การตรวจจับกระแสทางด้านโหลด 3 เฟส การคำนวณองค์ประกอบกระแสในสายเฟสนั้นใช้วิธีคำนวณแบบรีเคอร์ซีฟดีเฟพที (Recursive Discrete Fourier Transform, RDFT) ซึ่งมีข้อดีคือเป็นการคำนวณที่ง่ายและให้ผลการคำนวณเป็นรูปคลื่นขององค์ประกอบกระแสที่เราต้องการชัดเจนโดยตรง[11] การสร้างกระแสชดเชยใช้การควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ (Repetitive Control) ซึ่งมีข้อดีคือเป็น

วิธีที่ง่าย สามารถสร้างระบบในเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องได้ ค่าผิดพลาดของกระแสที่สภาวะอยู่ตัวมีค่าต่ำ และความถี่การสวิตช์มีค่าคงที่ วงจรกรองแอกทีฟจะทำหน้าที่ควบคุมแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีค่าคงที่อยู่เสมอโดยการจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพื่อสร้างฟลักซ์ที่เหมาะสม วงจรกรองแอกทีฟยังจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับโหลดที่มีความเหนี่ยวนำแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะจ่ายแค่เพียงกำลังแอกทีฟเท่านั้นทำให้การควบคุมแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำได้ง่ายขึ้น วงจรกรองแอกทีฟยังจ่ายกระแสชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่โหลดสร้างขึ้นทำให้กระแสทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีลักษณะใกล้เคียงไซน์ซึ่งจะช่วยลดความผิดเพี้ยนของแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ นอกจากนี้วงจรกรองแอกทีฟยังทำหน้าที่จ่ายกระแสเพื่อชดเชยความไม่สมดุลของโหลดทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามองเห็นโหลด 3 เฟสมีความสมดุลเสมอ



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง
ซึ่งใช้วงจรกรองแอกทีฟต่อขนานเพื่อปรับปรุงการทำงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาวิธีการใช้วงจรกรองแอกทีฟต่อขนานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองเพื่อแก้ไขผลกระทบเนื่องจากความไม่เชิงเส้น ความไม่สมดุลและความเหนี่ยวนำของโหลดที่มีต่อคุณภาพแรงดันออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองขนาด 1.1 kW ที่มีวงจรรองแอกทีฟช่วยในการรักษาคุณภาพแรงดันให้มีขนาดคงที่และรูปคลื่นเป็นไซน์ในกรณีที่ใช้งานกับโหลดความเหนี่ยวนำ โหลดไม่สมดุลและโหลดไม่เชิงเส้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาแบบจำลองลักษณะทางพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โดยคำนึงถึงเงื่อนไขความไม่สมดุลของกระแสและแรงดัน
2. ศึกษาผลกระทบเนื่องจากโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ โหลดไม่สมดุล และโหลดไม่เชิงเส้นที่มีต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. ศึกษาการคำนวณกระแสชดเชยโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ โหลดไม่สมดุล และโหลดไม่เชิงเส้นด้วยวิธีวิเคราะห์พีดีเอฟที
4. ศึกษาการคงค่าแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
5. ศึกษาการควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ
6. จำลองการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบแนวความคิด
7. ออกแบบระบบในส่วนซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์พร้อมทดสอบการทำงาน
8. เก็บข้อมูล ประเมินผล และสรุปผล
9. เขียนวิทยานิพนธ์

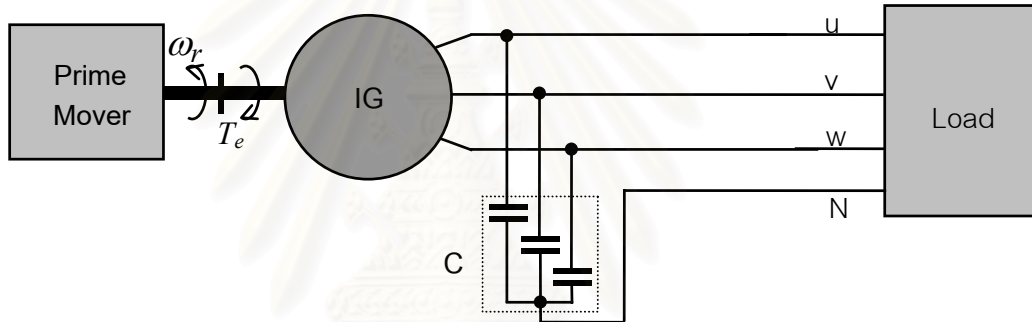
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลกระทบเนื่องจากโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ โหลดไม่สมดุล และ โหลดไม่เชิงเส้นที่มีต่อการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง
2. สามารถนำวงจรรองแอกทีฟแบบขนานมาใช้แก้ปัญหาผลกระทบเนื่องจากโหลดที่มีต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองได้
3. ผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาสามารถที่จะนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้

บทที่ 2

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองรวมทั้งวงจรสมมูลในสภาวะอยู่ตัวที่ใช้ในการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการกระตุ้นตัวเอง พร้อมทั้งแสดงถึงผลของโหลดที่มีต่อคุณภาพของแรงดันด้านออกโดยการจำลองระบบ และโดยการทดลองจริง โดยทั่วไปเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองหมายถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพื่อกระตุ้นการทำงานตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง

ในงานวิจัยนี้เราจะพิจารณากรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลด 3 เฟส สมดุลและไม่สมดุล โดยมีการต่อเป็นแบบ 3 เฟส 4 สาย ดังนั้นแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนแกนอ้างอิงนิ่งจึงต้องคำนึงถึงเงื่อนไขนี้ด้วยโดยสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้ [6,8]

2.1 แบบจำลองลักษณะทางพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

สมการสเตเตอร์

$$\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} = u_{s\alpha} + R_s \left(\frac{\psi_{m\alpha} - \psi_{s\alpha}}{L_{ls}} \right) \quad (2.1)$$

$$\frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = u_{s\beta} + R_s \left(\frac{\psi_{m\beta} - \psi_{s\beta}}{L_{ls}} \right) \quad (2.2)$$

$$\frac{d\psi_{s0}}{dt} = - \left(u_{s0} + \frac{R_s \psi_{s0}}{L_{ls}} \right) \quad (2.3)$$

สมการโรเตอร์

$$\frac{d\psi_{ra}}{dt} = -R_r \left(\frac{\psi_{ra} - \psi_{m\alpha}}{L_{lr}} \right) - \omega_r \psi_{r\beta} \quad (2.4)$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = -R_r \left(\frac{\psi_{r\beta} - \psi_{m\beta}}{L_{lr}} \right) + \omega_r \psi_{ra} \quad (2.5)$$

$$i_{m\alpha} = i_{ra} - i_{s\alpha} \quad (2.6)$$

$$i_{m\beta} = i_{r\beta} - i_{s\beta} \quad (2.7)$$

$$\text{Magnetization curve: } \bar{\psi}_m = f(\bar{i}_m) \quad (2.8)$$

ในการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองเราจะต้องทราบความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างฟลักซ์ ($\bar{\psi}_m$) กับกระแสสร้างฟลักซ์ (\bar{i}_m) ซึ่งเราสามารถหาได้จากการทดสอบไว้โหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เราจะทำการจำลองการทำงาน นอกจากนั้นเพื่อให้การกำเนิดแรงดันในช่วงเริ่มต้นสามารถเกิดขึ้นได้เราจะต้องกำหนดให้มีฟลักซ์ตกค้างอยู่เล็กน้อยที่โรเตอร์ในโมเดลที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วย

สมการตัวเก็บประจุ

$$\frac{du_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{C} (i_{s\alpha} - i_{L\alpha}) \quad (2.9)$$

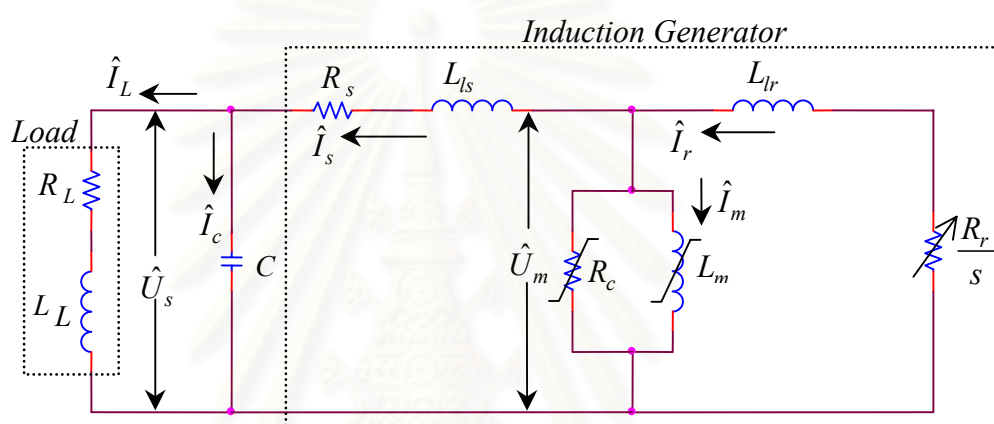
$$\frac{du_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{C} (i_{s\beta} - i_{L\beta}) \quad (2.10)$$

$$\frac{du_{s0}}{dt} = \frac{1}{C} (i_{s0} - i_{L0}) \quad (2.11)$$

สมการแรงบิดต้านกลับ

$$T_e = \frac{P}{L_{ls}} \left[\psi_{s\alpha} \psi_{m\beta} - \psi_{m\alpha} \psi_{s\beta} \right] \quad (2.12)$$

2.2 การคำนวณขนาดของตัวเก็บประจุกระตุ้น



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลต่อเฟสที่สภาวะอยู่ตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง

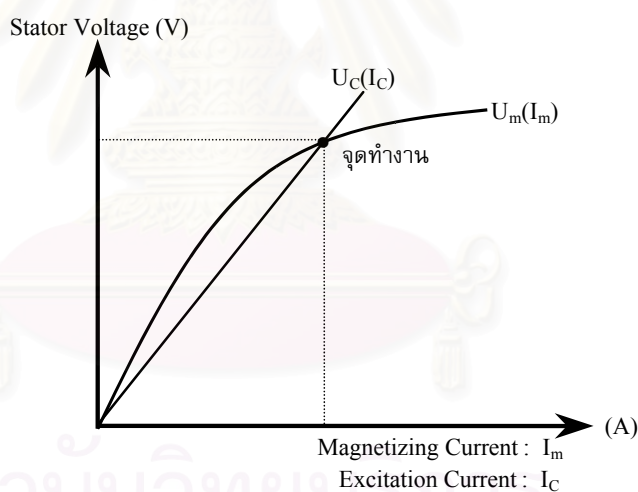
สำหรับกระบวนการกระตุ้นตัวเอง (self-excitation) นั้นจะต้องมีตัวเก็บประจุที่เหมาะสมค่าหนึ่งต่ออยู่กับขั้วต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมนี้สามารถคำนวณหาได้หลายวิธี อย่างไรก็ตามเนื่องจากเราใช้ตัวเก็บประจุนี้เพื่อสร้างกระบวนการกระตุ้นตัวเองในสภาวะไร้โหลดเป็นหลัก เราจึงพิจารณาวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่แสดงในรูปที่ 2.2 ในสภาวะไร้โหลดหรืออิมพีแดนซ์โหลดมีค่าเป็นอนันต์ ($R_L + j\omega_b L_L = \infty$) กระแสโหลดจะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นกระแสสเตเตอร์ (\hat{I}_s) จึงเท่ากับกระแสตัวเก็บประจุ (\hat{I}_c) และสลิป (s) มีค่าใกล้เคียงศูนย์ วงจรด้านโรเตอร์จึงเหมือนกับถูกเปิดวงจรอยู่ ในกรณีที่เราจะเลยค่าความต้านทานสมมูลของกำลังสูญเสียแกนเหล็ก (R_c) ในวงจรสมมูล แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับแรงดันคร่อมความต้านทานสเตเตอร์ (R_s) รวมกับแรงดันคร่อมความเหนี่ยวนำรั้วโหลดด้านสเตเตอร์ (L_{ls}) และ ความเหนี่ยวนำร่วม (L_m) [5] ดังแสดงในสมการที่ (2.13)

$$\hat{I}_C \left(\frac{-j}{\omega_b C} \right) = -\hat{I}_S \left[R_S + j\omega_b (L_{lS} + L_m) \right] \quad (2.13)$$

เนื่องจาก $\hat{I}_S = \hat{I}_C$ ดังนั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนจินตภาพของสมการที่ (2.13) จะได้

$$C = \frac{1}{\omega_b^2 (L_{lS} + L_m)} \quad (2.14)$$

เมื่อเราใช้ค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.14) จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะอยู่ในสถานะที่กระแสกระตุ้น (I_m) เท่ากับกระแสในตัวเก็บประจุ (I_C) เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของค่าความเหนี่ยวนำรวม (L_m) สถานะนี้ก็คือบริเวณจุดตัดระหว่าง Magnetization Curve ($U_m - I_m$) กับความสัมพันธ์แรงดัน-กระแสของตัวเก็บประจุ ($U_C - I_C$) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 จุดทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง

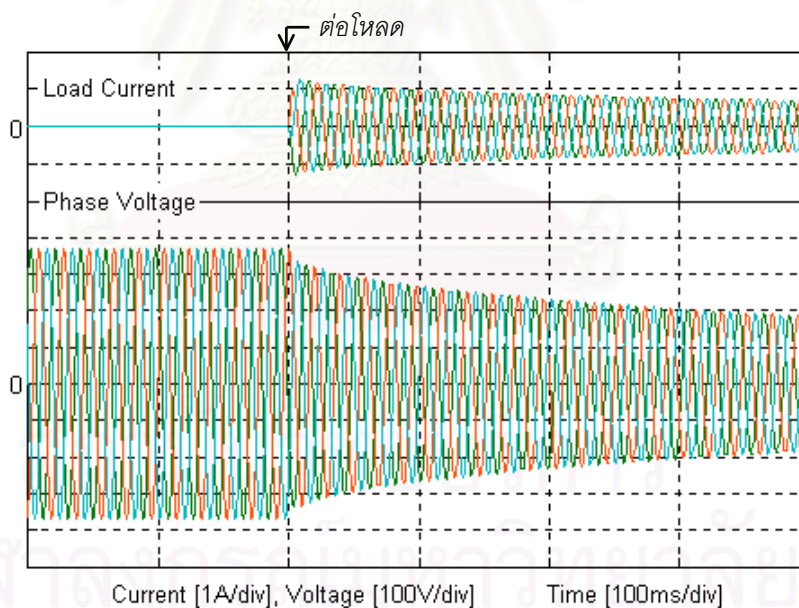
2.3 ผลกระทบต่อคุณภาพแรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลด

2.3.1 กรณีโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ

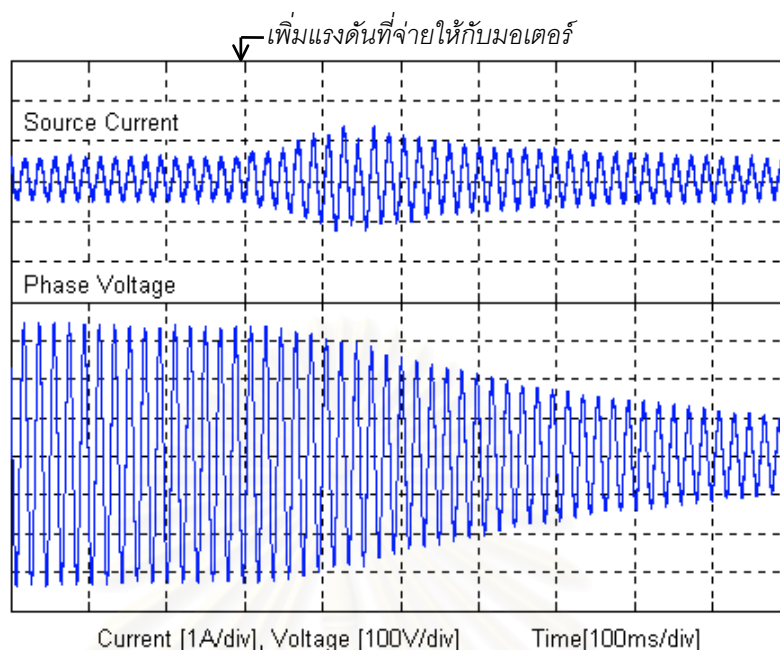
โหลดที่สร้างปัญหาต่อขนาดแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอย่างมากก็คือโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ ทั้งนี้เนื่องจากตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเองก็ต้องอาศัยกำลังรีแอกทีฟซึ่งได้จากตัวเก็บประจุในการสร้างฟลักซ์และแรงดัน ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงไม่

สามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟไปยังโหลดได้ เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายให้กับโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ โหลดจะดึงกำลังรีแอกทีฟบางส่วนจากตัวเก็บประจุ กำลังรีแอกทีฟที่เหลือสำหรับการสร้างฟลักซ์จึงลดลง แรงดันจึงลดลงอย่างมากดังแสดงด้วยผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 2.4 เมื่อเราใส่โหลดแบบขั้นประกอบด้วยความต้านทาน $210\ \Omega$ อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ $800\ \text{mH}$ แรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะลดลงอย่างรวดเร็วจนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหยุดกำเนิดแรงดันไปในที่สุด

รูปที่ 2.5 แสดงผลการทดลองจริงเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำโดยโหลดที่ใช้ในการทดลองคือมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสรับแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่าน Variac เมื่อเราเพิ่มโหลดโดยการปรับ Variac เพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ผลคือแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะลดลงอย่างรวดเร็วจนแรงดันเป็นศูนย์ในที่สุดเช่นเดียวกับผลการจำลองการทำงาน



รูปที่ 2.4 ผลการจำลองการทำงานขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเริ่มจ่าย โหลดความต้านทาน $210\ \Omega$ อนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ $800\ \text{mH}$

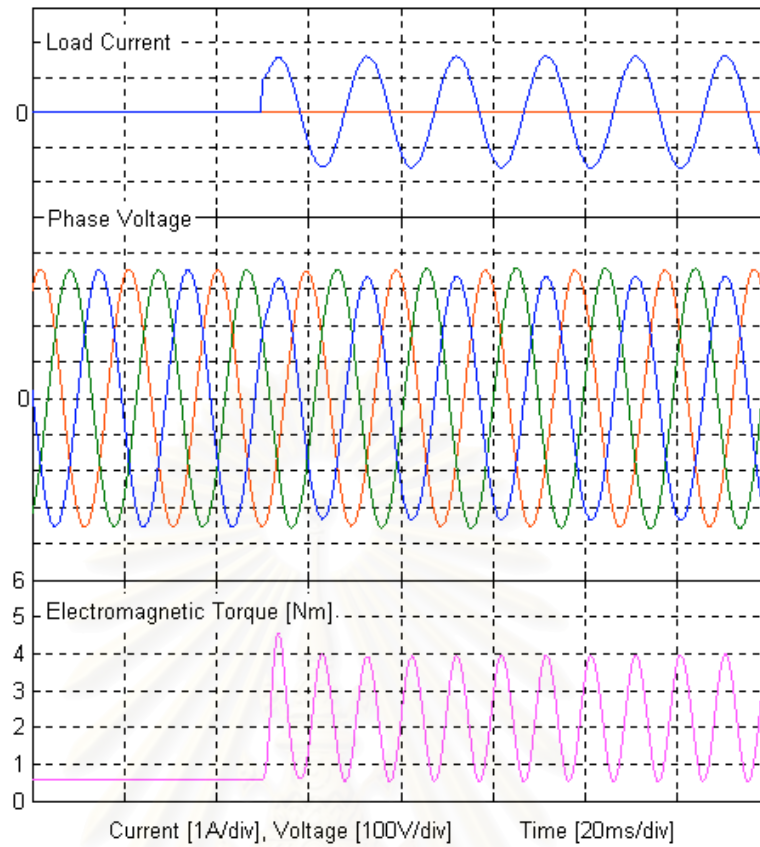


รูปที่ 2.5 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นกระแส-แรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดมอเตอร์ที่มีค่าความเหนี่ยวนำ

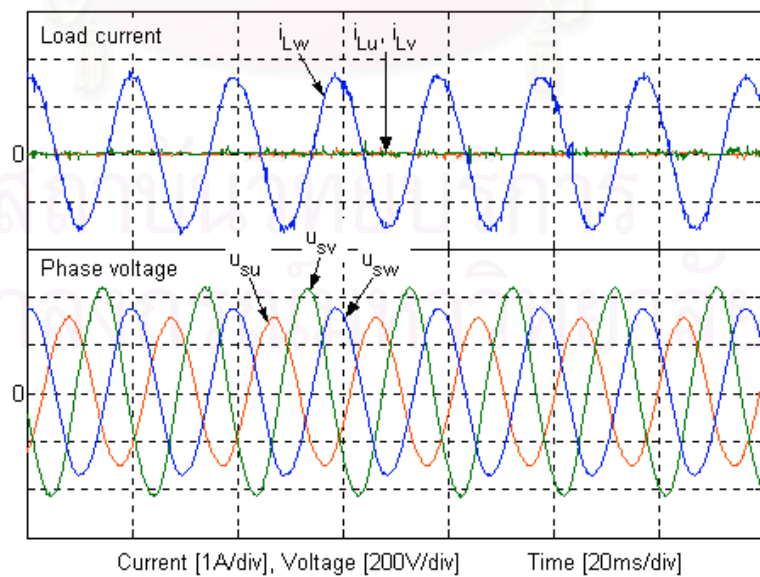
2.3.2 กรณีโหลดไม่สมดุล

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลด 3 เฟสไม่สมดุล กระแสลำดับลบและลำดับศูนย์ที่เกิดขึ้นจะทำให้แรงดันเกิดความไม่สมดุลตามไปด้วยและจะทำให้เกิดระลอกในแรงบิดต้านกลับดังแสดงด้วยผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 2.6 ทันทีที่เราต่อโหลดความต้านทานเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เฟส w เพียงเฟสเดียวก็จะเกิดระลอกในแรงบิดต้านกลับขึ้นทันที โดยความถี่ของระลอกนั้นมีค่าเป็นสองเท่าของความถี่ของแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

รูปที่ 2.7 แสดงผลการทดลองจริงในสภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่สมดุลด้วยเงื่อนไขเดียวกันกับการจำลองการทำงานซึ่งแสดงให้เห็นความไม่สมดุลของแรงดันได้อย่างชัดเจน



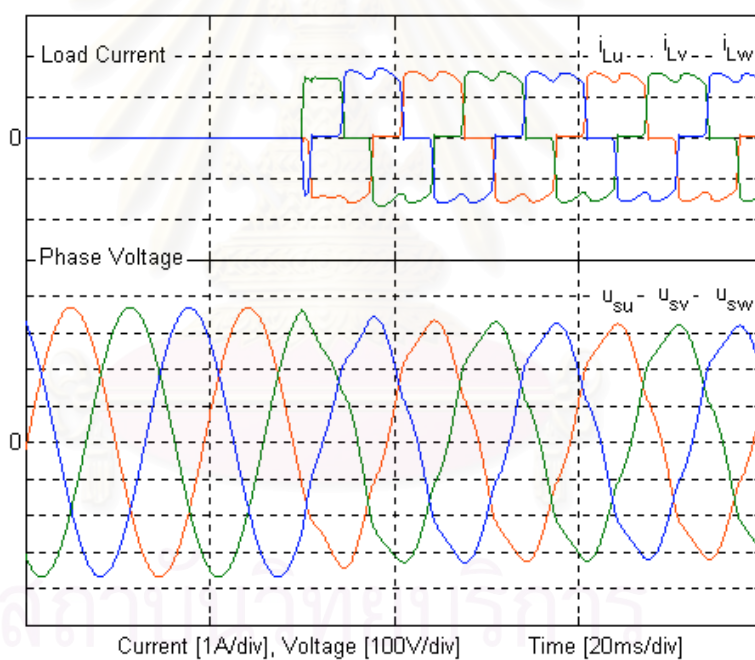
รูปที่ 2.6 ผลการจำลองการทำงานขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
เริ่มจ่ายโหลดไม่สมดุล



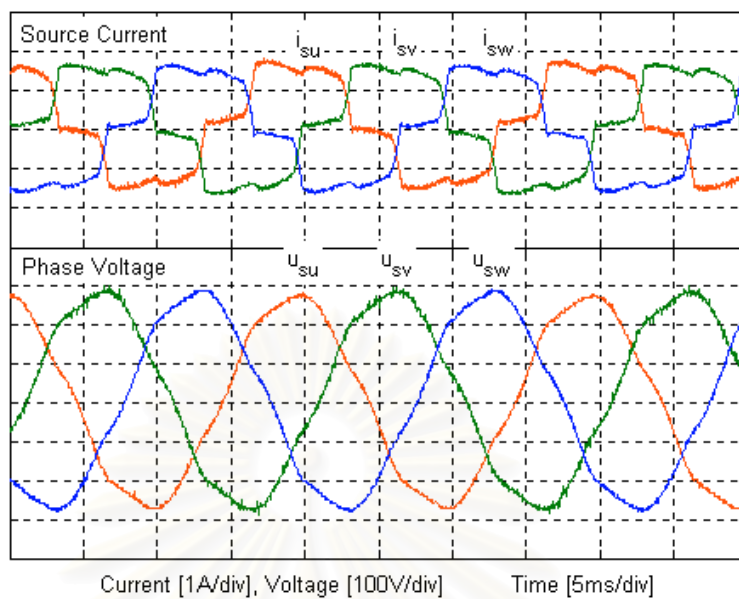
รูปที่ 2.7 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นกระแส-แรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
จ่ายโหลดไม่สมดุล

2.3.3 กรณีโหลดไม่เชิงเส้น

เมื่อนำโหลดไม่เชิงเส้น เช่น วงจรเรียงกระแส 3 เฟส ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง โหลดไม่เชิงเส้นเหล่านี้จะดึงกระแสฮาร์มอนิกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้กระแสที่ไหลอยู่ในขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ด้วย ผลเนื่องจากแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของขดลวดสเตเตอร์เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านจะทำให้แรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ด้วยเช่นกันดังที่แสดงด้วยผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 2.8 และผลจากการทดลองจริงในรูปที่ 2.9 แรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีฮาร์มอนิกปะปนอยู่นี้อาจจะส่งผลกระทบต่อโหลดอื่นที่ใช้แรงดันร่วมกันอยู่ อีกทั้งการมีกระแสฮาร์มอนิกไหลก็ทำให้มีการสูญเสียมากขึ้นในขดลวดและแกนเหล็ก[7, 10]



รูปที่ 2.8 ผลการจำลองการทำงานขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น

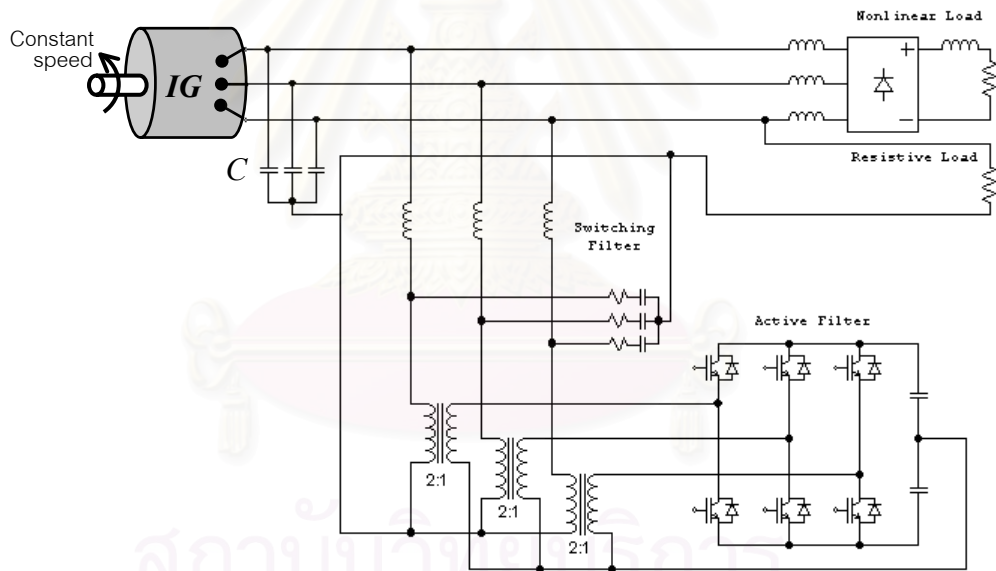


รูปที่ 2.9 ผลการทดลองแสดงรูปคลื่นกระแส-แรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น

บทที่ 3

การปรับปรุงคุณภาพแรงดันของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองด้วยวงจรกรองแอกทีฟ

ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองจ่ายโหลดประเภทต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 สามารถแก้ไขได้โดยอาศัยวงจรกรองแอกทีฟต่อขนานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 3.1 หน้าที่หลักของวงจรกรองแอกทีฟในงานวิจัยนี้คือการจ่ายกระแสกำลังรีแอกทีฟเพื่อควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ได้ตามค่าแรงดันคำสั่งและช่วยจ่ายกระแสเพื่อชดเชยโหลดไม่สมดุล ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามองเห็นโหลด 3 เฟสมีความสมดุลเสมอ นอกจากนี้วงจรกรองแอกทีฟยังสามารถจ่ายกระแสเพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกของโหลดไม่เชิงเส้นทำให้กระแสในสายเฟสด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีรูปคลื่นเป็นไซน์อยู่เสมอด้วย



รูปที่ 3.1 วงจรโดยรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง
ซึ่งใช้วงจรกรองแอกทีฟต่อขนานเพื่อปรับปรุงการทำงาน

การคำนวณกระแสชดเชยของวงจรกรองแอกทีฟจะใช้การตรวจจับกระแสทางด้านโหลด และใช้วิธีเคอร์ซีฟตีเอฟทีในการคำนวณองค์ประกอบต่าง ๆ ของกระแส คือ องค์ประกอบฮาร์มอนิก, กระแสลำดับลบ และกระแสกำลังรีแอกทีฟ เพื่อให้เป็นกระแสคำสั่งชดเชยส่งให้กับส่วนควบคุมกระแสต่อไป

ส่วนควบคุมกระแสสำหรับวงจรรองแอกที่พีในงานวิจัยนี้เราจะใช้การควบคุมกระแสแบบทำซ้ำ (Repetitive Control) ทำหน้าที่ควบคุมการสร้างกระแสชดเชยให้ได้ตามกระแสคำสั่ง ระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำมีข้อดีคือ เป็นระบบที่ง่าย ใช้งานระบบในเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องได้ ความผิดพลาดของกระแสเมื่อเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวมีค่าต่ำ และความถี่ในการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่[1]

3.1 ทฤษฎีการคำนวณองค์ประกอบกระแสด้วยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟที

การตรวจจับและคำนวณองค์ประกอบกระแสสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สาย เริ่มจากการสุ่มค่ากระแสไหลดเข้ามาแล้วแปลงกระแส 3 เฟสไปเป็นกระแสในรูปสเปซเวกเตอร์ ดังแสดงในสมการที่ (3.1) สเปซเวกเตอร์กระแสในแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$ จะถูกนำไปใช้คำนวณหาองค์ประกอบกระแสโดยวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีต่อไป ส่วนองค์ประกอบในแกนอ้างอิง 0 ซึ่งสะท้อนถึงกระแสในลำดับศูนย์[3]จะถูกนำไปใช้เป็นกระแสคำสั่งชดเชยโดยตรง

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \\ i_{L0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lu} \\ i_{Lv} \\ i_{Lw} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

สเปซเวกเตอร์ของกระแสไหลดในระบบกำลัง 3 เฟสที่ถูกสุ่มค่าเข้ามาจะอยู่ในรูปของสัญญาณรายคาบแบบเวลาไม่ต่อเนื่องซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปผลรวมขององค์ประกอบความถี่ต่าง ๆ ในเทอม $e^{\frac{j2\pi h}{N}}$ ได้ดังสมการที่ (3.2) โดยที่ $h = 0, 1, -1, 2, -2, \dots$ และ N คือจำนวนข้อมูลต่อคาบ

$$\bar{i}(k) = \sum_{h=0}^{N-1} \bar{I}_h e^{\frac{j2\pi hk}{N}} \quad (3.2)$$

ในที่นี้ \bar{I}_h คือค่า DFT ของฮาร์มอนิกอันดับที่ h และ $\bar{i}(k)$ เป็นสัญญาณเข้าที่มีคาบเท่ากับ N เราสามารถวิเคราะห์หาองค์ประกอบที่ความถี่ต่าง ๆ ด้วยวิธีการทำ DFT โดยใช้สมการที่ (3.3)

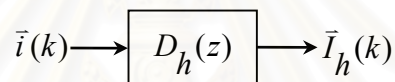
$$\bar{I}_h = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \bar{i}(k) W^{-hk} \quad (3.3)$$

เมื่อ $W = e^{\frac{j2\pi}{N}}$

การคำนวณ DFT สามารถทำในรูปแบบรีเคอร์ซีฟ (Recursive) ได้ดังสมการที่ (3.4)

$$\bar{I}_h(k) = \frac{1}{N} (\bar{i}(k) - \bar{i}(k-N)) + W^h \bar{I}_h(k-1) \quad (3.4)$$

ซึ่งเขียนเป็นฟังก์ชันโอนย้ายได้ดังแผนภาพในรูปที่ 3.2



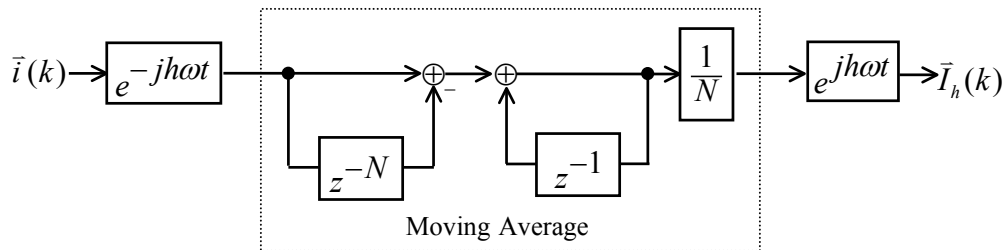
รูปที่ 3.2 แผนภาพการคำนวณหากระแสร่วมอนิกจากฟังก์ชันโอนย้าย $D_h(z)$

โดยที่

$$D_h(z) = \frac{\bar{I}_h(z)}{\bar{i}(z)} = \frac{1}{N} \frac{1-z^{-N}}{1-W^h z^{-1}} \quad (3.5)$$

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการสร้างฟังก์ชันโอนย้าย $D_h(z)$ ในทางซอฟต์แวร์ไม่สามารถทำได้อย่างแม่นยำเนื่องจากผลของการตัดเศษของสัมประสิทธิ์ที่ไม่เป็นเลขจำนวนเต็ม เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวเราจึงต้องเปลี่ยนวิธีการคำนวณจากสมการที่ (3.5) ไปเป็นการคำนวณรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีบนแกนอ้างอิงซึ่งหมุนที่ความถี่ฮาร์มอนิกแทน และได้ฟังก์ชันโอนย้ายใหม่ดังสมการที่ (3.6) ที่มีสัมประสิทธิ์เป็นเลขจำนวนเต็มและเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.3

$$D'_h(z) = \frac{1}{N} \frac{1-z^{-N}}{1-z^{-1}} \quad (3.6)$$

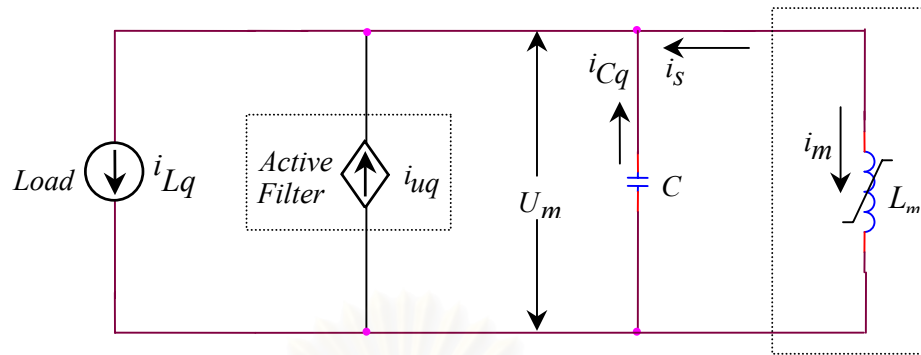


รูปที่ 3.3 การทำรีเคอร์ซีฟดีเอฟที่บนแกนอ้างอิงหมุน

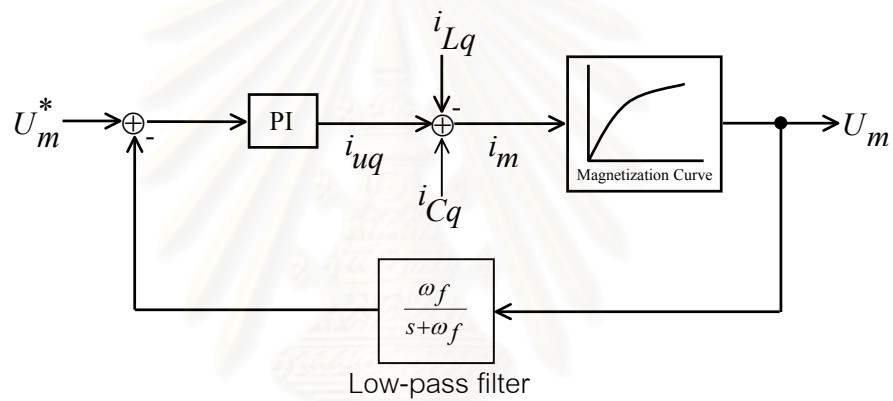
3.2 การคุมค่าแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

การควบคุมขนาดแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง อาศัยแนวคิดการควบคุมสมดุขของกำลังรีแอกทีฟภายนอกและภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยตัวเก็บประจุจะเป็นตัวจ่ายกำลังรีแอกทีฟหลักซึ่งจำเป็นสำหรับการสร้างแรงดัน ส่วนวงจรรองแอกทีฟจะจ่ายกระแสกำลังรีแอกทีฟที่เหมาะสมเพื่อปรับสมดุขกำลังรีแอกทีฟระหว่างโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจนได้ค่าแรงดันด้านออกตามค่าแรงดันคำสั่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองเมื่อละเลยแรงดันตกคร่อมความต้านทานและความเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านสเตเตอร์แล้วแรงดันด้านออกก็จะขึ้นกับกระแสกระตุ้น โดยในสภาวะอยู่ตัวแรงดันด้านออก จะมีขนาดคงที่ค่าหนึ่งซึ่งทำให้เกิดความสมดุขระหว่างกำลังรีแอกทีฟจากโหลดรวมกับตัวเก็บประจุและวงจรรองแอกทีฟกับกำลังรีแอกทีฟภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กระแสที่เป็นตัวแทนของกำลังรีแอกทีฟภายนอกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ส่วนคือ กระแสจากวงจรรองแอกทีฟสำหรับควบคุมขนาดแรงดัน (i_{uq}), กระแสกำลังรีแอกทีฟจากโหลด (i_{Lq}) และกระแสจากตัวเก็บประจุ (i_{Cq}) ส่วนกระแสที่เป็นตัวแทนกำลังรีแอกทีฟภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็คือกระแสกระตุ้น (i_m) ความสัมพันธ์ของกระแสข้างต้นสามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพแสดงวิธีการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 กระแสกำลังรีแอกทีฟในส่วนต่างๆ ในระบบ



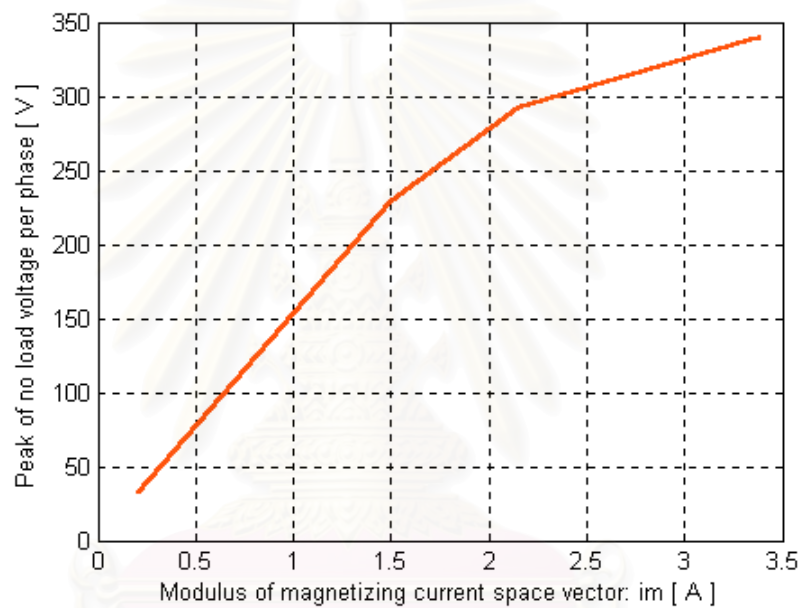
รูปที่ 3.5 แผนภาพแนวคิดในการควบคุมแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

จากการทดสอบหา magnetization curve สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในงานวิจัยเราจะได้ข้อมูลความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างแรงดันและกระแสกระตุ้น ข้อมูลดังกล่าวจะถูกประมาณเป็นสมการเชิงเส้นแบบท่อนโดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วงดังสมการที่ (3.7) และแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 3.6

$$U_m = \begin{cases} 186.99 \times i_m & ; i_m \leq 1.4932 \\ 118.91 \times i_m + 102.03 & ; 1.4932 \leq i_m < 2.1473 \\ 47.61 \times i_m + 255.14 & ; i_m \geq 2.1473 \end{cases} \quad (3.7)$$

จากรูปที่ 3.6 เนื่องจากแรงดันด้านออกที่เราต้องการควบคุมมีค่าตกอยู่ในบริเวณช่วงที่ 2 ของกราฟ ดังนั้นเราจึงใช้ค่าความชันในช่วงที่ 2 ของสมการที่ (3.7) เป็นตัวประมาณความเป็นเชิงเส้นของ magnetizing curve จากรูปที่ 3.5 จะได้ฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดดังต่อไปนี้

$$GH(s) = 118.91 \times k_p \left(\frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{s} \right) \left(\frac{w_f}{s + w_f} \right) \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.6 การประมาณเชิงเส้นแบบท่อนของ magnetization curve

ในที่นี้กำหนดให้วงรอบควบคุมแรงดันมีเวลาในการตอบสนองต่อสัญญาณขึ้น (rise time, t_r) เท่ากับ 0.25 วินาที ดังนั้นค่าประมาณของความถี่ตัดข้าม $\omega_c \approx \frac{1}{t_r}$ คือ 4 rad/s เมื่อออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมด้วยวิธี symmetrical optimum จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ตัดข้ามกับตำแหน่งขั้วของตัวกรองผ่านต่ำและตำแหน่งศูนย์ของตัวควบคุมดังต่อไปนี้

$$\text{ตำแหน่งขั้วของตัวกรองผ่านต่ำ } \omega_f = a\omega_c$$

$$\text{ตำแหน่งศูนย์ของตัวควบคุม } \frac{k_i}{k_p} = \frac{\omega_c}{a}$$

เลือก $a = 2.4$ จะได้ $\omega_f = 2.4 \times 4.0 = 9.6 \text{ rad/s}$

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{4.0}{2.4} = 1.667 \text{ rad/s}$$

ณ ความถี่ตัดข้าม จะได้ขนาดของ $|GH(s)|_{s=j\omega_c} = 1$ ดังนั้นจากสมการที่ (3.8) เมื่อแทนค่าความถี่ตัดข้าม, ตำแหน่งขั้วและศูนย์ จะได้

$$GH(j\omega_c) = 118.91 \times k_p \left(\frac{\sqrt{4.0^2 + 1.667^2}}{4.0} \right) \left(\frac{9.6}{\sqrt{4.0^2 + 9.6^2}} \right) = 1 \quad (3.9)$$

ดังนั้น $k_p = 8.41 \times 10^{-3} \text{ [A/V]}$

$$k_i = 1.667 \times k_p = 14.02 \times 10^{-3} \text{ [A/rad/V[s]}$$

ค่ากระแสควบคุมขนาดแรงดัน (i_{uq}) ที่คำนวณได้จากวงรอบควบคุมแรงดันนี้จะถูกนำมาแปลงกลับเป็นสัญญาณกระแสที่อ้างอิงกับแกนนิ่งดังแสดงในสมการที่ (3.10)

$$\begin{bmatrix} i_{uq\alpha} \\ i_{uq\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\omega t) \\ \cos(\omega t) \end{bmatrix} i_{uq} \quad (3.10)$$

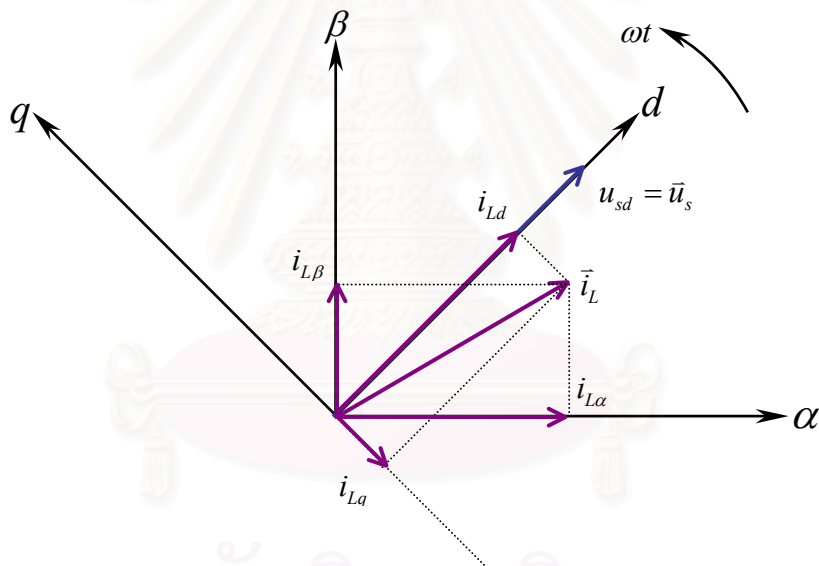
การควบคุมค่าแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยอาศัยการควบคุมกำลังรีแอกทีฟในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดความเหนี่ยวนำนั้นถ้าจะใช้แต่่วงรอบป้อนกลับค่าผิดพลาดของค่าขนาดแรงดันเป็นตัวกำหนดกระแสกำลังรีแอกทีฟ (i_{uq}) ทั้งหมด จะทำให้เราต้องใช้ตัวควบคุมที่มีอัตราขยายสูงซึ่งอาจจะมีปัญหาเสถียรภาพได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เราจะคำนวณหากระแสกำลังรีแอกทีฟที่โหลดต้องการเพื่อใช้เป็นกระแสคำสั่งในลักษณะป้อนไปหน้าให้วงจรกรองแอกทีฟจ่ายเป็นกระแสชดเชยเพื่อเป็นการแบ่งเบาภาระการทำงานของวงรอบควบคุมแรงดัน

3.3 การคำนวณหากระแสกำลังรีแอกทีฟ

การคำนวณหากระแสกำลังรีแอกทีฟมูลฐานลำดับบวกของโหนด ทำได้โดยนำสัญญาณกระแสที่อยู่ในรูปสเปซเวกเตอร์ในองค์ประกอบ $\alpha - \beta$ มาทำการแปลงไปเป็นสัญญาณที่อ้างอิงกับแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วมูลฐานในทิศบวกโดยการคำนวณเป็นไปตามสมการที่ (3.11) เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิงซึ่งหมุนด้วยความเร็วมูลฐานในทิศบวกแสดงได้ดังรูปที่ 3.7

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

โดย i_{Ld}, i_{Lq} คือองค์ประกอบของกระแสโหนดบนแกนอ้างอิง $d-q$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วมูลฐานในทิศบวก



รูปที่ 3.7 แกนอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหากระแสกำลังรีแอกทีฟที่องค์ประกอบมูลฐาน

กำลังแอกทีฟ p และกำลังรีแอกทีฟ q แสดงในเทอมขององค์ประกอบบนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วมูลฐานลำดับบวกได้ดังนี้

$$p = u_{sd} i_{Ld} + u_{sq} i_{Lq} \quad (3.12)$$

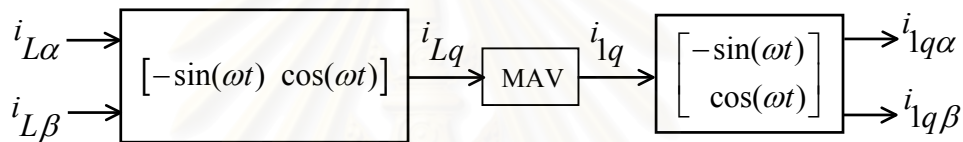
$$q = u_{sd} i_{Lq} - u_{sq} i_{Ld} \quad (3.13)$$

โดย u_{sd}, u_{sq} คือองค์ประกอบของเวกเตอร์แรงดันบนแกนอ้างอิง $d-q$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วมูลฐานในทิศบวก

ในการกำหนดแกนอ้างอิงหมุนเราจะให้เวกเตอร์แรงดันอยู่ในแนวแกนอ้างอิง d ทำให้ $u_{sq} = 0$ ดังนั้น i_{Ld} และ i_{Lq} จึงเป็นกระแสกำลังแอกทีฟและรีแอกทีฟตามลำดับ เมื่อนำกระแส i_{Lq} มาหาค่าเฉลี่ยทางเวลาโดยใช้ Moving Average Filter (MAV) ก็จะได้กระแสกำลังรีแอกทีฟที่มีความถี่มูลฐาน (i_{1q}) ซึ่งจะถูกลำนำมาแปลงกลับเป็นสัญญาณกระแสที่อ้างอิงกับแกนนิ่ง ดังแสดงในสมการที่ (3.14) แผนภาพของการคำนวณกระแสกำลังรีแอกทีฟที่มีความถี่มูลฐานสรุปได้ดังรูปที่ 3.8

$$\begin{bmatrix} i_{1q\alpha} \\ i_{1q\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(h\omega t) \\ \cos(h\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1q} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

โดย $i_{1q\alpha}$, $i_{1q\beta}$ คือองค์ประกอบกระแสกำลังรีแอกทีฟที่มีความถี่มูลฐานบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$



รูปที่ 3.8 แผนภาพการคำนวณกระแสกำลังรีแอกทีฟ

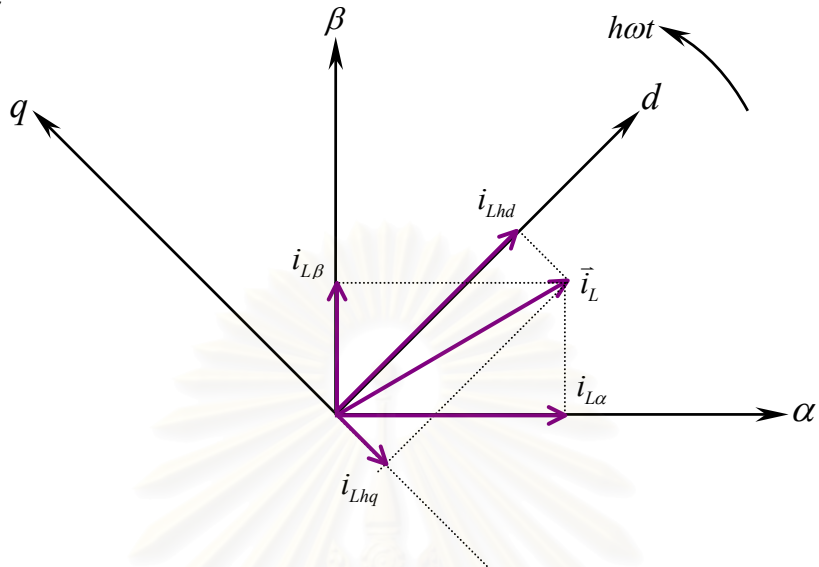
3.4 การคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกในสายเฟส

การคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกในสายเฟสทำได้โดยนำสัญญาณกระแสไหลดที่อยู่ในรูปสเปซเวกเตอร์ในองค์ประกอบ $\alpha - \beta$ มาทำการแปลงไปเป็นสัญญาณกระแสที่อ้างอิงกับแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วฮาร์มอนิก โดยการคำนวณเป็นไปตามสมการที่ (3.15) เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิงซึ่งหมุนด้วยความถี่ฮาร์มอนิกแสดงได้ดังรูปที่ 3.9

$$\begin{bmatrix} i_{Lhd} \\ i_{Lhq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(h\omega t) & \sin(h\omega t) \\ -\sin(h\omega t) & \cos(h\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

โดย i_{Lhd} , i_{Lhq} คือองค์ประกอบของกระแสไหลดบนแกนอ้างอิง $d - q$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วฮาร์มอนิก

การย้ายแกนอ้างอิงทำให้องค์ประกอบฮาร์มอนิกที่เดิมมีความถี่เป็น $h\omega$ กลายเป็นสัญญาณไฟตรง ส่วนองค์ประกอบฮาร์มอนิกอื่น ๆ และองค์ประกอบมูลฐานจะกลายเป็นสัญญาณไฟสลับแทน

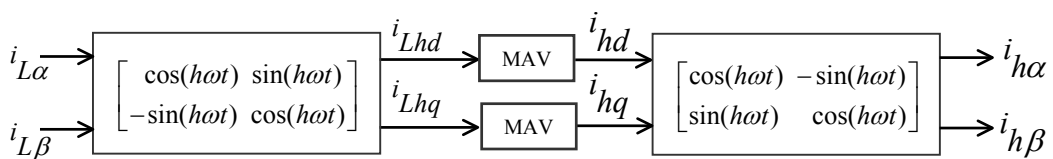


รูปที่ 3.9 แกนอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก

สัญญาณกระแส i_{Lhd} , i_{Lhq} ที่ได้จากสมการที่ (3.15) จะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยโดยผ่านวงจรกรอง MAV เพื่อแยกเอาเฉพาะองค์ประกอบสัญญาณไฟตรงซึ่งก็คือขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับ ส่วนสัญญาณความถี่ฮาร์มอนิกอื่นรวมทั้งองค์ประกอบมูลฐานจะถูกกรองทิ้งไปทั้งหมด ขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ได้ (i_{hd} , i_{hq}) จะถูกนำมาแปลงกลับเป็นสัญญาณกระแสที่อ้างอิงกับแกนนิ่งดังแสดงในสมการที่ (3.16) แผนภาพของการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในสายเฟสมีรูปแบบสรุปได้ดังรูปที่ 3.10

$$\begin{bmatrix} i_{h\alpha} \\ i_{h\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(h\omega t) & -\sin(h\omega t) \\ \sin(h\omega t) & \cos(h\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{hd} \\ i_{hq} \end{bmatrix} \tag{3.15}$$

โดย $i_{h\alpha}$, $i_{h\beta}$ คือกระแสฮาร์มอนิกบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$



รูปที่ 3.10 แผนภาพการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกในสายเฟส

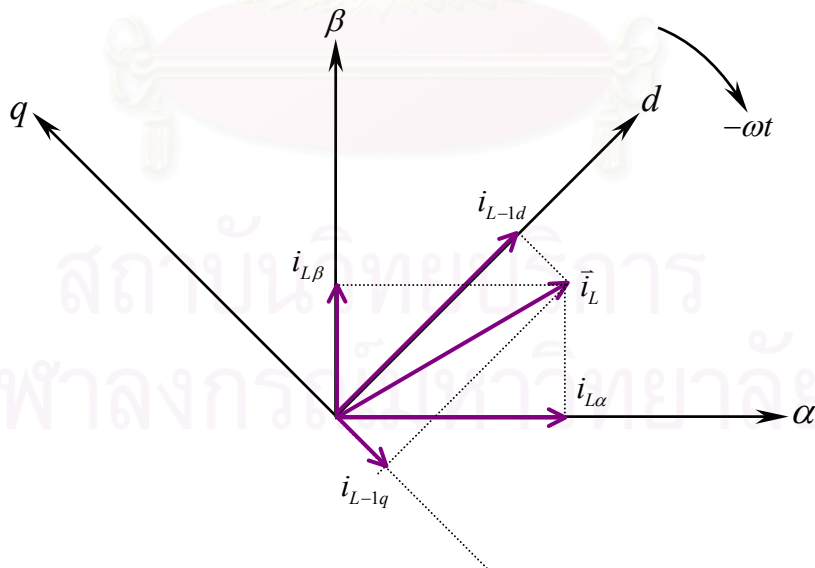
3.5 การคำนวณหากระแสลำดับลบและศูนย์ที่เกิดจากโหลดไม่สมดุล

ผลของโหลดไม่สมดุลจะปรากฏในรูปของกระแสมูลฐานลำดับลบและกระแสลำดับศูนย์ การแปลงกระแส 3 เฟสไปเป็นกระแสในรูปสเปซเวกเตอร์ทำให้กระแสโหลดลำดับศูนย์ไปปรากฏอยู่ในสเปซเวกเตอร์กระแส i_0 ทั้งหมด ดังนั้นเราจึงนำกระแส i_0 ไปเป็นกระแสชดเชยได้โดยตรง

ส่วนการคำนวณกระแสมูลฐานลำดับลบทำได้โดยนำสัญญาณกระแสในองค์ประกอบ $\alpha - \beta$ มาทำการแปลงไปเป็นสัญญาณที่อ้างอิงกับแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความถี่มูลฐานในทิศลบดังแสดงในสมการที่ (3.17) เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิงซึ่งหมุนด้วยความถี่มูลฐานในทิศลบแสดงได้ดังรูปที่ 3.11

$$\begin{bmatrix} i_{L-1d} \\ i_{L-1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

โดย i_{L-1d} , i_{L-1q} คือองค์ประกอบของกระแสโหลดบนแกนอ้างอิง $d-q$ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเท่ากับความถี่มูลฐานในทิศลบ

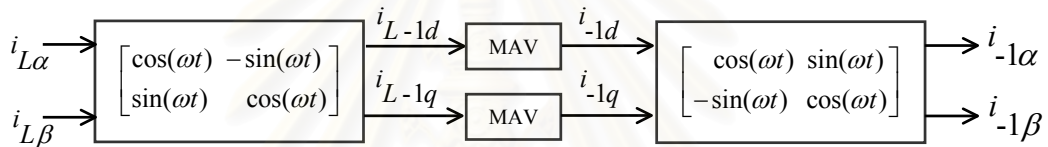


รูปที่ 3.11 แกนอ้างอิงที่ใช้ในการคำนวณหากระแสลำดับลบที่องค์ประกอบมูลฐาน

สัญญาณกระแส i_{L-1d}, i_{L-1q} ที่ได้จากสมการที่ (3.17) จะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยโดยผ่านวงจรกรอง MAV เพื่อแยกเอาเฉพาะองค์ประกอบสัญญาณไฟตรงซึ่งก็คือขนาดขององค์ประกอบมูลฐานลำดับลบที่ต้องการตรวจจับคือ i_{-1d}, i_{-1q} และถูกนำมาแปลงกลับเป็นสัญญาณกระแสที่อ้างอิงกับแกนนิ่งดังแสดงในสมการที่ (3.18) แผนภาพของการคำนวณกระแสมูลฐานลำดับลบมีรูปแบบสรุปได้ดังรูปที่ 3.12

$$\begin{bmatrix} i_{-1\alpha} \\ i_{-1\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{-1d} \\ i_{-1q} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

โดย $i_{-1\alpha}, i_{-1\beta}$ คือกระแสมูลฐานลำดับลบบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$



รูปที่ 3.12 แผนภาพการคำนวณหากระแสมูลฐานลำดับลบ

3.6 การคำนวณหากระแสคำสั่งชดเชยในกรณีชดเชยทั้งกระแสกำลังรีแอกทีฟ กระแสฮาร์มอนิก และ กระแสไม่สมดุล

เพื่อให้การปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองเป็นไปโดยสมบูรณ์ เราจะต้องคำนวณหากระแสชดเชยซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบกระแสต่าง ๆ ตามที่กล่าวในหัวข้อ 3.2 ถึง 3.5 สัญญาณขององค์ประกอบกระแสต่าง ๆ ที่คำนวณได้จะถูกนำมารวมกันแล้วแปลงกลับจากสเปซเวกเตอร์เป็นกระแส 3 เฟส ดังแสดงในสมการที่ (3.18)

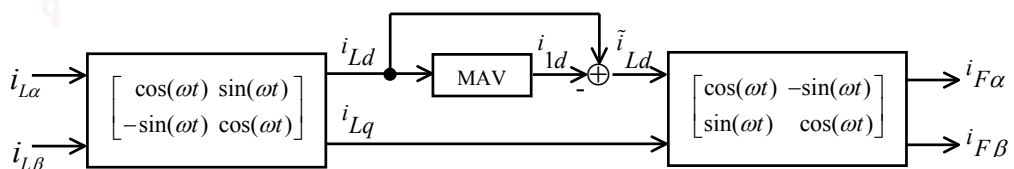
$$\begin{bmatrix} i_{Fu} \\ i_{Fv} \\ i_{Fw} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{F\alpha} \\ i_{F\beta} \\ i_{F0} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

โดย $i_{F\alpha} = i_{uq\alpha} + i_{lq\alpha} + i_{h\alpha} + i_{-1\alpha}$ คือผลรวมของกระแสชดเชยบนแกนอ้างอิง α
 $i_{F\beta} = i_{uq\beta} + i_{lq\beta} + i_{h\beta} + i_{-1\beta}$ คือผลรวมของกระแสชดเชยบนแกนอ้างอิง β
 $i_{F0} = i_{L0}$

ผลรวมของกระแสดังกล่าวก็คือก็คือการชดเชยองค์ประกอบกระแสทุกองค์ประกอบนั่นเอง ซึ่งในทางปฏิบัติเราสามารถคำนวณกระแสชดเชยทุกองค์ประกอบได้โดยการคำนวณหากระแสกำลังแอกทีฟมูลฐานลำดับบวกแล้วนำไปลบออกจากกระแสโหลด การคำนวณหากระแสกำลังแอกทีฟมูลฐานลำดับบวกทำได้โดยนำสัญญาณกระแสที่อยู่ในรูปสเปซเวกเตอร์ในองค์ประกอบ $\alpha - \beta$ มาทำการแปลงไปเป็นสัญญาณที่อ้างอิงกับแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วมูลฐานในทิศบวกโดยการคำนวณเป็นไปตามสมการที่ (3.11) ที่ได้แสดงไว้ก่อนหน้านี้แล้ว เมื่อนำกระแส i_{Ld} มาหาค่าเฉลี่ยทางเวลาโดยใช้วงจรรอง MAV ก็จะได้กระแสกำลังแอกทีฟที่พื้ความถี่มูลฐาน (i_{1d}) แล้วนำไปลบออกจากกระแส i_{Ld} ได้เป็นกระแส \tilde{i}_{Ld} ซึ่งเป็นกระแสที่สะท้อนกำลังแอกทีฟขององค์ประกอบฮาร์มอนิกและองค์ประกอบลำดับลบในกระแสโหลดนั่นเอง ส่วนกระแส i_{Lq} ซึ่งเป็นกระแสที่สะท้อนกำลังรีแอกทีฟทั้งหมดของโหลดจะถูกนำไปใช้เป็นกระแสคำสั่งชดเชยได้โดยตรง กระแส \tilde{i}_{Ld} และ i_{Lq} จะถูกนำมาแปลงกลับเป็นสัญญาณกระแสที่อ้างอิงกับแกนนิ่งดังแสดงในสมการที่ (3.20) แผนภาพของการคำนวณกระแสชดเชยกรณีชดเชยทุกองค์ประกอบสรุปได้ดังรูปที่ 3.13

$$\begin{bmatrix} i_{F\alpha} \\ i_{F\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

โดย $i_{F\alpha}, i_{F\beta}$ คือค่ากระแสชดเชยทุกองค์ประกอบบนแกนอ้างอิง $\alpha - \beta$



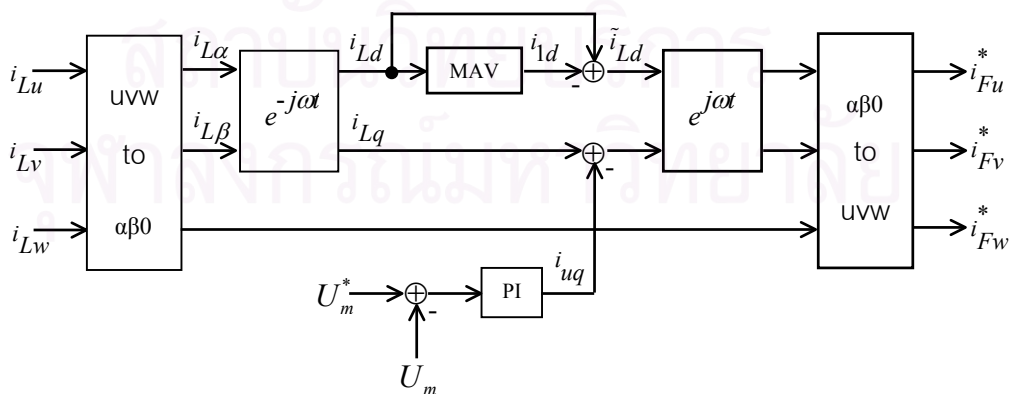
รูปที่ 3.13 การคำนวณกระแสชดเชยกรณีชดเชยทุกองค์ประกอบ

3.7 ผลการจำลองการทำงาน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการจำลองการทำงานมีขนาด 1.1kW, 400V, 50Hz, 1400 rpm และมีค่าพารามิเตอร์คือ $R_s = 8.39 \Omega$, $R_r = 6.1 \Omega$, $L_{ls} = L_{lr} = 22.2 \text{ mH}$ ตัวเก็บประจุสำหรับการกระตุ้นตัวเองมีขนาด $22 \mu\text{F}$ ต่อเฟส โดยข้อมูลลักษณะการกระตุ้น (Magnetization curve) ที่ได้จากการทดสอบซึ่งแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง $\psi_m - i_m$ สามารถประมาณด้วยสมการเชิงเส้นแบบท่อนได้ดังสมการที่ (3.21)

$$\psi_m = \begin{cases} 0.596i_m & ; 0 < i_m \leq 1.493 \\ 0.322i_m + 0.409 & ; 1.493 < i_m \leq 2.475 \\ 0.596i_m + 0.885 & ; i_m > 2.475 \end{cases} \quad (3.20)$$

การคำนวณกระแสชดเชยที่ใช้ในการจำลองการทำงานเมื่อรวมกระแสในส่วนควบคุมแรงดันด้านออกด้วยจะเป็นแผนภาพดังรูปที่ 3.14 สัญญาณกระแสควบคุมแรงดัน (i_{uq}) จะถูกนำไปลบออกจากกระแสไหลดในแกน q (i_{Lq}) เพื่อให้วงจรรองแอกที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบเมื่อสัญญาณค่าผิดพลาดของแรงดันด้านออกมีค่าเป็นบวกหรือแรงดันจริงน้อยกว่าแรงดันคำสั่ง ซึ่งกำลังรีแอกทีฟส่วนนี้จะช่วยเสริมให้ฟลักซ์ภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันด้านออกก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากเรานิยามกระแสของวงจรรองให้มีทิศไหลออก ดังนั้นในกรณีที่กระแสควบคุมแรงดัน (i_{uq}) มีค่าบวก กระแสที่ไหลออกจากวงจรรองจะมีเฟสล้ำหลังแรงดันเฟสอยู่ 90 องศาซึ่งหมายความว่าระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังรับกำลังรีแอกทีฟจากวงจรรองแอกทีฟที่กำลังทำหน้าที่จ่ายกำลังรีแอกทีฟ



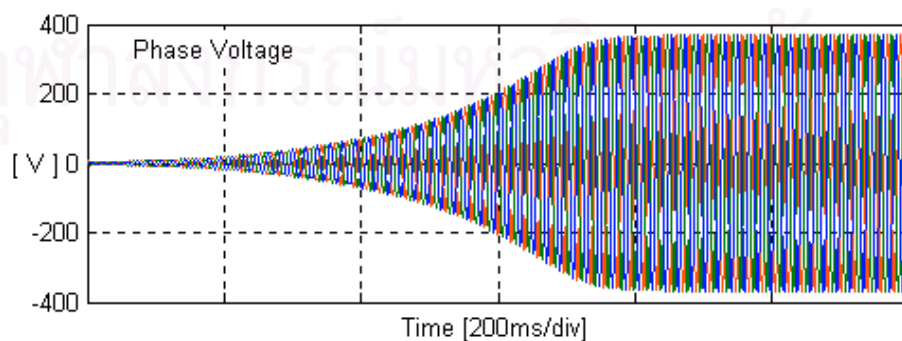
รูปที่ 3.14 การคำนวณกระแสชดเชยที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

3.7.1 ผลการจำลองการสร้างแรงดันในสภาวะไร้โหลด

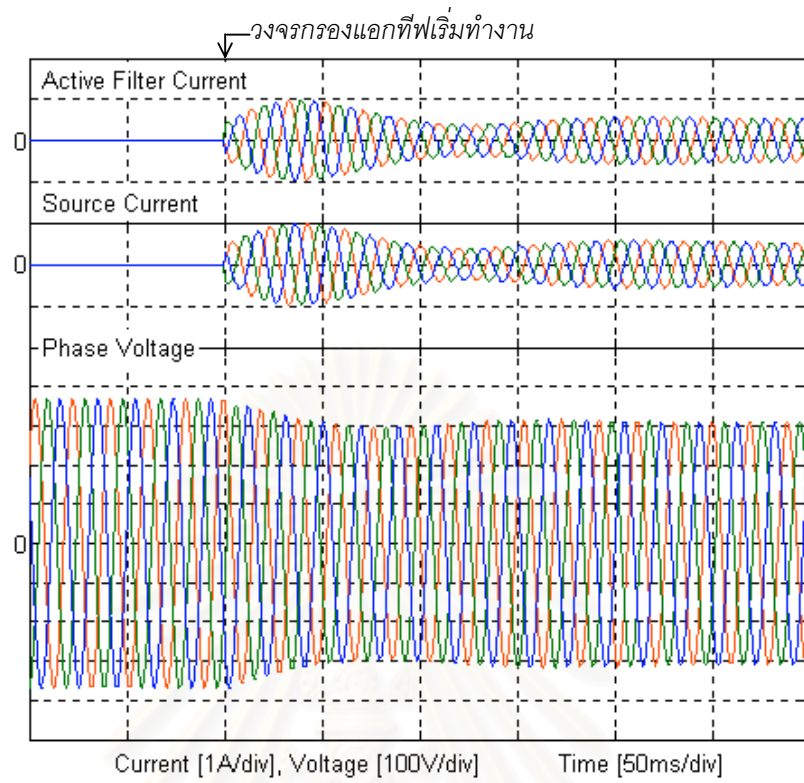
รูปที่ 3.15 เป็นผลการจำลองการสร้างแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อหมุนโรเตอร์ด้วยความเร็วรอบคงที่และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังไม่ได้จ่ายโหลดใด ๆ จะเห็นว่าขนาดของแรงดันด้านนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนในที่สุดขนาดของแรงดันจะคงที่อยู่ที่ค่าประมาณ $365 V_{\text{peak}}$ ในขั้นตอนการสร้างแรงดันนี้เราจะยังไม่ให้วงจรกรองแอกที่ฟทำงานและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องไม่จ่ายโหลดใด ๆ มิฉะนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะไม่สามารถสร้างแรงดันออกมาได้

หลังจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำสร้างแรงดันได้สำเร็จแล้ว แรงดันด้านนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าประมาณ $365 V_{\text{peak}}$ ซึ่งมากกว่าแรงดันที่ต้องการ เราจึงเริ่มการควบคุมแรงดันโดยให้วงจรกรองแอกที่ฟจ่ายกระแสเพื่อควบคุมขนาดแรงดันด้านนอก (แรงดันคำสั่งคือ $220 V_{\text{rms}}$ หรือ $311 V_{\text{peak}}$) ทำให้แรงดันด้านนอกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าลดลงเท่ากับค่าคำสั่งภายในเวลาประมาณ 50 ms ดังแสดงในรูปที่ 3.16

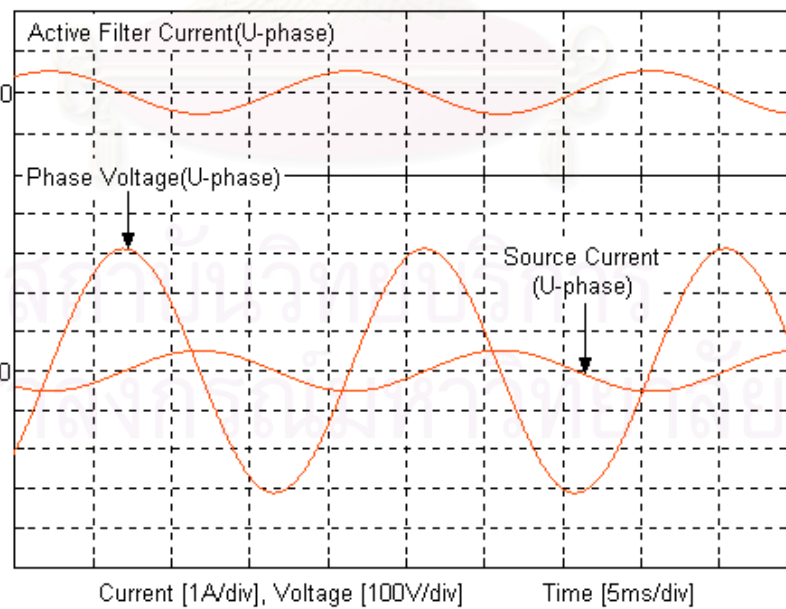
รูปที่ 3.17 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันของระบบในเฟส u ที่สภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในสภาวะไร้โหลดและวงจรกรองแอกที่ฟทำงาน จากที่กล่าวไว้ในตอนแรกว่าก่อนที่วงจรกรองแอกที่ฟจะทำงานแรงดันออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าแรงดันคำสั่งอยู่พอสมควร แสดงว่ามีการกระตุ้นเกิน (over excite) เกิดขึ้น วงจรกรองแอกที่ฟจึงดึงกำลังรีแอกทีฟจากระบบเข้ามา โดยสังเกตได้จากกระแสในสายเฟสที่ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะล้าหลังแรงดันอยู่ 90 องศา ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังจ่ายกำลังรีแอกทีฟออกไปภายนอกให้กับวงจรกรองแอกที่ฟเพื่อลดภาวะการกระตุ้นเกินให้กลับเข้าสู่จุดที่เหมาะสมทำให้ขนาดแรงดันด้านนอกเท่ากับแรงดันคำสั่ง



รูปที่ 3.15 ผลจำลองการสร้างแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง



รูปที่ 3.16 ผลจำลองสถานะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อวงจรกรองแอกทีฟเริ่มทำงานโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในสภาวะไร้โหลด



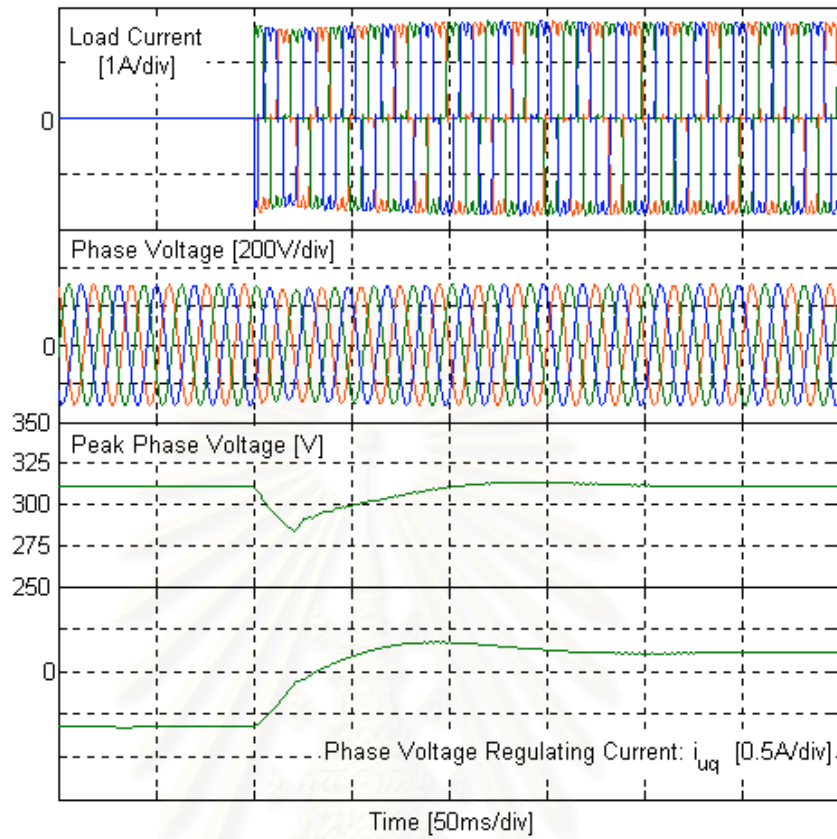
รูปที่ 3.17 ผลจำลองที่สภาวะอยู่ตัวของกระแส-แรงดัน (U-phase) เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในสภาวะไร้โหลด

3.7.2 ผลการจำลองการควบคุมแรงดันเมื่อมีโหลดสมดุล

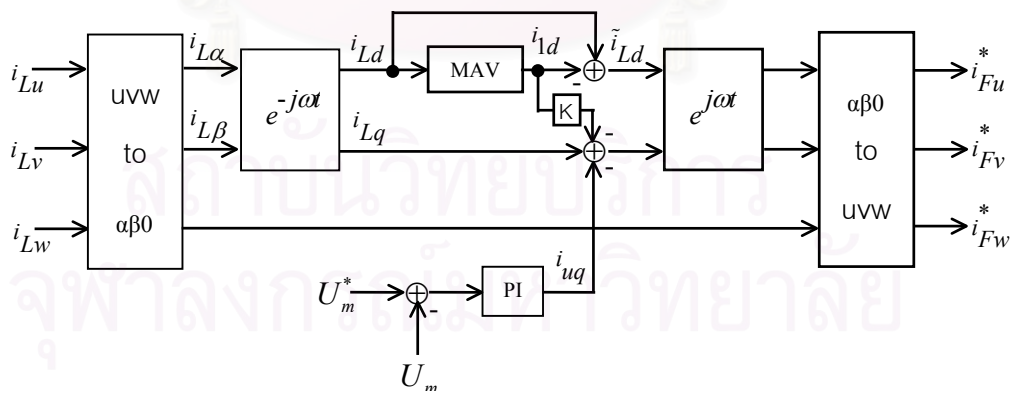
รูปที่ 3.18 แสดงผลการจำลองการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อจ่ายโหลดแบบขั้นขนาดใกล้เคียงค่าพิกัด จะเห็นว่าทันทีที่ใส่โหลดแรงดันเฟสจะลดลงประมาณ 25 โวลต์ วงรอบควบคุมแรงดันจึงมีการปรับตัวโดยสั่งเพิ่มขนาดกระแสควบคุมแรงดันเป็นผลให้แรงดันค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกลับเข้าสู่ค่าคำสั่งอีกครั้งซึ่งใช้เวลาไปประมาณ 200 ms เราสามารถลดเวลาที่ใช้ในการปรับขนาดแรงดันเมื่อจ่ายโหลดพิกัดลงได้โดยเพิ่มอัตราขยายของวงรอบควบคุมแรงดันให้สูงขึ้นแต่การทำเช่นนั้นอาจทำให้เกิดปัญหาเสถียรภาพได้ อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการคำนวณกระแสชดเชยดังแสดงในรูปที่ 3.14 เรามีข้อมูลของกระแส i_{1d} ซึ่งเป็นกระแสที่สะท้อนถึงค่ากำลังแอกทีฟของโหลดที่ความถี่มูลฐาน ดังนั้นถ้าเรานำสัญญาณกระแส i_{1d} นี้มาเป็นสัญญาณป้อนไปหน้าเพื่อช่วยในการทำงานของวงรอบควบคุมแรงดันดังแสดงในรูปที่ 3.19 ก็จะทำให้วงรอบควบคุมแรงดันสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้ดีขึ้น

รูปที่ 3.20 แสดงผลการจำลองการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อจ่ายโหลดและปลดโหลดแบบขั้นขนาดใกล้เคียงค่าพิกัดตามลำดับโดยมีการป้อนไปหน้าของกระแส i_{1d} ช่วยในการควบคุมแรงดัน โดยอัตราขยาย K ที่ใช้คือ 0.5 จะเห็นว่าขณะจ่ายโหลดค่ายอดของแรงดันเฟสจะลดลงน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีกรป้อนไปหน้าและใช้เวลาน้อยกว่าเพื่อกลับเข้าสู่ค่าคำสั่ง

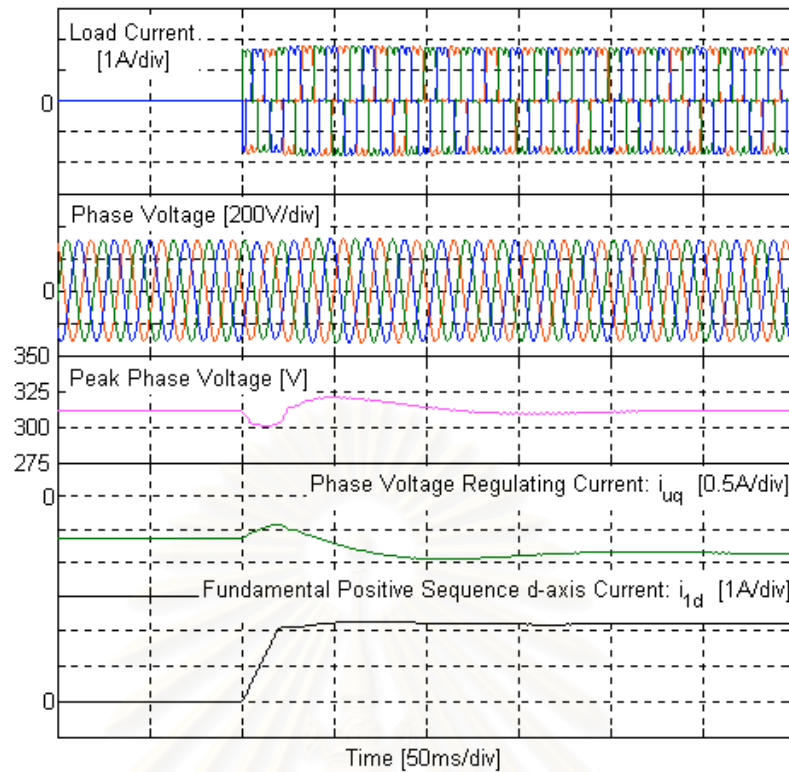
รูปที่ 3.21 แสดงผลจำลองการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อปลดโหลดแบบขั้นขนาดใกล้เคียงค่าพิกัดโดยใช้กระแสป้อนไปหน้าช่วยในการควบคุมแรงดัน จะเห็นว่าทันทีที่ปลดโหลดค่ายอดของแรงดันเฟสจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและแกว่งขึ้นลงรอบค่าคำสั่ง 1 ครั้งก่อนที่จะกลับเข้าสู่ค่าคำสั่งในที่สุดโดยใช้เวลาประมาณ 225 ms ทั้งนี้อาจจะเป็นผลเนื่องจากการใช้อัตราขยาย K ในส่วนกระแสป้อนไปหน้า i_{1d} ที่มากเกินไปในขณะที่จ่ายโหลดอยู่วงรอบควบคุมแรงดันจึงต้องจ่ายกระแสควบคุมแรงดันให้มีค่าติดลบมากขึ้นเพื่อหักล้างผลจากกระแสป้อนไปหน้าที่ทำให้เกิดการกระตุ้นเกิน การที่วงรอบควบคุมแรงดันสร้างสัญญาณกระแสออกมาบางครั้งมีโหลดเช่นนี้พอถึงเวลาที่ปลดโหลดออกวงรอบควบคุมแรงดันจึงให้ผลในการควบคุมแรงดันที่ไม่ดีนักคือเกิดการแกว่งของแรงดันเฟส ดังนั้นการเลือกอัตราขยาย K ในส่วนกระแสป้อนไปหน้า i_{1d} จึงต้องพิจารณาให้เหมาะสมคือต้องให้ผลตอบในการควบคุมแรงดันที่ดีทั้งในกรณีปลดโหลดและจ่ายโหลด



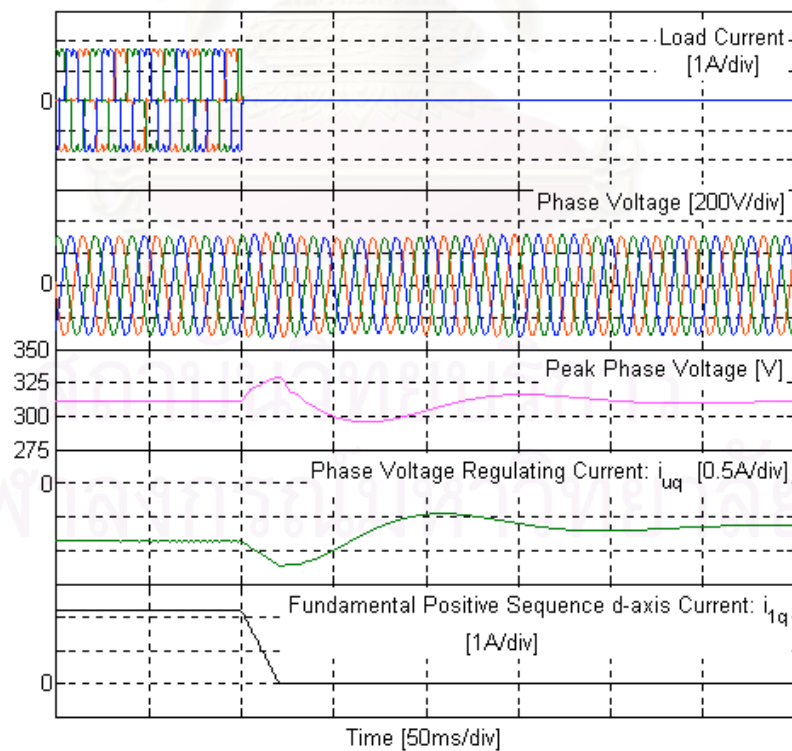
รูปที่ 3.18 ผลการจำลองสภาวะชั่วครู่ของกระแส-แรงดัน
เมื่อจ่ายโหลดแบบขั้นขนาดใกล้เคียงค่าพิกัด



รูปที่ 3.19 การคำนวณกระแสดัดเซยที่ใช้ในการจำลองการทำงานโดยมี
กระแสป้อนไปหน้าในวงรอบควบคุมแรงดันผ่านอัตราขยาย K



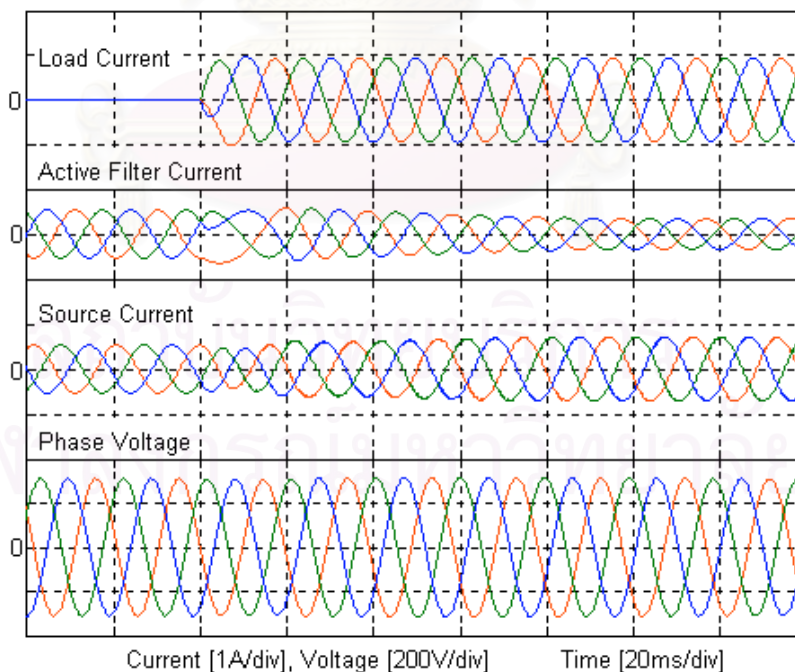
รูปที่ 3.20 ผลจำลองสภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อจ่ายโหลดแบบขั้นขนาด
ใกล้เคียงค่าพิกัดโดยใช้การป้อนไปหน้าช่วยในการควบคุมแรงดัน



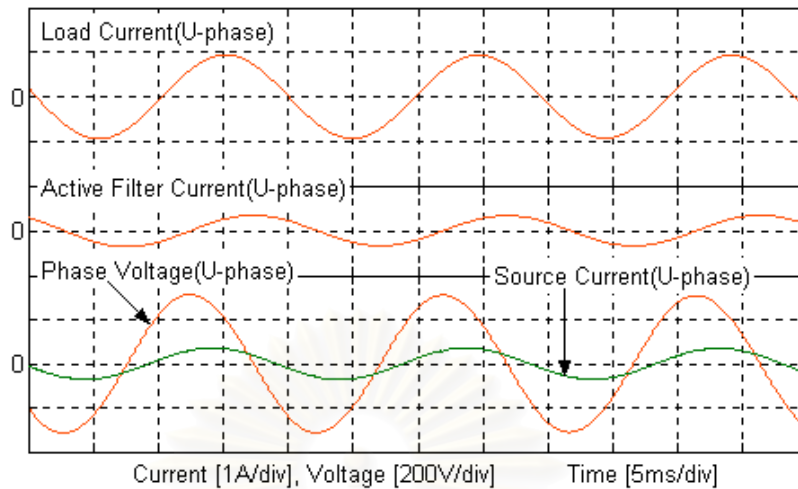
รูปที่ 3.21 ผลจำลองที่สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อปลดโหลด
โดยใช้การป้อนไปหน้าช่วยในการควบคุมแรงดัน

รูปที่ 3.22 แสดงผลการจำลองการทำงานที่สภาวะชั่วคราวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลด 3 เฟสสมมูลต่อวงจรแบบ Y โดยแต่ละเฟสประกอบด้วยตัวต้านทานขนาด 210 โอห์มและตัวเหนี่ยวนำขนาด 800mH ต่ออนุกรมกัน ก่อนต่อโหลดวงจรกรองแอกทีฟจะจ่ายกระแสออกไปเพื่อปรับกระแสกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีค่าเหมาะสมและควบคุมขนาดแรงดันให้ได้ตามค่าแรงดันคำสั่ง แต่เมื่อต่อโหลดจะเห็นมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่รูปคลื่นกระแสของวงจรกรองแอกทีฟคือวงจรกรองแอกทีฟเริ่มปรับกระแสเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเนื่องจากกระแสโหลด แรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

รูปที่ 3.23 แสดงผลการจำลองรูปคลื่นกระแส-แรงดันในสภาวะอยู่ตัวของการจำลองในรูปที่ 3.21 เนื่องจากในสภาวะปกติที่ยังไม่ได้ใส่โหลด ขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ทำให้เกิดการกระตุ้นเกินขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วงจรกรองแอกทีฟจึงต้องจ่ายกระแสที่นำหน้าแรงดันเฟส 90 องศาเพื่อดึงกำลังรีแอกทีฟเข้ามาในวงจรกรองทำให้กระแสกระตุ้นมีค่าลดลง แต่เมื่อใส่โหลดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำลังรีแอกทีฟในส่วนที่กระตุ้นเกินได้ถูกดึงไปใช้โดยโหลดแต่ก็ไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด วงจรกรองแอกทีฟจึงต้องเปลี่ยนมาจ่ายกำลังรีแอกทีฟออกไปเพิ่มเติมตามที่โหลดต้องการและเพื่อควบคุมแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยสังเกตได้จากกระแสของวงจรกรองแอกทีฟที่เปลี่ยนมุมเฟสมาเป็นล่าหลังแรงดันเฟส 90 องศาหลังจากใส่โหลด



รูปที่ 3.22 ผลการจำลองที่สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ

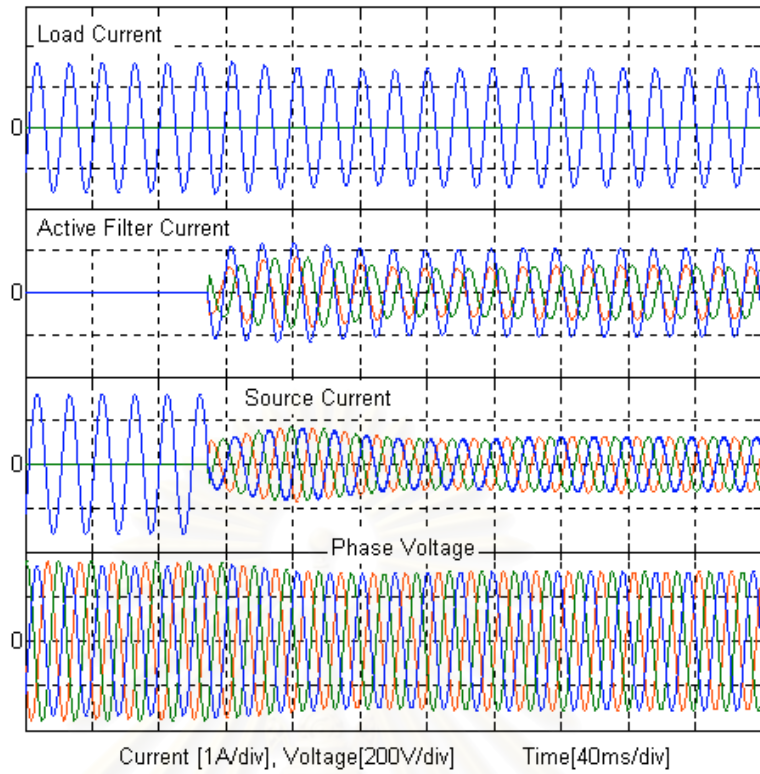


รูปที่ 3.23 ผลการจำลองที่สภาวะอยู่ตัวของกระแส-แรงดันเมื่อ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ

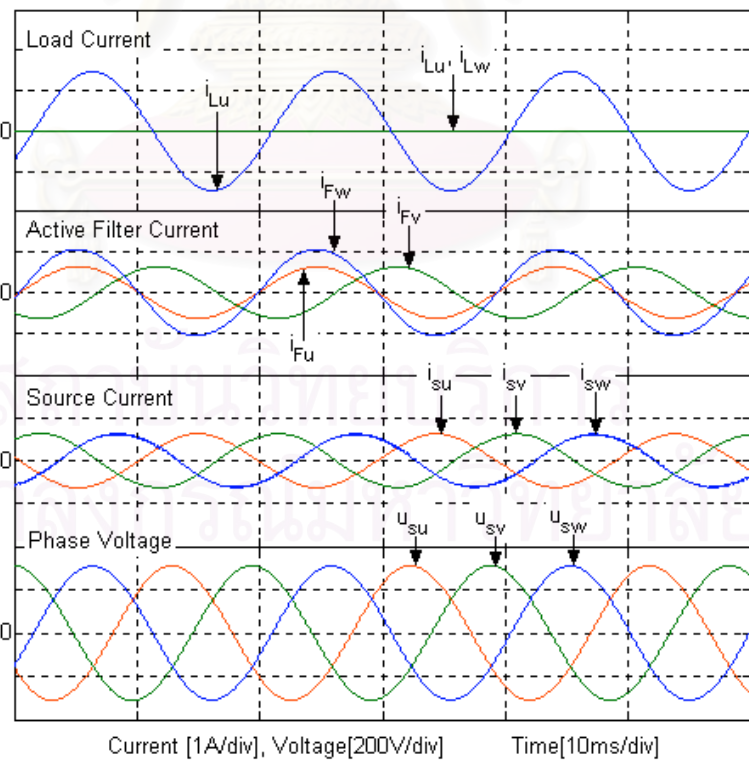
3.7.3 ผลการจำลองการทำงานเมื่อจ่ายโหลดไม่สมดุล

รูปที่ 3.24 และ 3.25 แสดงผลการจำลองการทำงานเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่สมดุลซึ่งเป็นโหลดความต้านทานขนาด 210 โอห์มต่ออยู่ที่เฟส w เพียงเฟสเดียว ในช่วงแรกที่วงจรรองแอกทีฟยังไม่ได้ทำงานกระแสในสายเฟสด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีความไม่สมดุลเช่นเดียวกันกับกระแสโหลดและส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นในแรงดันเฟสด้วย แต่เมื่อวงจรรองแอกทีฟเริ่มทำงานคือเริ่มจ่ายกระแสเพื่อชดเชยโหลดไม่สมดุลก็เป็นผลให้มีความสมดุลเกิดขึ้นทั้งในแรงดันและกระแสในสายเฟสด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

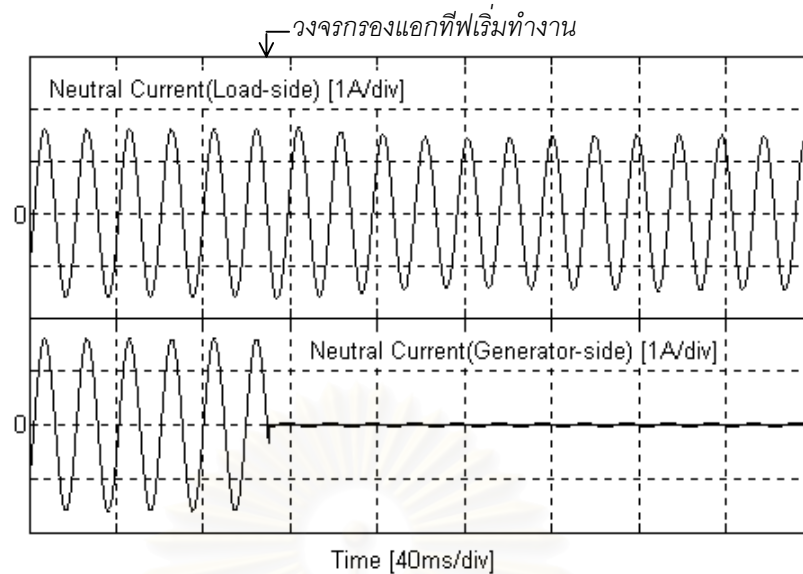
รูปที่ 3.26 แสดงให้เห็นผลของการทำงานของวงจรรองแอกทีฟในกรณีชดเชยโหลดไม่สมดุลในอีกแง่มุมหนึ่งคือการดูขนาดกระแสในสายนิวทรัลด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเห็นว่าในช่วงแรกก่อนที่วงจรรองแอกทีฟจะทำงาน กระแสในสายนิวทรัลด้านโหลดและด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน แต่เมื่อวงจรรองแอกทีฟทำงาน กระแสในสายนิวทรัลด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะลดขนาดลงเป็นศูนย์ซึ่งเป็นสิ่งที่แสดงว่ากระแสในสายเฟสด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีความสมดุล



รูปที่ 3.24 ผลการจำลองที่สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันขณะวงจรรองแยกที่ฟเริ่มทำงานโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่สมดุล



รูปที่ 3.25 ผลการจำลองการทำงานในสภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่สมดุลโดยมีวงจรรองแยกที่ฟทำงานอยู่

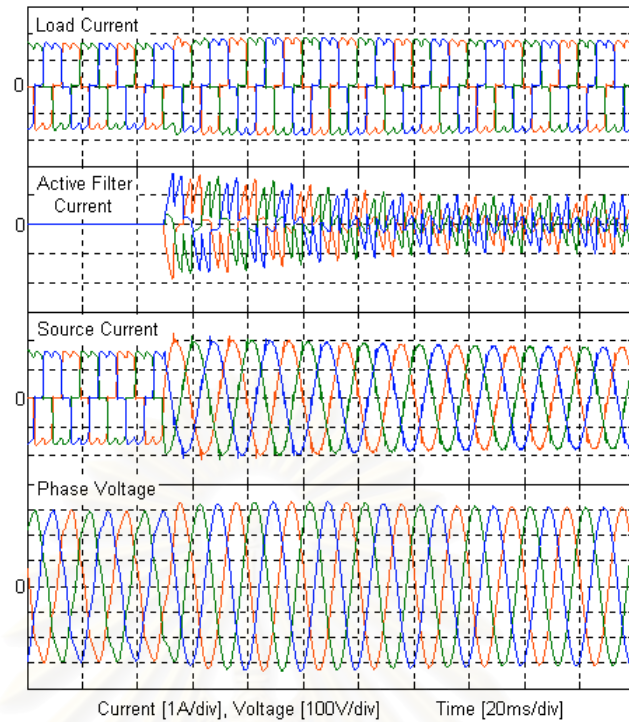


รูปที่ 3.26 ผลการจำลองของกระแสในทรานส์ด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และด้านโหลดขณะวงจรรองแอกทีฟเริ่มทำงาน

3.7.4 ผลการจำลองการทำงานเมื่อจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น

รูปที่ 3.27 และ 3.28 แสดงผลการจำลองการทำงานที่สภาวะชั่วคราวขณะวงจรรองแอกทีฟเริ่มทำงานโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นซึ่งเป็นวงจรเรียงกระแส 3 เฟสโดยทางด้านแรงดันไฟตรงมีตัวต้านทาน 310 โอห์มและตัวเหนี่ยวนำ 41.9mH ต่ออนุกรมกัน ในช่วงแรกก่อนที่วงจรรองแอกทีฟจะทำงาน กระแสในสายเฟสด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่มากจนสร้างผลกระทบให้แรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกปะปนด้วยเช่นกัน แต่หลังจากที่วงจรรองแอกทีฟเริ่มทำงานจ่ายกระแสฮาร์มอนิกออกไปชดเชยกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเนื่องจากโหลดแล้ว กระแสในสายเฟสด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็เริ่มมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์มากขึ้นรวมทั้งรูปคลื่นในแรงดันออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็มีลักษณะที่ใกล้เคียงไซน์มากขึ้นเช่นกัน

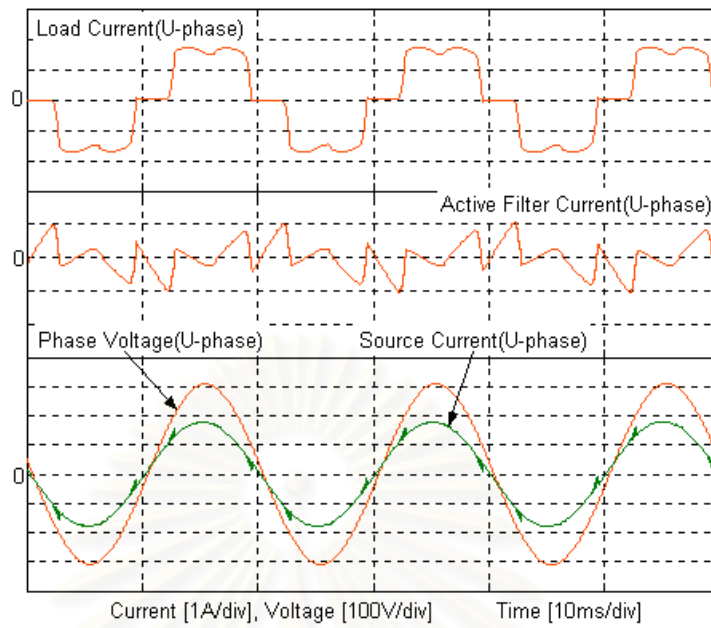
รูปที่ 3.29 แสดงผลการจำลองการทำงานที่สภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น จากรูปจะเห็นว่ารูปคลื่นกระแสในสายเฟสด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีลักษณะเป็นไซน์แม้กระแสโหลดจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นที่มีฮาร์มอนิกจำนวนมากก็ตาม แสดงว่าอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณกระแสชดเชยทำงานได้ดี



รูปที่ 3.27 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแส-แรงดันที่สภาวะชั่วคราวขณะวงจรกรองแยกที่ฟเริ่มทำงานโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น



รูปที่ 3.28 ผลการจำลองที่สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดัน(U-phase) เมื่อวงจรกรองแยกที่ฟเริ่มทำงานโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น (ภาพขยายของรูปที่ 3.27)



รูปที่ 3.29 ผลการจำลองที่สภาวะอยู่ตัวของกระแส-แรงดันเมื่อ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น

บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุม PI สำหรับควบคุมแรงดันบัสไฟตรง และแรงดันกึ่งกลางบัสไฟตรง

จากทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ กำลังงานแอกทีฟขณะใด ๆ (p) และกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ (q) ของระบบ 3 เฟสสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ 4.1

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

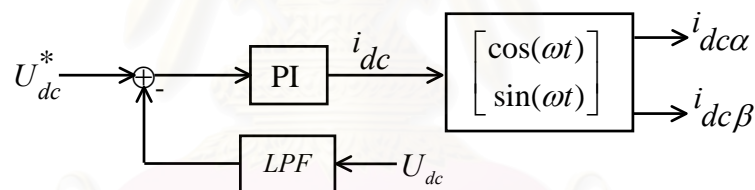
ค่ากำลังงานแอกทีฟขณะใด ๆ และกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ มีองค์ประกอบทั้งที่เป็นไฟตรงและไปสลับดังต่อไปนี้

- องค์ประกอบไฟตรง (\bar{p}, \bar{q}) เกิดจากกระแสที่มีความถี่และลำดับตรงกับแรงดัน
- องค์ประกอบไฟสลับ (\tilde{p}, \tilde{q}) เกิดจากกระแสที่มีความถี่หรือลำดับไม่ตรงกับแรงดัน

ในกรณีที่แรงดันจากแหล่งจ่ายสมดุลและไม่มีฮาร์มอนิก องค์ประกอบไฟตรงของ p และ q จะเกิดจากเฉพาะกระแสองค์ประกอบมูลฐานลำดับบวก องค์ประกอบไฟสลับของ p และ q จะเกิดจากกระแสองค์ประกอบมูลฐานลำดับลบ(ในกรณีที่โหลดไม่สมดุล)หรือเกิดจากกระแสฮาร์มอนิกเท่านั้น เมื่อนำทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ มาพิจารณากำลังงานที่ไหลเข้า-ออกจากวงจรกรองแอกทีฟจะพบว่า กระแสฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดกำลังงานในส่วนที่เป็นองค์ประกอบไฟสลับ (\tilde{p} และ \tilde{q}) กระแสกำลังรีแอกทีฟจะทำให้เกิดกำลังงานในส่วนที่เป็นองค์ประกอบไฟตรง \bar{q} และในการชดเชยโหลดไม่สมดุลวงจรกรองแอกทีฟก็เพียงแต่ทำหน้าที่โยกย้ายกำลังแอกทีฟระหว่างเฟสเท่านั้น ดังนั้นค่ากำลังงานที่ไหลเข้า-ออกจากอินเวอร์เตอร์ของวงจรกรองแอกทีฟใน 1 คาบเวลาจึงมีค่าเป็นศูนย์ ด้วยเหตุนี้เองส่วนของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในวงจรกรองแอกทีฟจึงไม่จำเป็นต้องมีวงจรเรียงกระแสเพื่อจ่ายกำลังงานให้กับตัวเก็บประจุไฟตรงเหมือนอินเวอร์เตอร์ทั่วไป อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีการสูญเสียในวงจรอินเวอร์เตอร์จึงต้องมีการดึงกำลังแอกทีฟเข้ามาจากระบบเพื่อใช้ในการควบคุมแรงดันไฟตรงที่จำเป็นต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์

4.1 การออกแบบส่วนควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

วงจรรีโวลต์เตอร์จะสร้างแรงดันเพื่อควบคุมให้วงจรรองแอกทีฟจ่ายกระแสที่ความถี่มูลฐานในทิศทางซึ่งจะทำให้เกิดการดึงพลังงานจากแรงดันแหล่งจ่ายที่ความถี่มูลฐานเข้าสู่วงจรรองแอกทีฟ พลังงานที่ถูกดึงเข้าสู่วงจรรองแอกทีฟจะถูกนำไปสะสมในตัวเก็บประจุ ทำให้ค่าระดับแรงดันบัลไฟตรงมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันถ้าแรงดันบัลไฟตรงมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนด วงจรรองแอกทีฟก็จะจ่ายกระแสที่ความถี่มูลฐานในทิศทางที่จะให้มีการจ่ายพลังงานออกไปจากอินเวอร์เตอร์ทำให้แรงดันบัลไฟตรงมีค่าลดลง ดังนั้นเราสามารถเขียนส่วนการควบคุมแรงดันบัลไฟตรงเป็นบล็อกไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยค่าแรงดันบัลไฟตรง U_{dc} จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง U_{dc}^* ซึ่งค่าความผิดพลาดจะถูกส่งผ่านตัวควบคุม PI ซึ่งจะกำหนดค่ากระแสคำสั่ง i_{dc} ที่จำเป็นในการควบคุมแรงดัน โดยกระแส i_{dc} นี้จะเป็นองค์ประกอบกระแสในแนวแกน d ซึ่งมีเฟสเดียวกันกับแรงดันของระบบและทำให้เกิดการดึงหรือจ่ายกำลังแอกทีฟเท่านั้น สัญญาณกระแส i_{dc} นี้จะถูกนำไปแปลงเป็นสัญญาณอ้างอิงบนแกนนิ่ง $\alpha - \beta$ และจะถูกนำไปรวมกับกระแสฮาร์มอนิกที่คำนวณได้ก่อนหน้าเป็นกระแสคำสั่งสำหรับวงจรรองแอกทีฟต่อไป



รูปที่ 4.1 แผนภาพของการควบคุมแรงดันบัลไฟตรง

การออกแบบตัวควบคุม PI จะเริ่มจากการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บประจุเป็นบล็อกไดอะแกรมซึ่งเมื่อรวมกับบล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุม PI และวงจรรองผ่านต่ำแล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยที่การเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บประจุเราจะอาศัยสมการพลังงานดังแสดงในสมการที่ (4.2) และ (4.3)

$$P_{charge} - P_{loss} = u_{dc}(t)i_{dc}(t) = u_{dc}(t)C_{dc} \frac{du_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{2}C_{dc} \frac{du_{dc}^2(t)}{dt} \quad (4.2)$$

$$P_{charge} = U_m i_{dc}(t) \quad (4.3)$$

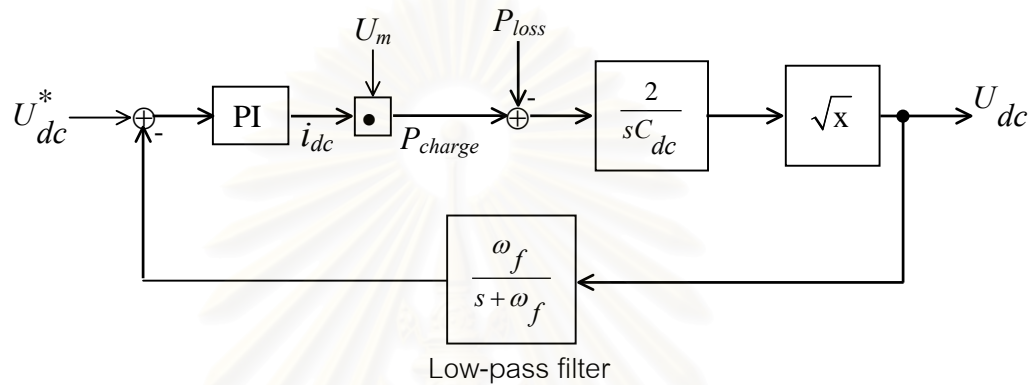
โดยที่ P_{charge} คือกำลังงานที่ไหลเข้าอินเวอร์เตอร์

P_{loss} คือค่ากำลังงานสูญเสียต่าง ๆ ของอินเวอร์เตอร์

i_{dc} คือค่ากระแสที่อินเวอร์เตอร์จ่ายในแนวแกน d

C_{dc} คือค่าตัวเก็บประจุไฟตรง

U_m คือขนาดสเปซเวกเตอร์ของแรงดันด้านแหล่งจ่าย



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมแรงดันบัลไฟตรงที่ใช้ในการออกแบบ

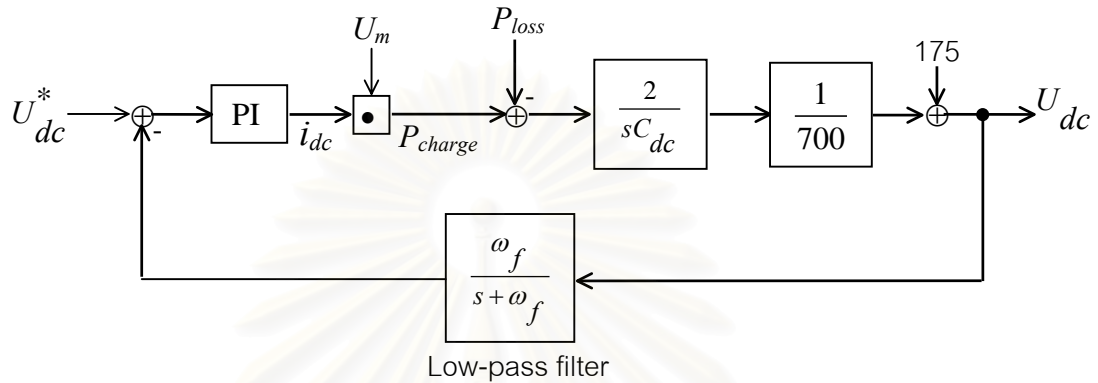
จากรูปที่ 4.2 พบว่าวงรอบการควบคุมมีส่วนของการคำนวณถอดรากที่สองซึ่งเป็นส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นทำให้เกิดความยุ่งยากในการออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุม ดังนั้นเราจึงต้องประมาณส่วนการถอดรากที่สองให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้น (linearization) ในช่วงการทำงานแคบ ๆ รอบจุดทำงานที่ $U_{dc} = 350$ V โดยใช้ออนุกรมเทย์เลอร์ถึงอันดับที่ 1 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned}
 y(x) = \sqrt{x} &= \sqrt{x_0 + \Delta x} \approx \sqrt{x_0} + \left. \frac{d\sqrt{x}}{dx} \right|_{x=x_0} \cdot \Delta x \\
 &\approx \sqrt{x_0} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} \cdot \Delta x \\
 &\approx \sqrt{x_0} + \frac{1}{2\sqrt{x_0}} \cdot (x - x_0)
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

เมื่อแทนค่า $x_0 = 350^2$ ลงในสมการที่ (4.4) จะได้

$$\begin{aligned}
 y(x) &\approx \sqrt{350^2} + \frac{1}{2\sqrt{350^2}} (x - 350^2) \\
 &\approx 175 + \frac{x}{700}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

เมื่อประมาณการถดถากที่สองเป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (4.5) แล้ว เราสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ใหม่ดังรูปที่ 4.3 และสามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดได้ดังสมการที่ (4.6)



รูปที่ 4.3 แผนภาพของส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงหลังจากประมาณส่วนคำนวณถดถากที่สองให้เป็นเชิงเส้น

$$GH(s) = k_p \left(\frac{s + \frac{k_i}{k}}{s} \right) \left(\frac{\omega_f}{s + \omega_f} \right) \left(\frac{2}{sC_{dc}} \right) \left(\frac{1}{700} \right) (U_m) \quad (4.6)$$

เนื่องจากเราใช้หม้อแปลงที่มีอัตราส่วนแรงดันเท่ากับ 2:1 เชื่อมต่อระหว่างวงจรกรองแอกทีฟและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยหม้อแปลงด้านแรงดันต่ำต่ออยู่กับวงจรกรองแอกทีฟ ดังนั้น U_m จึงเท่ากับ $381/2 = 190.5$ V

แทนค่า $C_{dc} = 2000 \mu\text{F}$ และ $U_m = 190.5$ V ลงในสมการที่ (4.6) จะได้

$$GH(s) = k_p \left(\frac{s + \frac{k_i}{k}}{s} \right) \left(\frac{\omega_f}{s + \omega_f} \right) \left(\frac{272.143}{s} \right) \quad (4.7)$$

ในการพิจารณาเรื่องของการตอบสนอง เราไม่ควรออกแบบวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีความเร็วในการตอบสนองถึงย่านความถี่ฮาร์มอนิกเพราะจะทำให้กำลังงานรีแอกทีฟเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกไม่สามารถไหลเข้า-ออกจากวงจรกรองแอกทีฟได้ ทำ

ให้วงจรกรองแอกทีฟไม่สามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในส่วนนี้ได้ จากเหตุผลดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงออกแบบวงรอบควบคุมแรงดันบัลไฟตรงให้มีเวลาในการตอบสนองต่อสัญญาณขึ้น (rise time, t_r) เท่ากับ 2 วินาที ดังนั้นค่าประมาณของความถี่ตัดข้าม $\omega_c \approx \frac{1}{t_r}$ คือ 0.5 rad/s ออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมด้วยวิธี symmetrical optimum จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ตัดข้ามกับตำแหน่งขั้วของตัวกรองผ่านต่ำและตำแหน่งศูนย์ของตัวควบคุมดังต่อไปนี้

$$\text{ตำแหน่งขั้วของตัวกรองผ่านต่ำ } \omega_f = a\omega_c$$

$$\text{ตำแหน่งศูนย์ของตัวควบคุม } \frac{k_i}{k_p} = \frac{\omega_c}{a}$$

เลือก $a = 2.4$ ดังนั้น $\omega_f = 2.4 \times 0.5 = 1.2 \text{ rad/s}$

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{0.5}{2.4} = 0.2083 \text{ rad/s}$$

ณ ความถี่ตัดข้าม จะได้ขนาดของ $|GH(s)|_{s=j\omega_c} = 1$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.7) เมื่อแทนค่าความถี่ตัดข้าม, ตำแหน่งขั้วและศูนย์ จะได้

$$GH(j\omega_c) = k_p \left(\frac{\sqrt{0.5^2 + 0.2083^2}}{0.5} \right) \left(\frac{1.2}{\sqrt{0.5^2 + 1.2^2}} \right) \left(\frac{272.143}{0.5} \right) = 1 \quad (4.8)$$

ดังนั้น $K_p = 1.837 \times 10^{-3} \text{ [A/V]}$

$$K_i = 0.2083 K_p = 3.827 \times 10^{-4} \text{ [A rad/V s]}$$

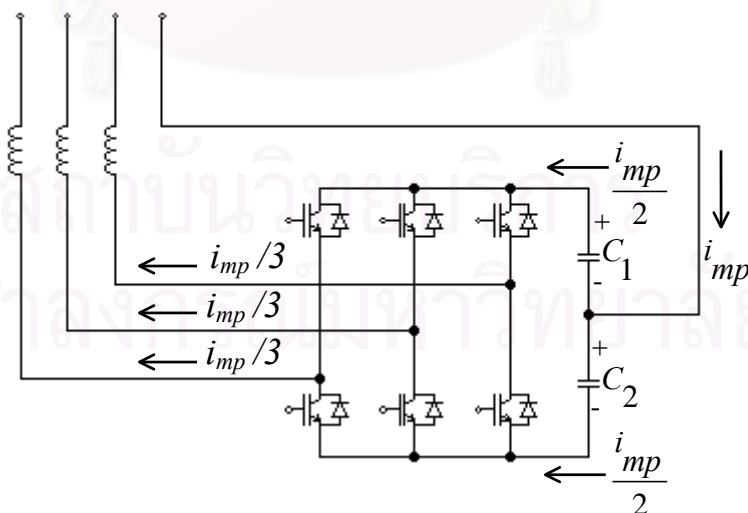
4.2 การออกแบบส่วนควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัล

เนื่องจากระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นนี้เป็นระบบ 3 เฟส 4 สายเพื่อให้ชดเชยฮาร์มอนิกในสายนิวทรัลได้เราจึงต้องนำสายนิวทรัลด้านแรงต่ำของหม้อแปลงเชื่อมโยงมาต่ออยู่กับจุดกึ่งกลางของบัลไฟตรง การใช้งานวงจรกรองแอกทีฟในระบบ 3 เฟส 4 สายที่มีการนำสายนิวทรัลมาต่อเข้ากับจุดกึ่งกลางของบัลไฟตรงนั้นมีความเป็นไปได้ที่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุตัวบนและตัวล่างจะมีค่าแตกต่างกันมาก ซึ่งเกิดจากการมีค่าองค์ประกอบไฟตรงอยู่ในกระแสที่วงจรกรองแอกทีฟจ่ายออกไป โดยองค์ประกอบไฟตรงของกระแสที่เกิดขึ้นได้

จากหลายสาเหตุ เช่นการปรับแต่งวงจรวัดกระแสที่ไม่ดีพอ หรือเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการสร้างแรงดันของตัวอินเวอร์เตอร์เอง แม้กระแสส่วนนี้จะมีค่าน้อยแต่ถ้าวงจรรองแอกทีฟทำงานไปนาน ๆ ก็จะมีผลให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุตัวบนและตัวล่างมีค่าแตกต่างกันมากได้ ซึ่งจะทำให้แรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างขึ้นจากการทำงานของสวิตช์ตัวบนและตัวล่างมีค่าแตกต่างกันมากจนส่งผลกระทบต่อการทำงานของกระแสชดเชยในที่สุด และในกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองที่ได้พัฒนาขึ้นนี้การเลื่อนไปของระดับแรงดันที่จุดกึ่งกลางบัลไฟตรงอาจสร้างความไม่สมดุลขึ้นในแรงดันเฟสได้ ดังนั้นเราจึงต้องควบคุมระดับแรงดันที่จุดกึ่งกลางบัลไฟตรงนี้ให้มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันบัลไฟตรงอยู่เสมอโดยใช้หลักการควบคุมการไหลของกระแสของวงจรรองแอกทีฟ หรือมองว่าเป็นการควบคุมการไหลของกระแสลำดับศูนย์ในเชิงสเปซเวกเตอร์ก็ได้ โดยตัวควบคุมจะสร้างสัญญาณกระแสลำดับศูนย์ที่ใช้ในการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัลไฟตรงไปพร้อมกับสัญญาณกระแสลำดับศูนย์ที่ได้จากการแปลงสเปซเวกเตอร์ของกระแสไหล

กำหนดให้ i_{mp} เป็นกระแสควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัลไฟตรงที่จ่ายโดยวงจรรองแอกทีฟ จากกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์แสดงว่ามีกระแส i_{mp} ไหลเข้าจุดกึ่งกลางบัลไฟตรงผ่านทางสายนิวทรัลด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.12 ในตอนแรกสมมติให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$$U_{C_1} + U_{C_2} = U_{dc} \quad \text{และ} \quad U_{C_2} = \frac{1}{2}U_{dc} \quad (4.9)$$



รูปที่ 4.4 นิยามการแยกไหลของกระแสเข้าตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2

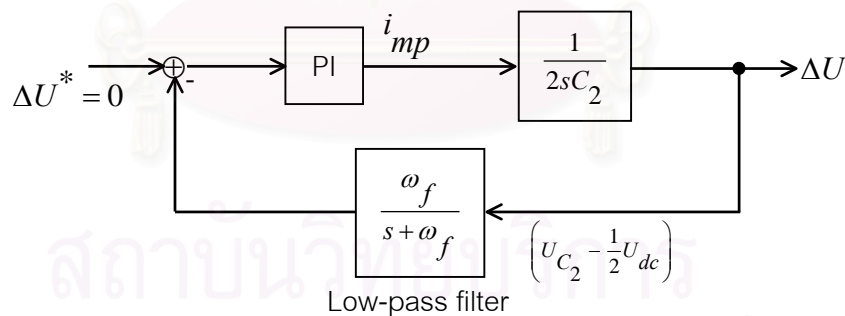
เนื่องจากกระแสลำดับศูนย์ที่ไหลในสายเฟสมีค่าเท่ากันทุกเฟส ($= i_{mp} / 3$) ดังนั้นกำลังแอกทีฟที่วงจรรับหรือจ่ายเข้าสู่ระบบจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ในกรณีที่แรงดันระบบมีความสมดุล กล่าวคือ

$$u_{su} \cdot \frac{i_{mp}}{3} + u_{sv} \cdot \frac{i_{mp}}{3} + u_{sw} \cdot \frac{i_{mp}}{3} = 0 \quad (4.10)$$

แรงดันบัลไฟตรงจึงมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการไหลของกระแสในสายนิวทรัลนี้และเนื่องจากค่าตัวเก็บประจุ $C_1 = C_2$ ดังนั้นกระแส i_{mp} จะแยกไหลด้วยค่าที่เท่ากันผ่านตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 จะทำให้แรงดัน U_{C_1} ลดลง ΔU และแรงดัน U_{C_2} เพิ่มขึ้น ΔU ดังสมการที่ (4.10)

$$\Delta U = \int \frac{1}{C_2} \frac{i_{mp}}{2} dt \quad (4.10)$$

จากสมการที่ (4.10) ถ้าเราเรีกฎเลตให้ ΔU มีค่าเท่ากับศูนย์จะทำให้แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากันดังนั้นจึงเขียนเป็นแผนภาพของการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัลไฟตรงได้ดังรูปที่ 4.5 และเขียนฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดได้ดังสมการที่ (4.12)



รูปที่ 4.5 แผนภาพการควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัลไฟตรง

$$GH(s) = k_p \left(\frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{s} \right) \left(\frac{1}{2sC_2} \right) \left(\frac{\omega_f}{s + \omega_f} \right) \quad (4.12)$$

แทนค่า $C_2 = 4000 \mu\text{F}$ ลงในสมการที่ (4.12) จะได้

$$GH(s) = k_p \left(\frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{125}{s}} \right) \left(\frac{\omega_f}{s + \omega_f} \right) \quad (4.13)$$

เราจะออกแบบวงรอบควบคุมแรงดันกึ่งกลางบัสไฟตรงให้มีความเร็วในการตอบสนองต่อสัญญาณขึ้นเร็วกว่าวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงประมาณ 4 เท่าคือเลือกค่า rise time ที่ค่าประมาณ 0.5 วินาที ดังนั้นค่าประมาณของความถี่ตัดข้าม ω_c จึงเท่ากับ 2 rad/s ออกแบบอัตราขยายของตัวควบคุมด้วยวิธี symmetrical optimum จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ตัดข้ามกับตำแหน่งขั้วของตัวกรองผ่านต่ำและตำแหน่งศูนย์ของตัวควบคุมดังต่อไปนี้

$$\text{ตำแหน่งขั้วของตัวกรองผ่านต่ำ } \omega_f = a\omega_c$$

$$\text{ตำแหน่งศูนย์ของตัวควบคุม } \frac{k_i}{k_p} = \frac{\omega_c}{a}$$

เลือก $a = 2.4$ ดังนั้น $\omega_f = 2.4 \times 2.0 = 4.8 \text{ rad/s}$

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{2.0}{2.4} = 0.833 \text{ rad/s}$$

ณ ความถี่ตัดข้ามจะได้ขนาดของ $|GH(s)|_{s=j\omega_c} = 1$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.13) เมื่อแทนค่าความถี่ตัดข้าม, ตำแหน่งขั้วและศูนย์ จะได้

$$GH(j\omega_c) = k_p \left(\frac{\sqrt{2^2 + 0.833^2}}{2} \right) \left(\frac{125}{2} \right) \left(\frac{4.8}{\sqrt{2^2 + 4.8^2}} \right) = 1 \quad (4.14)$$

ดังนั้น $k_p = 0.016 \text{ [A/V]}$

$$k_i = 0.833 \times k_p = 13.33 \times 10^{-3} \text{ [A} \cdot \text{rad/V} \cdot \text{s]}$$

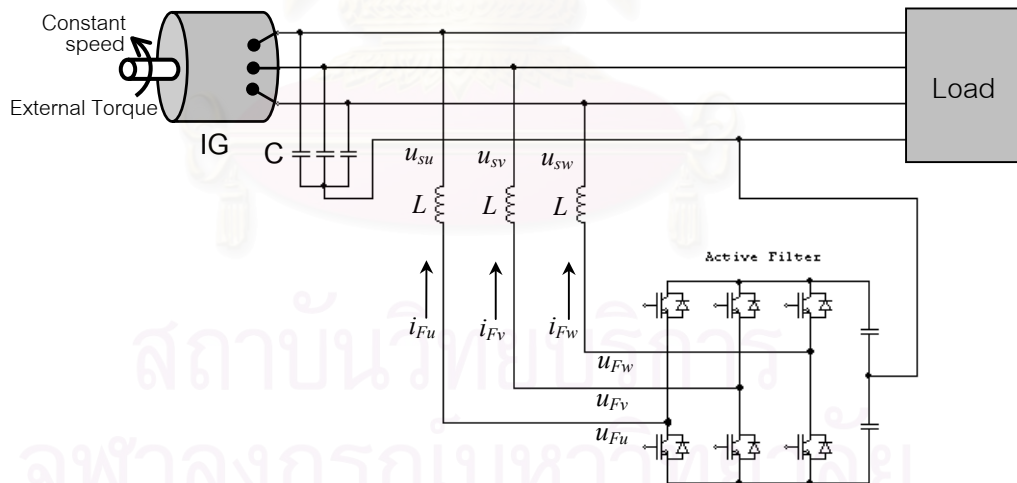
บทที่ 5

การควบคุมกระแสแบบทำซ้ำ

บทนี้จะนำเสนอการสร้างและควบคุมกระแสชดเชยด้วยวิธีทำซ้ำโดยจะกล่าวถึงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบทำซ้ำและเสถียรภาพของวงรอบควบคุมกระแส สุดท้ายจะแสดงผลการจำลองการทำงานและผลการทดลองจริงเพื่อทดสอบคุณสมบัติของตัวควบคุมแบบทำซ้ำ

5.1 การสร้างและควบคุมกระแสชดเชย

วงจรกรองแอกทีฟจะมีวงจรอินเวอร์เตอร์ทางด้านออกซึ่งทำหน้าที่ในการสร้างกระแสชดเชยตามกระแสคำสั่งที่คำนวณได้เพื่อจ่ายเข้าไปหักล้างกับองค์ประกอบกระแสในระบบงานวิจัยนี้เราใช้อินเวอร์เตอร์แบบควบคุมกระแส 3 เฟสที่มีสวิตช์ 6 ตัวและมีคาปาซิเตอร์เป็นตัวสร้างบัลไฟตรง โดยอินเวอร์เตอร์ต่อกับระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำผ่านตัวเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การเชื่อมต่อวงจรกรองแอกทีฟเข้ากับระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

อินเวอร์เตอร์จะสร้างแรงดันออกเพื่อเอาชนะแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงที่มีค่าเพียงพอที่จะทำให้กระแสไหลเข้าสู่ระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (5.1) และสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 5.2

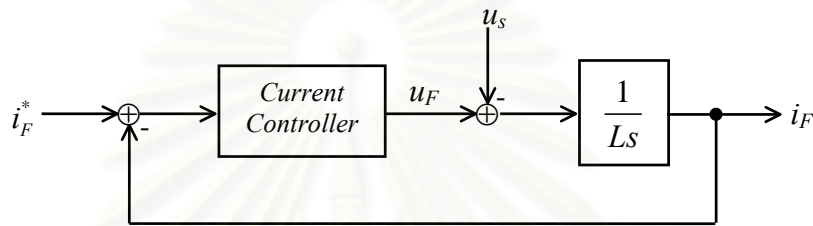
$$L \frac{di_F}{dt} = u_F - u_S \quad (5.1)$$

โดยที่ i_F คือกระแสขดเคเบิลจากวงจรกรองแอกทีฟ

L คือค่าความเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อระหว่างอินเวอร์เตอร์กับระบบของเครื่องไฟฟ้า

u_F คือแรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างขึ้น

u_S คือแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.2 แผนภาพวงรอบควบคุมกระแสของวงจรกรองแอกทีฟ

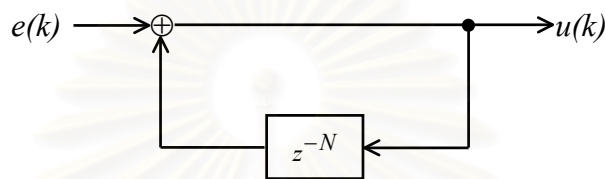
การควบคุมกระแสขดเคเบิลนั้นมียุทธวิธีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส (hysteresis) 3 เฟสอิสระ วิธีนี้เป็นการทำงานของระบบแบบแอนะล็อกโดยตรวจจับกระแสขดเคเบิลที่สร้างได้จริงมาเปรียบเทียบกับกระแสคำสั่งเพื่อหาผลความคลาดเคลื่อนกระแสแล้วนำมาเปรียบเทียบกับขอบเขตที่กำหนด (hysteresis band) อย่างต่อเนื่อง ถ้าความคลาดเคลื่อนของกระแสเพิ่มขึ้นหรือลดลงจนชนขอบของ hysteresis band ก็จะทำให้สวิตช์ที่อินเวอร์เตอร์เปลี่ยนตำแหน่งทันทีโดยที่แต่ละเฟสทำงานอย่างเป็นอิสระต่อกันไม่ขึ้นกับการสวิตช์ของเฟสอื่น

ข้อดีของการควบคุมแบบฮิสเทอรีซิสคือเป็นระบบที่ง่ายมาก ไม่ต้องมีการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อนและให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือความไม่แน่นอนของเวลาที่การสวิตช์และนำไปใช้กับระบบดิจิทัลได้ยากเนื่องจากระบบดิจิทัลจะรับข้อมูลโดยใช้การสุ่มตัวอย่าง ดังนั้นจึงมีโอกาสที่ความคลาดเคลื่อนของกระแสจะทะลุเกิน hysteresis band

วิธีควบคุมแบบ PI ข้อดีของการใช้ตัวควบคุมแบบ PI คือความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ทำให้สามารถกรองแยกกระแสลอคที่ความถี่การสวิตช์ออกได้ง่ายและยังสามารถใช้กับระบบดิจิทัลได้ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถกำจัดความผิดพลาดที่สภาวะอยู่ตัวได้หมดเนื่องจากอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ PI มีค่าจำกัดที่ความถี่ฮาร์มอนิก จากข้อเสียของตัวควบคุมทั้งสองแบบที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมที่สามารถลดข้อเสียเหล่านี้ได้นั้นก็คือตัวควบคุมแบบทำซ้ำ

5.2 ตัวควบคุมแบบทำซ้ำ

ตัวควบคุมแบบทำซ้ำในเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.3 ตัวควบคุมแบบทำซ้ำถือเป็นตัวควบคุมแบบเรียนรู้ด้วยตัวเองอย่างง่าย (simple learning control) ประเภทหนึ่งเพราะว่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะถูกคำนวณโดยใช้ข้อมูลสัญญาณผิดพลาดจากคาบก่อนหน้า



รูปที่ 5.3 ตัวควบคุมแบบทำซ้ำในเชิงเวลาไม่ต่อเนื่อง

โดย N คือจำนวนข้อมูลใน 1 คาบซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{T}{T_s}$

T คือคาบเวลาของสัญญาณที่ต้องการควบคุม

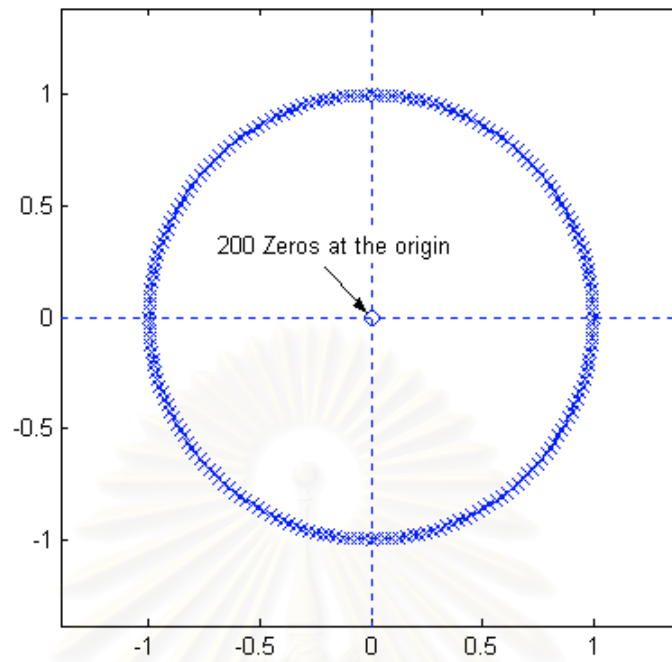
T_s คือคาบเวลาการสุ่มสัญญาณ

ในงานวิจัยนี้เราได้เลือกความถี่ในการสุ่มสัญญาณที่ 10 kHz และคาบเวลาของสัญญาณกระแสคือ 0.02 วินาที ดังนั้น N จึงเท่ากับ 200

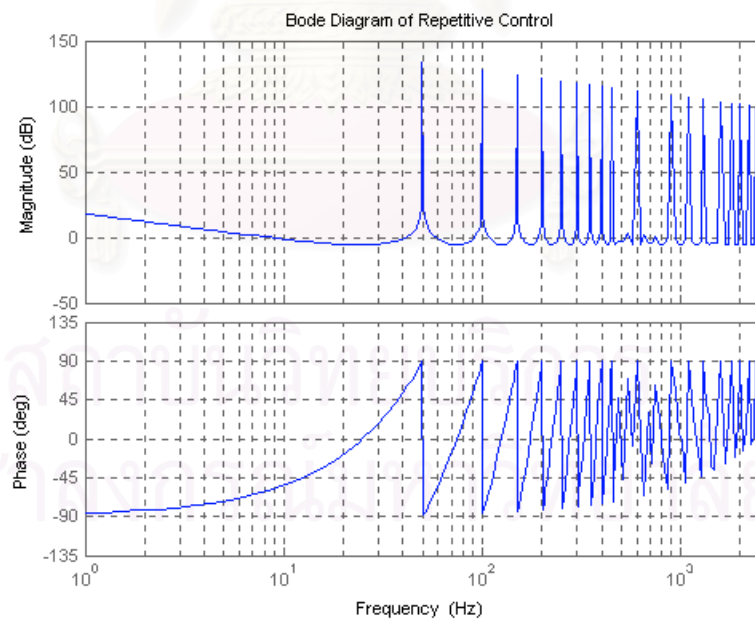
จากรูปที่ 5.3 สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายของตัวควบคุมแบบทำซ้ำได้ดังสมการที่ (5.2)

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{1}{1-z^{-N}} = \frac{z^N}{z^N-1} \quad (5.2)$$

สมการที่ (5.2) สามารถนำมาพล็อตตำแหน่งขั้วและศูนย์ได้ดังรูปที่ 5.4 และหาผลตอบเชิงความถี่ได้ดังรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบทำซ้ำมีศูนย์ทุกตัวอยู่ที่จุดกำเนิดและมีขั้วกระจายอยู่บนวงกลมหนึ่งหน่วย ณ ตำแหน่งฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ของสัญญาณรายคาบทำให้อัตราขยายที่ ณ ตำแหน่งความถี่ฮาร์มอนิกต่าง ๆ เหล่านั้นมีค่าสูงมากแต่อัตราขยายจะมีค่าต่ำ ณ ตำแหน่งที่ไม่ใช่ความถี่ฮาร์มอนิก

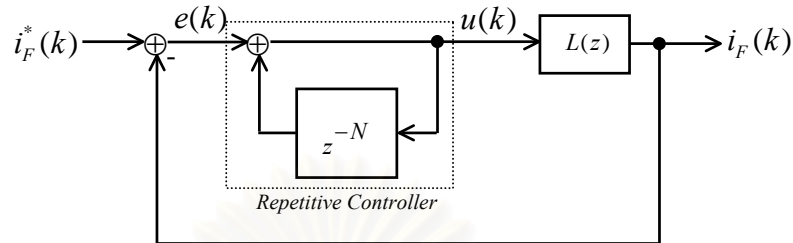


รูปที่ 5.4 ตำแหน่งขั้วและศูนย์ของตัวควบคุมแบบทำซ้ำ



รูปที่ 5.5 ผลตอบเชิงความถี่ของตัวควบคุมแบบทำซ้ำ

เมื่อเรานำตัวควบคุมแบบทำซ้ำมาใช้ในการควบคุมกระแสสามารถเขียนเป็นแผนภาพของระบบในเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำ

โดยที่ $L(z)$ คือฟังก์ชันโอนย้ายของอิมพีแดนซ์เชื่อมต่อโยงระหว่างวงจรกรองแอกทีฟกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$i_F^*(k)$ คือกระแสขดเซยที่คำนวณได้และเป็นสัญญาณคำสั่งสำหรับวงรอบควบคุมกระแส

$i_F(k)$ คือกระแสขดเซยที่สร้างได้จริง

$e(k)$ คือความผิดพลาดของกระแส

$u(k)$ คือเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบทำซ้ำ

จากรูปที่ 5.6 สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายของระบบจากสัญญาณกระแสคำสั่งไปยังค่าความผิดพลาดของกระแสได้ดังสมการที่ (5.3)

$$H(z) = \frac{E(z)}{i_F^*(z)} = \frac{1}{1 + \frac{L(z)}{1 - z^{-N}}} \quad (5.3)$$

โดยที่ $E(z)$ และ $i_F^*(z)$ คือผลการแปลง Z ของ $e(k)$ และ $i_F^*(k)$ ตามลำดับ สัญญาณกระแสคำสั่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูริเยร์ได้ดังสมการที่ (5.4)

$$i_F^*(k) = \sum_{h=0}^{N-1} I_h \cdot e^{j \frac{2\pi hk}{N}} \quad (5.4)$$

โดยที่ I_h คือสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูริเยร์ เราสามารถพิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ของสมการที่ (5.5) ที่ความถี่ ω ใดๆ ได้โดยการแทนค่า z ตามสมการที่ (5.5)

$$H(j\omega) = H(z) \Big|_{z = e^{j\omega T_s}} \quad (5.5)$$

โดยที่ T_s คือคาบเวลาในการสุ่มสัญญาณ

ในกรณีที่ฟังก์ชันโอนย้าย $L(z)$ เสถียร จะพบว่า

$$|H(j\omega)| = 0 \quad \text{ที่ } \omega = \frac{2\pi h}{NT_s} \quad \text{โดย } h = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5.6)$$

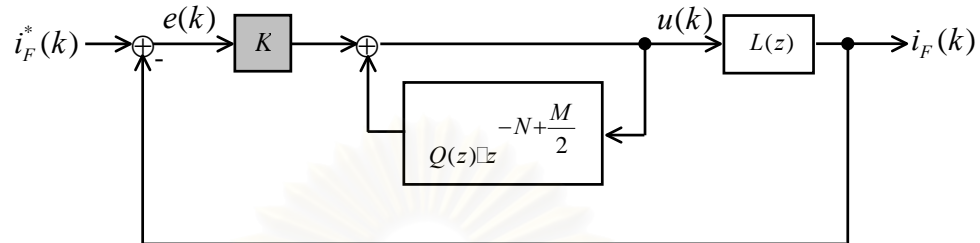
กล่าวคือ $H(j\omega)$ มีค่าเป็นศูนย์ที่ทุก ๆ ความถี่ฮาร์มอนิก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดของกระแสที่เกิดจากสัญญาณกระแสคำสั่งที่เป็นรายคาบจะถูกตัวควบคุมแบบทำซ้ำกำจัดให้หมดไปหรือกล่าวได้ว่าระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำสามารถควบคุมให้วงจรรองแอกที่ฟสร้างกระแสจริงตามรอย (tracking) กระแสคำสั่งได้อย่างสมบูรณ์

5.3 ตัวควบคุมแบบทำซ้ำที่มีการปรับแต่ง

เราทราบว่าระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำดังรูปที่ 5.6 มีอัตราขยายสูงที่ ณ ตำแหน่งของความถี่ฮาร์มอนิกตั้งแต่ความถี่ศูนย์ไปจนถึงครึ่งหนึ่งของความถี่การสุ่มตัวอย่าง ซึ่งอัตราขยายที่มีค่ามากที่ความถี่สูงเช่นนี้อาจทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ และตัวควบคุมแบบทำซ้ำยังเกิดปรากฏการณ์ intersample response เมื่อองค์ประกอบฮาร์มอนิกในสัญญาณกระแสมีความถี่เข้าใกล้ครึ่งหนึ่งของความถี่การสุ่มตัวอย่าง ดังนั้นเราจึงต้องปรับปรุงตัวควบคุมแบบทำซ้ำเสียใหม่ให้ตอบสนองต่อความถี่ที่จำกัดเพียงในอันดับของฮาร์มอนิกที่เราต้องการเท่านั้นโดยการใส่ตัวกรองผ่านต่ำ $Q(z)$ เข้าไปที่ส่วนป้อนกลับของตัวควบคุมแบบทำซ้ำ

เนื่องจากสัญญาณกระแสที่ต้องการควบคุมเป็นสัญญาณไซน์หลายความถี่ปะปนกันและมีช่วงของความถี่ที่กว้าง วงจรรองผ่านต่ำที่ใช้จึงเลือกเป็นแบบ *Linear Phase FIR* ที่มีย่านผ่านต่ำสอดคล้องกับช่วงความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัด เพื่อให้สัญญาณฮาร์มอนิกในแต่ละความถี่ที่แตกต่างกันมีการล่าช้าทางเวลาด้วยเวลาที่เท่ากัน สัญญาณเข้าและสัญญาณออกจากวงจรรองผ่านต่ำจึงยังคงเป็นสัญญาณรูปร่างเดิม และเราจะชดเชยการล่าช้าทางเวลาโดยการลดอันดับของตัวควบคุมแบบทำซ้ำจากเดิมให้เป็น $z^{-N + \frac{M}{2}}$ โดยที่ M คืออันดับของตัวกรองผ่านต่ำ ทำให้เรายังคงรักษาคุณสมบัติของตัวควบคุมแบบทำซ้ำได้ในย่านความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัด แต่การใส่ตัวกรองผ่านต่ำก็ได้ทำให้อัตราขยายของตัวควบคุมแบบทำซ้ำในช่วง

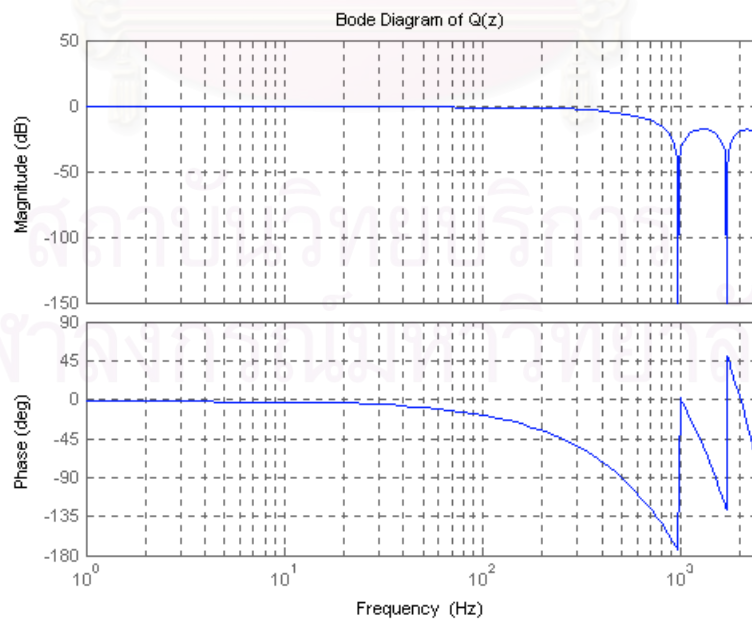
ฮาร์มอนิกที่เราต้องการกำจัดนั้นลดลงไปด้วย เราจึงใส่อัตราขยาย K เพิ่มเติมเข้าไปเพื่อให้ตัวควบคุมยังคงตอบสนองต่อสัญญาณค่าผิดพลาดของกระแสได้ดี จึงได้ระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำแบบใหม่ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำที่มีการปรับแต่ง

เนื่องจากอันดับของสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกหลัก ๆ ในระบบที่ต้องการควบคุมคืออันดับต่ำกว่า 19 ดังนั้นเราจึงต้องออกแบบ $Q(z)$ ให้มีย่านผ่านต่ำเป็น 1 kHz และเลือกใช้ตัวกรองอันดับ 10 ($M=10$) ตัวกรองผ่านต่ำที่ออกแบบแสดงได้ดังสมการที่ (5.7) พร้อมทั้งแสดงผลตอบเชิงความถี่ได้ดังรูปที่ 5.8

$$Q(z) = 0.0869 + 0.0589z^{-1} + 0.0725z^{-2} + 0.0835z^{-3} + 0.0906z^{-4} + 0.0931z^{-5} + 0.0906z^{-6} + 0.0835z^{-7} + 0.0725z^{-8} + 0.0589z^{-9} + 0.0869z^{-10} \quad (5.7)$$

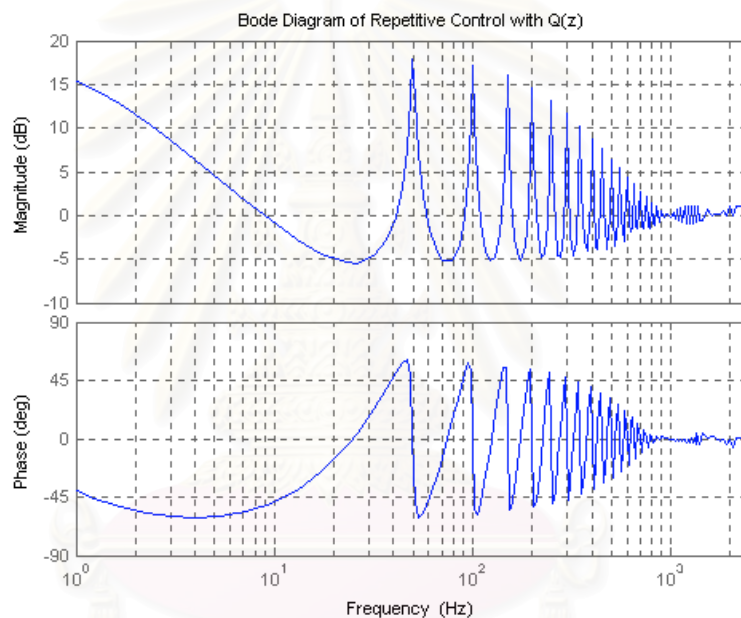


รูปที่ 5.8 ผลตอบเชิงความถี่ของตัวกรองผ่านต่ำ $Q(z)$

จากรูปที่ 5.7 เราสามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายของตัวควบคุมแบบทำซ้ำที่มีการปรับแต่งได้ดังสมการที่ (5.8)

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K}{1-Q(z)z^{-N+\frac{M}{2}}} \quad (5.8)$$

จากสมการที่ (5.8) เมื่อเราแทนค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองผ่านต่ำตามสมการที่ (5.7) และให้อัตราขยาย K เท่ากับ 1 เราสามารถหาผลตอบเชิงความถี่ได้ดังรูปที่ 5.9 จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบทำซ้ำที่มีการปรับแต่งโดยใส่ตัวกรองผ่านต่ำเพิ่มเติมเข้าไปนี้มีอัตราขยายที่ลดลงมากในย่านของฮาร์มอนิกความถี่สูง



รูปที่ 5.9 ผลตอบเชิงความถี่ของตัวควบคุมแบบทำซ้ำเมื่อใส่ตัวกรองผ่านต่ำ $Q(z)$

5.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพ

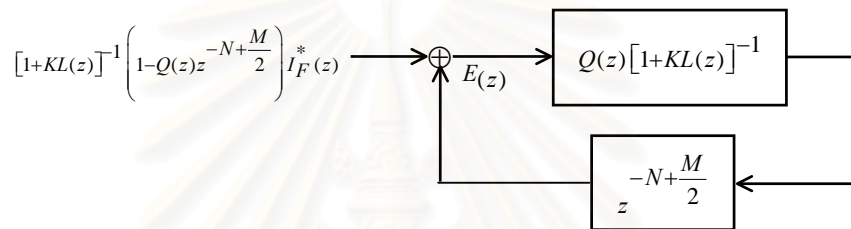
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำในรูปที่ 5.7 เราจะพิจารณาสัญญาณความผิดพลาดของกระแสซึ่งเป็นผลต่างระหว่างกระแสคำสั่งกับกระแสที่วงจรกรองแยกที่ฟีดแบ็กได้จริง และสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (5.9)

$$E(z) = I_F^*(z) - I_F(z) = I_F^*(z) - \frac{KE(z)L(z)}{1-Q(z)z^{-N+\frac{M}{2}}} \quad (5.9)$$

จัดรูปสมการที่ (5.9) โดยเปลี่ยนพจน์ของตัวกรองผ่านตัวทำให้กลายเป็นตัวเศษเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ เราจะได้ความสัมพันธ์ของสัญญาณความผิดพลาดของกระแสใหม่ดังสมการที่ (5.10)

$$E(z) = [1+KL(z)]^{-1} \left(1-Q(z)z^{-N+\frac{M}{2}} \right) I_F^*(z) + Q(z)z^{-N+\frac{M}{2}} [1+KL(z)]^{-1} E(z) \quad (5.10)$$

นำสมการที่ (5.10) มาเขียนเป็นแผนภาพของระบบควบคุมแบบวงรอบปิดได้ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ระบบควบคุมสมมูลของระบบควบคุมแบบทำซ้ำในรูปที่ 5.7

การวิเคราะห์เสถียรภาพของการควบคุมแบบทำซ้ำในรูปที่ 5.10 สามารถทำได้โดยอาศัยทฤษฎีอัตราขยายค่าเล็ก (Small Gain Theorem) โดยจะได้เงื่อนไขเพียงพอสำหรับความมีเสถียรภาพเป็นดังนี้คือ

1. $[1+KL(z)]^{-1}$ มีเสถียรภาพและ (5.11)

2. $\left| Q(z)(1+KL(z))^{-1} \right| < 1$ สำหรับทุกค่าของ ω หรือ

$$\left| Q(z) \right| < \left| 1+KL(z) \right| \text{ สำหรับทุกค่าของ } \omega \quad (5.12)$$

โดยที่ $z = e^{j\omega T_s}$, T_s คือคาบเวลาในการสุ่มสัญญาณ

ฟังก์ชันโอนย้ายของตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าตามสมการที่ (5.13) และแปลงไปเป็นฟังก์ชันโอนย้ายในเชิงเวลาไม่ต่อเนื่องโดยใช้ forward difference ได้ดังสมการที่ (5.14)

$$L(s) = \frac{1}{Ls + R} \quad (5.13)$$

โดยที่ L และ R คือค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงตามลำดับ

$$L(z) = L(s) \Big|_{s = \frac{z-1}{T_s}} = \frac{T_s/L}{z + \frac{RT_s - L}{L}} \quad (5.14)$$

ดังนั้น

$$[1 + KL(z)]^{-1} = \frac{z + \frac{RT_s - L}{L}}{z + \frac{RT_s + KT_s - L}{L}} \quad (5.15)$$

จากสมการที่ (5.15) เราสามารถพิจารณาเสถียรภาพของการควบคุมกระแสตามสมการที่ (5.11) ในกรณีที่ $K = 1$ ได้ว่า $[1 + KL(z)]^{-1}$ มีเสถียรภาพจริง โดยพิจารณาที่ตำแหน่งขั้วซึ่งยังคงอยู่ในวงกลม 1 หน่วยดังสมการที่ (5.16)

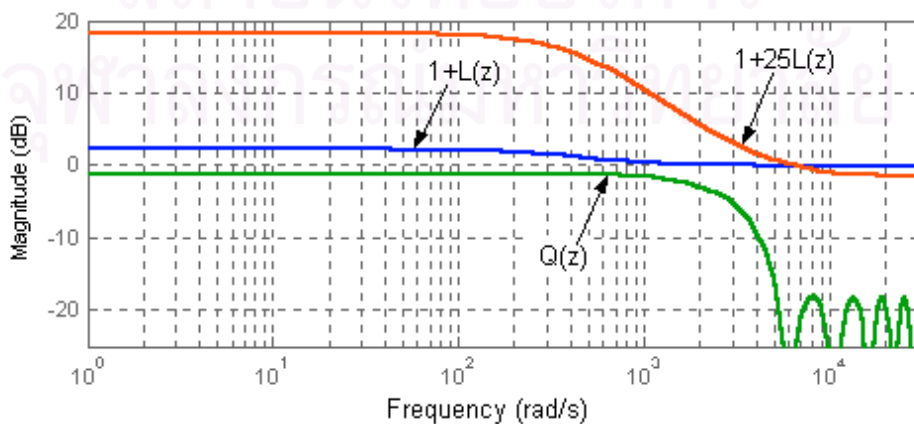
$$\frac{RT_s + KT_s - L}{L} \Big|_{K=1} < 1 \quad (5.16)$$

จากสมการที่ (5.16) เราพบว่าถ้าอัตราขยาย K เพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งก็จะทำให้ $[1 + KL(z)]^{-1}$ ไม่มีเสถียรภาพ แต่เราสามารถหาค่าสูงสุดของ K ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพได้ดังสมการที่ (5.17)

$$K \leq \frac{2L - RT_s}{T_s} \quad (5.17)$$

แทนค่า $L = 8 \text{ mH}$, $R = 3.5 \ \Omega$ และ $T_s = 1 \times 10^{-4}$ จะได้ $K \leq 156$

เนื่องจากวงจรรองผ่านต่ำที่ออกแบบมีค่าเป็นดังสมการที่ (5.7) เราจึงสามารถพิจารณาเสถียรภาพของการควบคุมกระแสตามสมการที่ (5.12) ได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 อัตราขยายของ $Q(z)$ และ $1 + KL(z)$

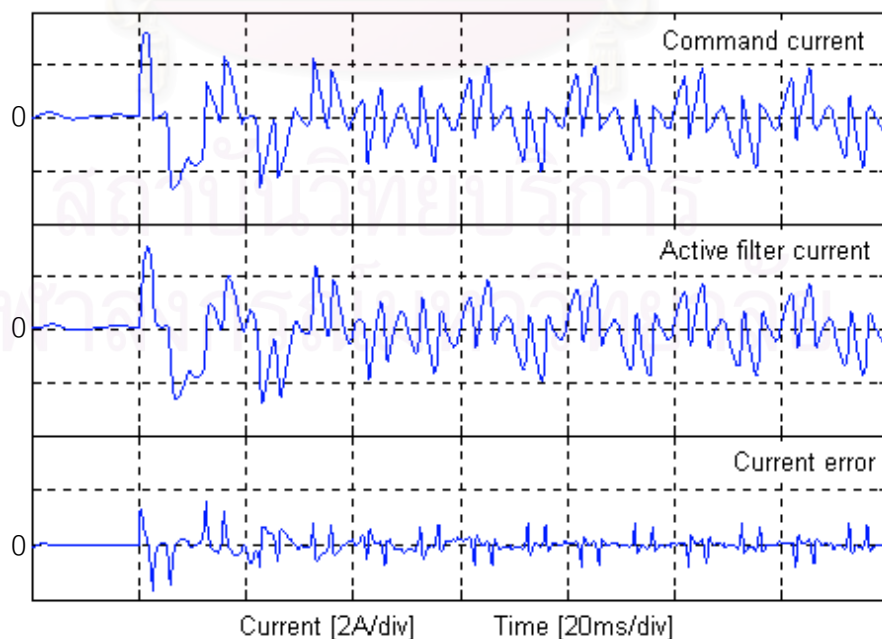
จากรูปที่ 5.11 อัตรายายของ $Q(z)$ ที่เราออกแบบมีค่าน้อยกว่าอัตรายายของ $1+KL(z)$ ในทุกความถี่ ดังนั้นวงจรกรองผ่านต่ำที่ออกแบบจึงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

5.5 ผลการทดสอบการทำงาน

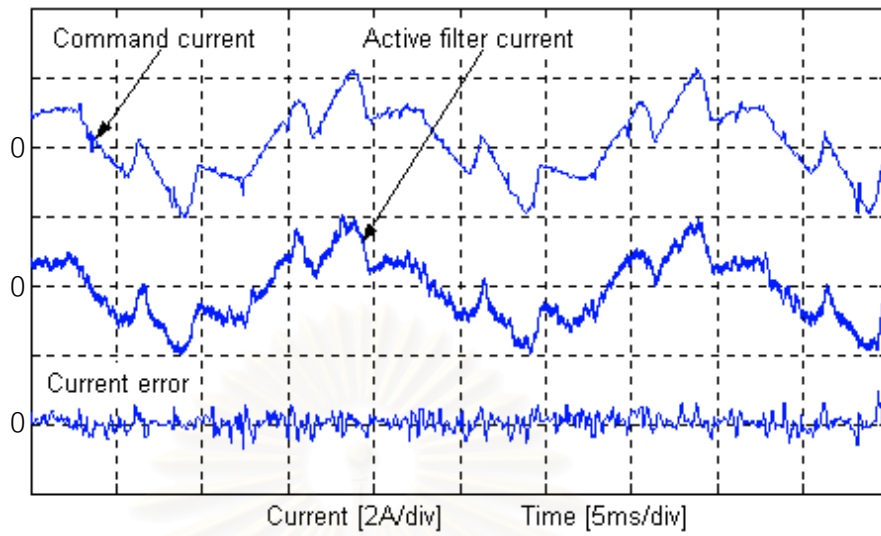
เราจะทดสอบสมรรถนะในการทำงานของระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทดสอบด้วยระบบจริงโดยใช้อัตรายาย $K = 25 \text{ V/A}$

รูปที่ 5.12 แสดงผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำโดยใช้กระแสคำสั่งแบบชดเชยทุกองค์ประกอบกระแสซึ่งคำนวณมาจากกระแสของโหลดไม่เชิงเส้น จะเห็นว่าเกิดค่าผิดพลาดของกระแสอยู่พอสมควรในคาบแรกที่เริ่มสั่งจ่ายกระแสตามกระแสคำสั่งที่เปลี่ยนไป แต่ในคาบต่อ ๆ มา ตัวควบคุมแบบทำซ้ำก็ควบคุมให้ค่าผิดพลาดของกระแสลดลงจนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวในที่สุด

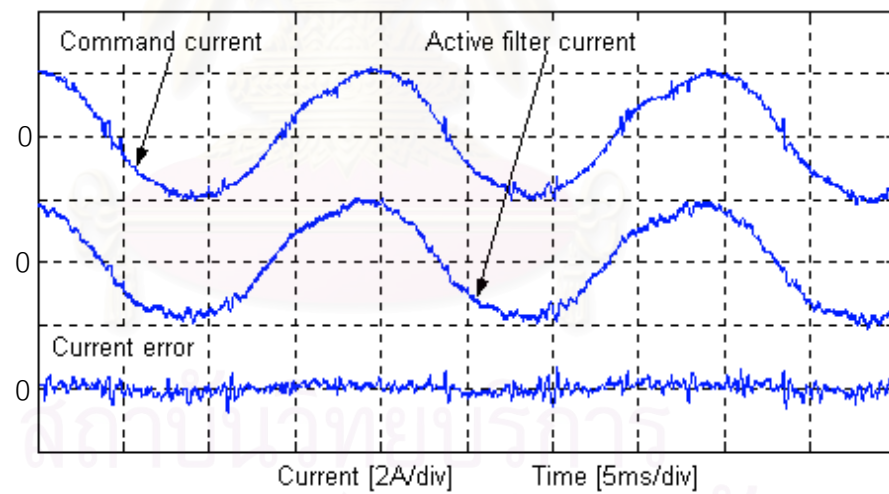
รูปที่ 5.13 และ 5.14 เป็นผลการทำงานของระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำในสภาวะอยู่ตัวที่ได้จากการทดสอบระบบจริง จะเห็นว่าค่าผิดพลาดของกระแสมีค่าต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่ดีของระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 5.12 ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำ



รูปที่ 5.13 ผลการทดลองจริงของระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำกรณี
สั่งงานด้วยกระแสคำสั่งชดเชยทุกองค์ประกอบกระแส



รูปที่ 5.14 ผลการทดลองจริงของระบบควบคุมกระแสแบบทำซ้ำ
กรณีสั่งงานด้วยกระแสคำสั่งชดเชยโหลดไม่สมดุล

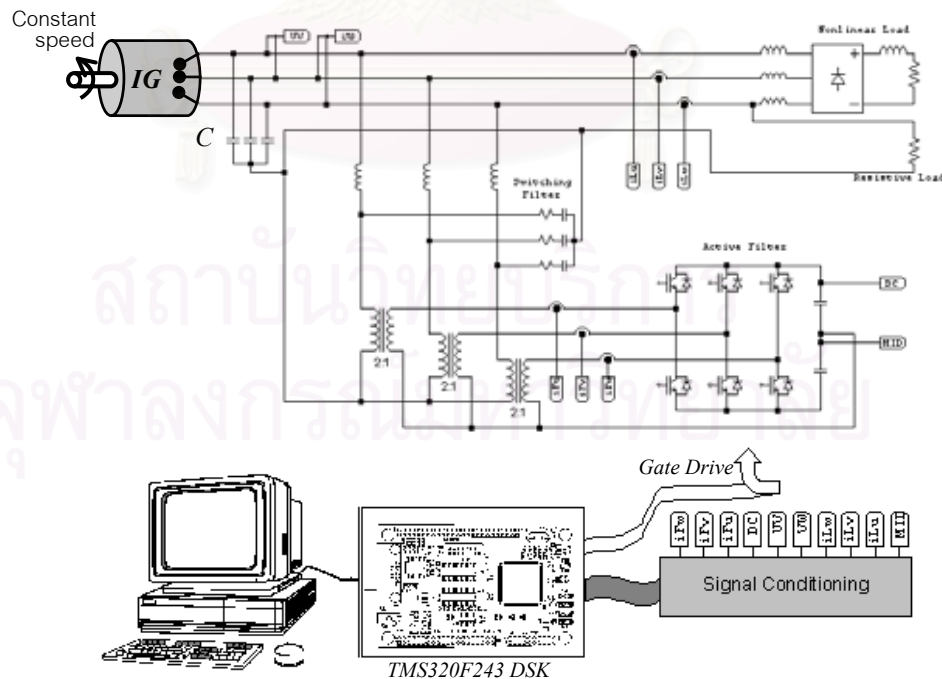
บทที่ 6

การสร้างระบบจริง

บทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างทางด้านฮาร์ดแวร์ทั้งในวงจรรภาคกำลังและวงจรรภาคควบคุม รวมทั้งกล่าวถึงโครงสร้างในส่วนซอฟต์แวร์ของระบบปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองด้วยวงจรรองแอกทีฟ

6.1 ฮาร์ดแวร์ของระบบ

โครงสร้างโดยรวมของฮาร์ดแวร์ของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 ประกอบด้วยวงจรรองแอกทีฟแบบขนาน 3 เฟส 4 สาย ต่อขนานเข้ากับระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองโดยผ่านหม้อแปลงซึ่งมีอัตราส่วนแรงดันด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อแรงดันด้านวงจรรองแอกทีฟเป็น 2:1 ทั้งนี้เพื่อให้แรงดันที่สวิตช์กำลังของวงจรรองแอกทีฟได้รับมีค่าลดลงและกระแสที่ไหลเข้า-ออกจากหม้อแปลงด้านแรงดันต่ำจะมีขนาดสูงกว่าด้านแรงดันสูง 2 เท่า ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสและแรงดันเหมาะกับอุปกรณ์สวิตช์กำลังที่มีอยู่ในท้องตลาดและขนาดกระแสที่สูงขึ้นก็ง่ายต่อการควบคุม



รูปที่ 6.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของวงจรรองแอกทีฟซึ่งต่อขนานกับระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง

ส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีพิกัดและค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 6.1 โดยมีตัวเก็บประจุขนาด $22\mu\text{F}$ ต่อเฟสต่ออยู่ที่ขั้วต่อทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุกระตุ้น ซึ่งตัวเก็บประจุนี้มีลักษณะการต่อแบบ Y ทั้งนี้เพื่อให้ระบบไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นแบบ 3 เฟส 4 สายโดยใช้จุดร่วมของตัวเก็บประจุเป็นจุดต่อของสายนิวทรัล ต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในงานวิจัยนี้คือมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3.7 kW ซึ่งถูกควบคุมให้หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ที่ 1564 rpm โดยใช้ชุดควบคุมแบบเวกเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน

ตารางที่ 6.1 พิกัดและค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในงานวิจัย

1.1 kW, 2.9 A, 400 V, 50 Hz, 1410 rpm	
$R_s = 8.39 [\Omega]$	$R_r = 6.10 [\Omega]$
$L_{ls} = 0.0222 [\text{H}]$	$L_{lr} = 0.0222 [\text{H}]$

วงจรรองแอกทีฟประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือส่วนของวงจรรักษากำลังและส่วนวงจรรักษาควบคุม ส่วนของวงจรรักษากำลังประกอบด้วยวงจรรีเลย์อินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายแรงดันต่อเข้ากับหม้อแปลงและอาศัยความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงเป็นค่าความเหนี่ยวนำเชื่อมโยงกับระบบ ถัดจากหม้อแปลงคือส่วนของวงจรรองพาสซีฟที่ทำหน้าที่กรองความถี่การสวิตช์เพื่อลดระดับของกระแสที่จ่ายเข้าสู่ระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ภาคควบคุมของวงจรรองแอกทีฟจะใช้บอร์ดตัวประมวลผลเชิงดิจิทัล TMS320 F243 ขนาด 16 บิต ความถี่สัญญาณนาฬิกา 20 MHz เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบ โดยเราจะพัฒนาซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์และถ่ายโอนข้อมูลไปยังบอร์ดตัวประมวลผลเชิงดิจิทัลผ่านทางพอร์ตสื่อสารอนุกรม (RS-232)

การตรวจจับสัญญาณต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการทำงานของวงจรรองแอกทีฟประกอบด้วย การตรวจจับสัญญาณกระแสของวงจรรองแอกทีฟ 3 เฟส, สัญญาณกระแสโหลด 3 เฟส, สัญญาณแรงดันบัสไฟตรง, สัญญาณแรงดันกึ่งกลางบัสไฟตรง, สัญญาณแรงดันระหว่างสาย ($V_{\text{line-line}}$) เฟส U-V และ เฟส V-W ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังที่แสดงในรูปที่ 6.1 รวมสัญญาณที่ต้องตรวจจับทั้งหมด 10 จุด สัญญาณทั้งหมดจะผ่านเข้าสู่วงจรปรับแต่งสัญญาณให้เหมาะสมและจำกัดขนาดก่อนส่งให้กับตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายในตัวประมวลผลเชิงดิจิทัลต่อไป การตรวจจับกระแสทั้ง 6 จุดใช้ตัวตรวจจับกระแสแบบ Hall effect ซึ่งแยกโดดทาง

ไฟฟ้าโดยตัวอุปกรณ์เองอยู่แล้วจึงไม่ต้องใช้วงจรแยกโดดเพิ่มเติม การตรวจจับแรงดันจากบัสไฟตรงทั้งสองส่วนจะทำโดยการทอนระดับแรงดันให้มีค่าระดับแรงดันที่ต่ำลงด้วยความต้านทานแบ่งแรงดัน จากนั้นทำการแยกโดดทางไฟฟ้าด้วย analog opto isolator

ในการวัดสัญญาณแรงดันเพื่อใช้ในการคำนวณหากระแสชดเชยและการควบคุมกระแส เราจะวัดแรงดันระหว่างสาย ($V_{\text{line-line}}$) จำนวน 2 จุดคือ แรงดันระหว่างเฟส U-V และแรงดันระหว่างเฟส V-W โดยวัดแรงดันผ่านหม้อแปลงลดระดับแรงดัน ซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันให้ต่ำลงแล้วยังเป็นตัวแยกโดดทางไฟฟ้าระหว่างวงจรมาคำลึงกับวงจรมาคำควบคุมด้วย

6.2 ซอฟต์แวร์ของระบบ

สัญญาณกระแสและแรงดันที่ตรวจจับมาทั้งหมดหลังจากผ่านวงจรปรับแต่งสัญญาณและจำกัดขนาดแล้วก็จะถูกอ่านเข้าสู่ตัวประมวลผลเชิงดิจิทัลเพื่อแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลสำหรับการคำนวณต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.2 ซอฟต์แวร์ทั้งหมดสามารถเขียนแสดงเป็น PDL (Program Development Language) ได้ดังต่อไปนี้

IMPROVEMENT OF VOLTAGE QUALITY OF A SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR USING AN ACTIVE FILTER

MODULE : MAIN PROGRAM

Initialize

Initialize all variables

Initialize all timers

Get offset value of measured signals

Enable timer interrupts

Loop here and wait for interrupt only

Timer2 Underflow Interrupt Service Routine

Get active filter currents (i_{Fu}, i_{Fv}, i_{Fw})

Get dc bus voltage (U_{dc})

Get line-to-line voltages (u_{UV}, u_{VW})

Get load currents (i_{Lu}, i_{Lv}, i_{Lw})

Get midpoint bus voltage (U_{mp})

Phase Locked Loop

Convert line-to-line voltage to voltage space vector ($u_{s\alpha}, u_{s\beta}$) and phase voltage (u_{su}, u_{sv}, u_{sw})

Frequency (ω) tracking by PI controller

Integrate ω to generate angle of voltage space vector (θ)

Generate sinusoidal reference signals

Current component detection

Convert (i_{Lu}, i_{Lv}, i_{Lw}) to current space vector ($i_{L\alpha}, i_{L\beta}, i_{L0}$), then convert space vector current to d-q axis rotating at fundamental frequency (positive sequence) (i_{Ld}, i_{Lq})

Moving average i_{Ld} to generate i_{1d}

Subtract i_{Ld} by i_{1d} to generate \tilde{i}_{Ld}

Voltage control

Calculate amplitude of phase voltage (u_{su}, u_{sv}, u_{sw})

Calculate amplitude error

Calculate PI output (i_{uq})

DC bus voltage control

Calculate dc bus voltage error

Calculate PI output (i_{dc})

Midpoint bus voltage control

Calculate midpoint bus voltage error

Calculate PI output (i_{mp})

Calculate current command on d-q axis rotating at fundamental frequency (positive sequence) (i_{hd}, i_{hq})

$$i_{Fd} = \tilde{i}_{Ld} - i_{dc}$$

$$i_{Fq} = i_{Lq} - i_{uq} - Ki_{1d}$$

Convert i_{Fd}, i_{Fq} to space vector on α - β axis ($i_{h\alpha}, i_{h\beta}$)

Calculate current command on zero sequence axis (i_{F0})

$$i_{F0} = i_{L0} - i_{mp}$$

Convert space vector current command (i_{Fd}, i_{Fq}, i_{F0}) to (i_{Fu}, i_{Fv}, i_{Fw})

Repetitive controller

Soft start of inverter

Calculate current output error

Calculate voltage command by repetitive algorithm

Calculate timing of switching patterns

Update compare registers

Next sampling calculation

Calculate count of next sampling period

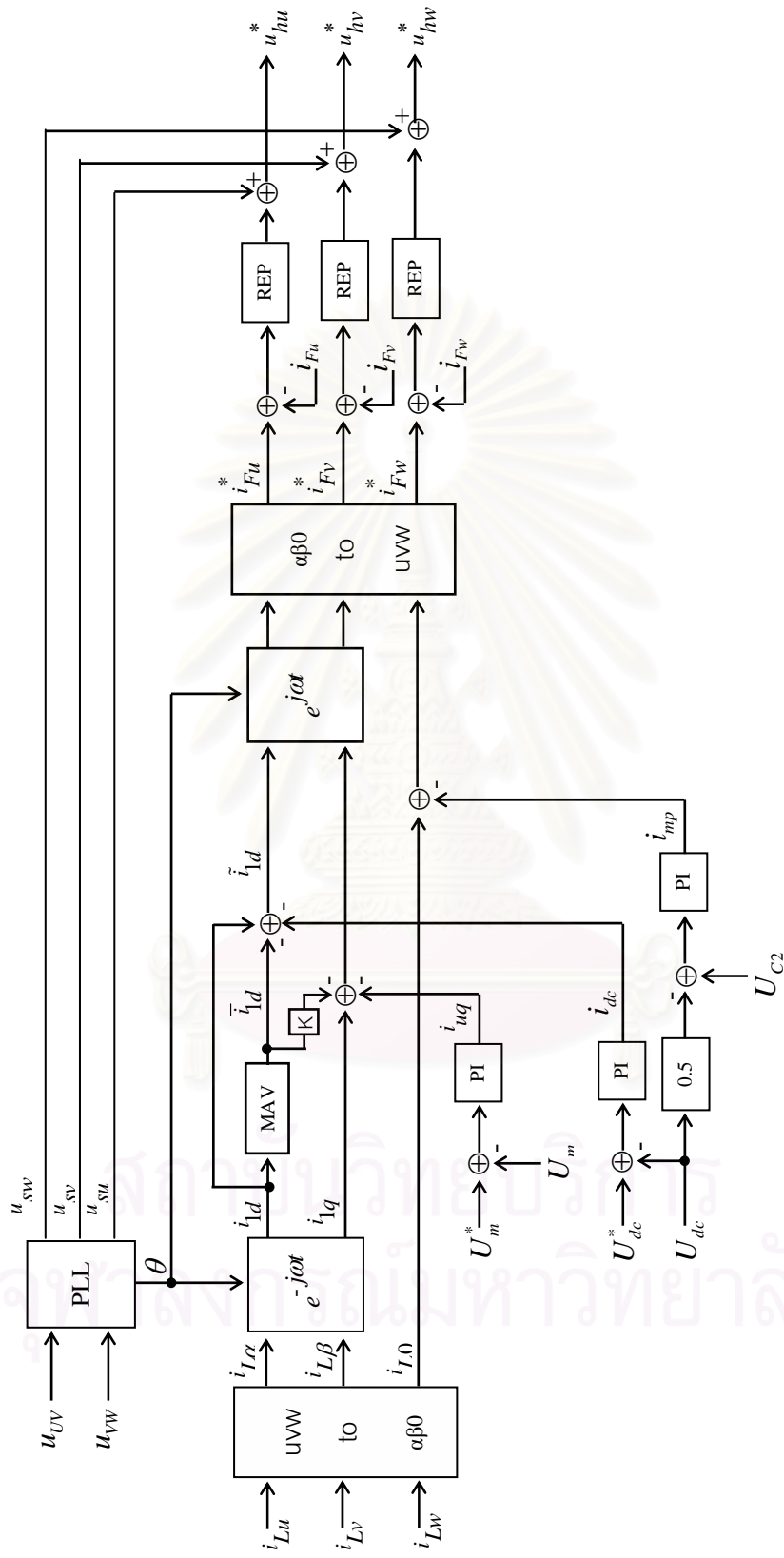
Calculate integration time of next sampling period

Update period registers

Return

END MAIN PROGRAM

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.2 แผนภาพการคำนวณในส่วนซอฟต์แวร์ของวงจรองแอกทีฟ

บทที่ 7

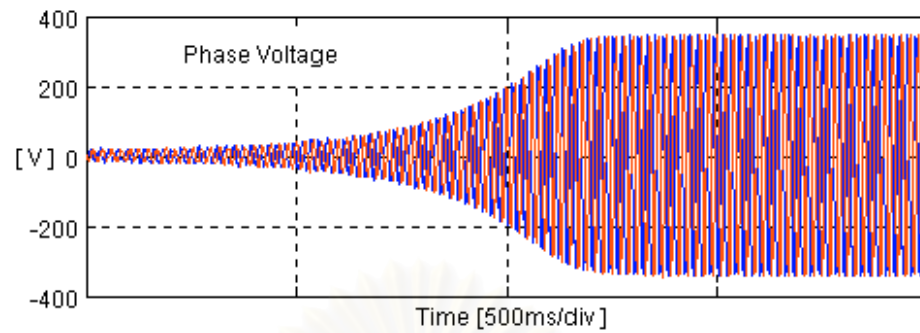
ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

เราจะทดสอบการทำงานของระบบโดยอาศัยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นตามที่กล่าวในบทที่ 6 โดยจะแบ่งการทดสอบตามเงื่อนไขโหลดแบบต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกเป็น 3 ประเภทคือ โหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ โหลดไม่เชิงเส้น และ โหลดไม่สมดุล

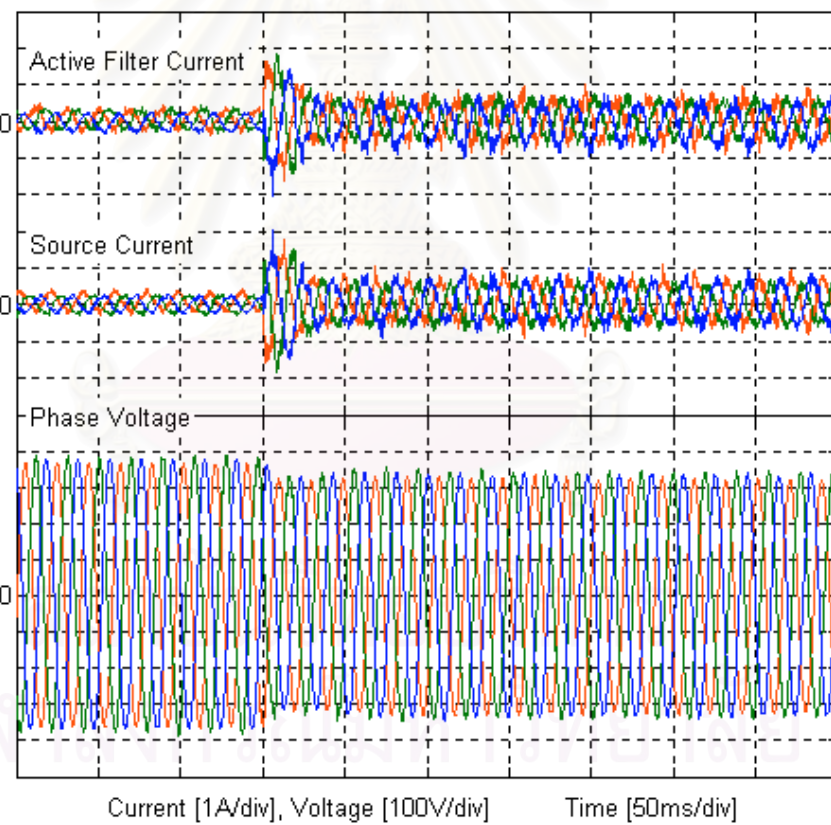
7.1 การทดสอบในสภาวะไร้โหลด

รูปที่ 7.1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของการสร้างแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง หลังจากที่เราได้จ่ายแรงบิดทางกลทำให้โรเตอร์หมุนที่ความเร็วคงที่ประมาณ 1564 rpm แรงดันออกที่ขั้วต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะเริ่มเพิ่มขนาดขึ้นจาก 0 V แล้วเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่ขนาดแรงดันเฟสประมาณ 260 V ซึ่งมากกว่าแรงดันคำสั่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ ค่าที่เราต้องการควบคุม (ประมาณ 220 V) อยู่พอสมควรเนื่องจากเราได้ต่อตัวเก็บประจุให้มีการกระตุ้นเกินอยู่เล็กน้อยเพื่อให้สามารถกำเนิดแรงดันได้ง่ายอีกทั้งการหมุนโรเตอร์ที่ความเร็วสูงกว่า 1500 rpm (เพื่อชดเชยค่าสลลิปที่เพิ่มขึ้นเมื่อจ่ายโหลด) ก็มีผลให้แรงดันออกมีค่าสูงขึ้น

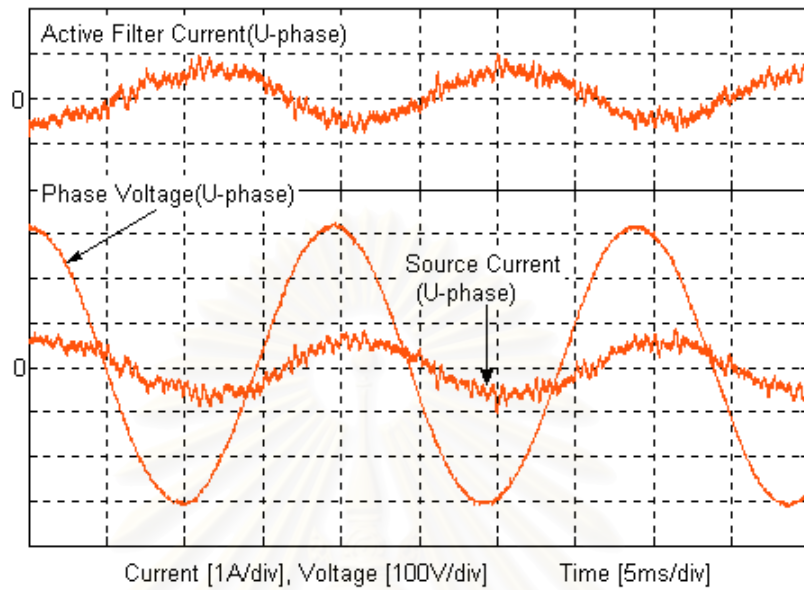
หลังจากขั้นตอนการสร้างแรงดันเสร็จสมบูรณ์เราก็จะให้วงจรรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแส ซึ่งในเงื่อนไขที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในสภาวะไร้โหลดนี้วงจรรองแอกทีฟก็จะเพียงแค่ออกกระแสออกไปเพื่อควบคุมขนาดแรงดันให้ได้ตามค่าแรงดันคำสั่ง ดังแสดงในรูปที่ 7.2 เมื่อวงจรรองแอกทีฟเริ่มทำงานขนาดของแรงดันเฟสก็จะลดลงเข้าสู่ค่าคำสั่ง จากที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นว่าเราได้ต่อตัวเก็บประจุกระตุ้นให้สร้างภาวะการกระตุ้นเกินอยู่เล็กน้อยแรงดันออกจึงมีค่าสูงกว่าแรงดันคำสั่ง ดังนั้นวงจรรองแอกทีฟจึงรับกำลังรีแอกทีฟเข้ามาจากระบบเพื่อจะลดภาวะการกระตุ้นเกินนั้นให้กลับเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 7.3, 7.4 และ 7.5 ซึ่งเปรียบเทียบให้เห็นความต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสของวงจรรองแอกทีฟ จากรูปจะเห็นได้ว่ากระแสจะนำหน้าแรงดันอยู่เกือบ 180 องศา ซึ่งหมายความว่าวงจรรองกำลังรับกำลังทั้งแอกทีฟและรีแอกทีฟเข้ามาจากระบบ



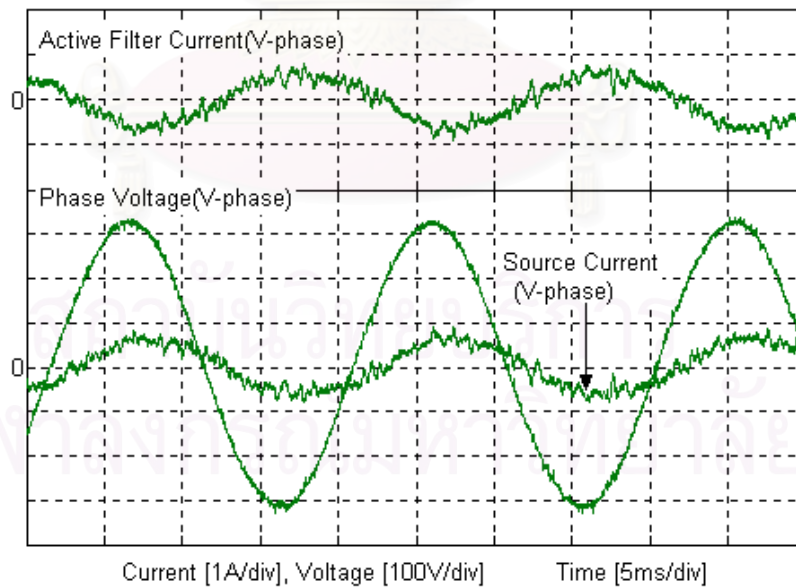
รูปที่ 7.1 การสร้างแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเอง



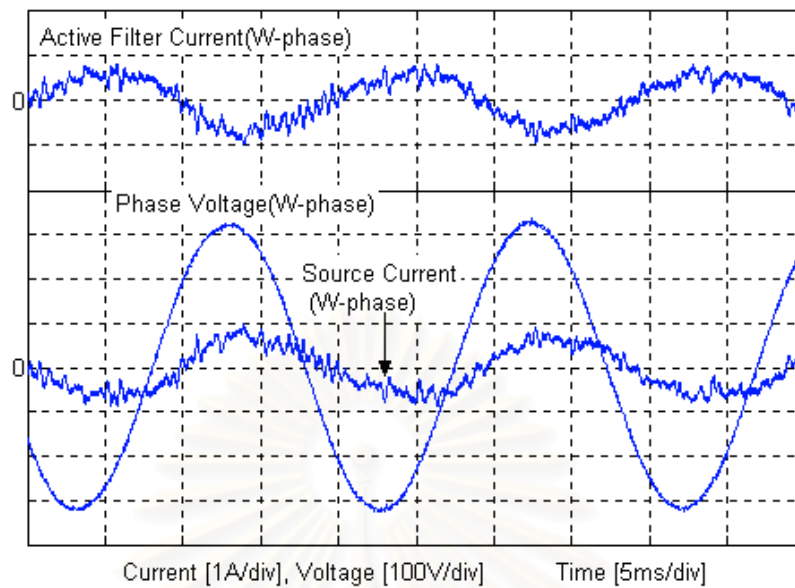
รูปที่ 7.2 สถานะชั่วครู่ของกระแส-แรงดันเมื่อวงจรกรองแอกทีฟเริ่มทำงาน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในสถานะไร้โหลด



รูปที่ 7.3 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (U-phase) ที่สภาวะอยู่ตัวเมื่อ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในสภาวะไร้โหลด



รูปที่ 7.4 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (V-phase) ที่สภาวะอยู่ตัวเมื่อ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในสภาวะไร้โหลด



รูปที่ 7.5 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (W-phase) ที่สภาวะอยู่เมื่อ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ในสภาวะไร้โหลด

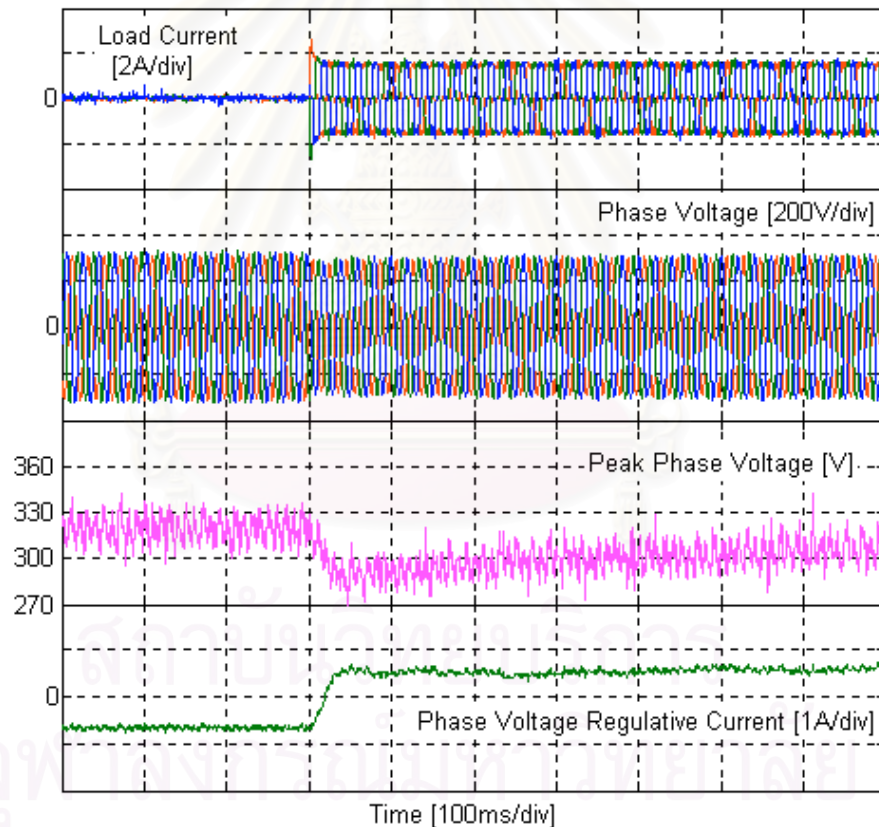
7.2 การควบคุมขนาดแรงดัน

การทดสอบการควบคุมขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระทำโดยการจ่ายโหลดและปลดโหลดแบบขั้น ซึ่งในกรณีแรกโหลดที่ใช้คือวงจรเรียงกระแส 3 เฟสขนาดกำลัง 1kW ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบของการควบคุมแรงดันในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องจ่ายกำลัง แยกทีฟให้กับโหลด กรณีที่สองเป็นการทดสอบการควบคุมขนาดแรงดันในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำซึ่งเราทราบไปแล้วว่าโหลดประเภทนี้สร้างผลกระทบต่อขนาดแรงดันออกอย่างมากหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องจ่ายโหลดประเภทนี้เพียงลำพังโดยไม่มีวงจร กรองแยกทีฟต่ออยู่

7.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดกำลังแยกทีฟ

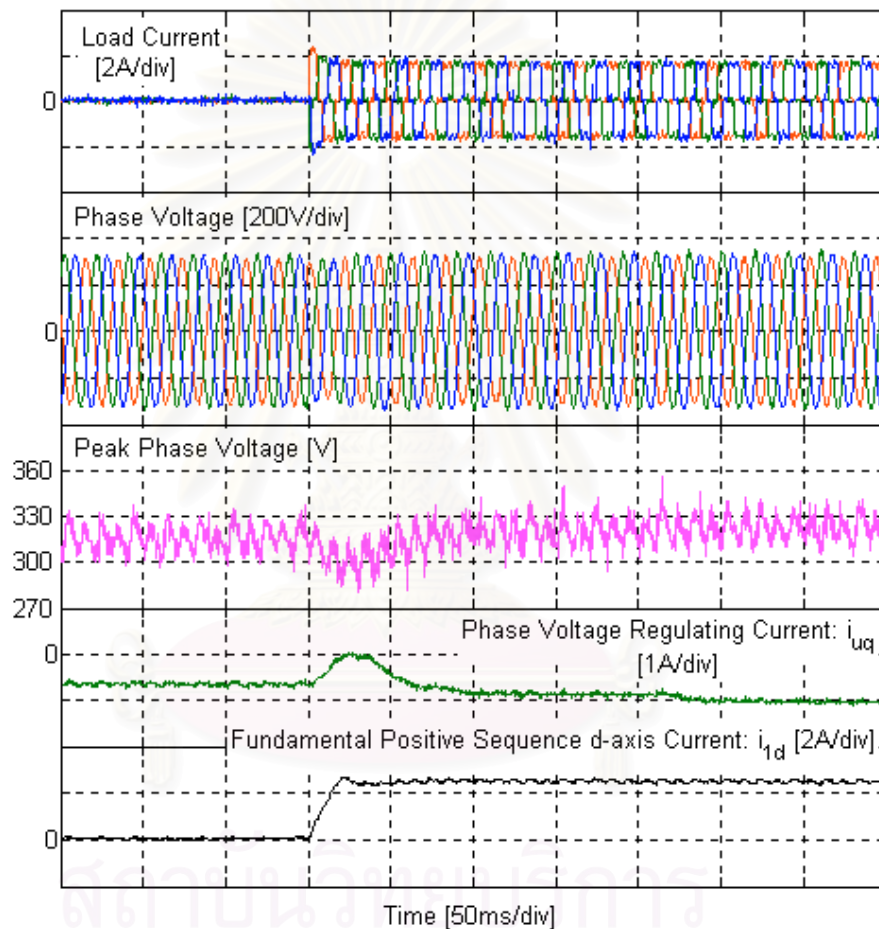
รูปที่ 7.6 แสดงการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อจ่ายโหลดแบบขั้นขนาด 1kW ทันทีที่จ่ายโหลดแรงดันเฟสก็จะลดลงต่ำกว่าค่าแรงดันคำสั่ง วงรอบควบคุมแรงดันจึงมีการปรับตัวทำให้กระแสควบคุมแรงดันมีค่าเป็นบวกเพื่อสั่งงานวงจรกรองแยกทีฟให้จ่ายกำลังรีแอกทีฟออกไป แรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงค่อย ๆ ปรับเพิ่มขนาดขึ้นและใช้เวลาประมาณ 2-3 วินาทีแรงดันถึงจะกลับเข้าสู่ค่าคำสั่ง เนื่องจากในรูปที่ 7.6 นั้นเราอาศัย

เฉพาะวงรอบป้อนกลับควบคุมแรงดันทำหน้าที่ควบคุมแรงดันเพียงลำพัง เมื่อจ่ายโหลดแบบขั้นขนาดใกล้เคียงค่าพิกัดแรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะลดลงไปมากและต้องใช้เวลาพอสมควรแรงดันถึงจะกลับเข้าสู่ค่าคำสั่งได้ ที่เป็นเช่นนั้นเพราะเราได้ออกแบบตัวควบคุมของวงรอบควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยกำหนด rise time ไว้ที่ 0.25 วินาที ซึ่งก็นับว่ายังมีค่าสูงอยู่ แต่ถ้าหากเราจะปรับปรุงวงรอบควบคุมแรงดันโดยการกำหนด rise time ที่ใช้ในการออกแบบให้น้อยลงก็อาจจะมีปัญหาเรื่องเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามถ้าเรานำกระแส i_{1d} นี้มาเป็นสัญญาณป้อนไปหน้าเพื่อช่วยในการทำงานของวงรอบควบคุมแรงดันก็จะทำให้วงรอบควบคุมแรงดันสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้รวดเร็วขึ้น



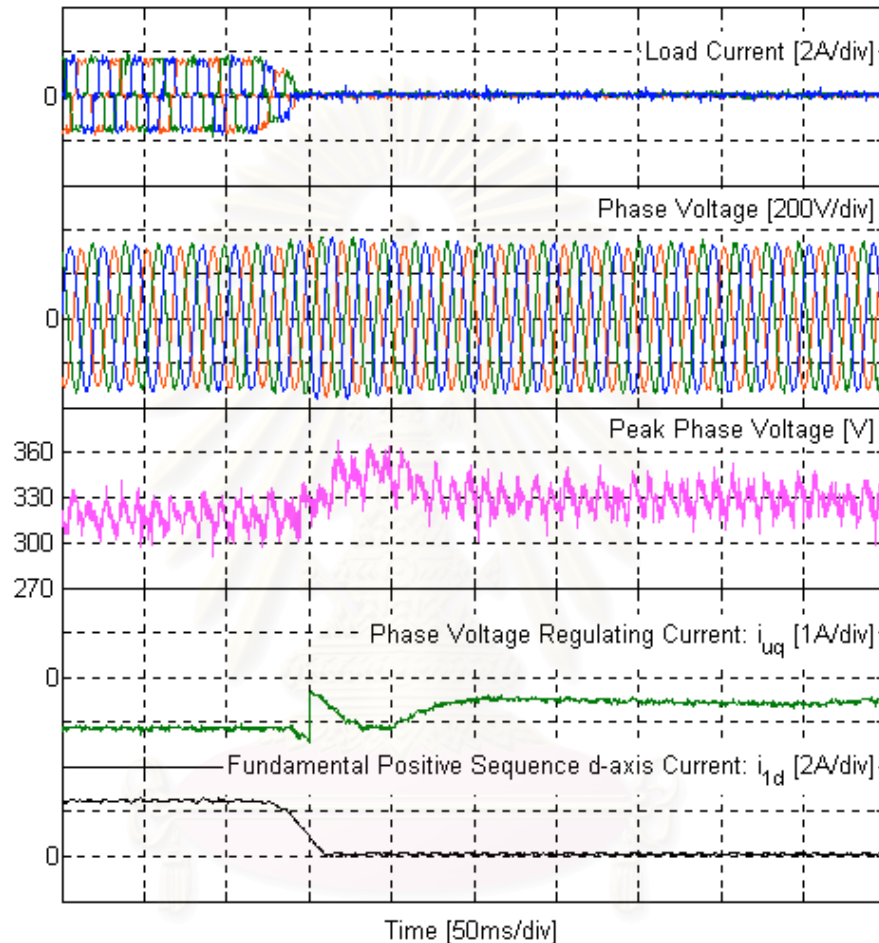
รูปที่ 7.6 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อจ่ายโหลดแบบขั้นขนาดใกล้เคียงค่าพิกัดเมื่อไม่มีการป้อนไปหน้าของกระแส

รูปที่ 7.7 แสดงผลตอบสนองของการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อจ่ายโหลดแบบขั้นโดยอาศัยการป้อนไปหน้าของกระแส i_{1d} ร่วมกับกระแสควบคุมแรงดันที่มาจากวงรอบควบคุมแรงดัน จากรูปจะเห็นว่าเมื่อเราใส่โหลดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่ายอดของแรงดันเฟสก็จะลดลงประมาณ 20 โวลต์และใช้เวลาประมาณ 50 ms ก็สามารถกลับเข้าสู่ค่าคำสั่งได้



รูปที่ 7.7 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อจ่ายโหลดแบบขั้นขนาดใกล้เคียงค่าพิกัดโดยใช้การป้อนไปหน้าของกระแสช่วยในการควบคุมแรงดัน

รูปที่ 7.8 แสดงผลตอบสนองของการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยอาศัยการป้อนไปหน้าของกระแส i_{1d} เมื่อปลดโหลดพิกัดออกแบบฉบับพลัน ค่ายอดของแรงดันเฟสจะเพิ่มขึ้นประมาณ 20 โวลต์และใช้เวลาประมาณ 100 ms ก็จะกลับเข้าสู่ค่าคำสั่ง



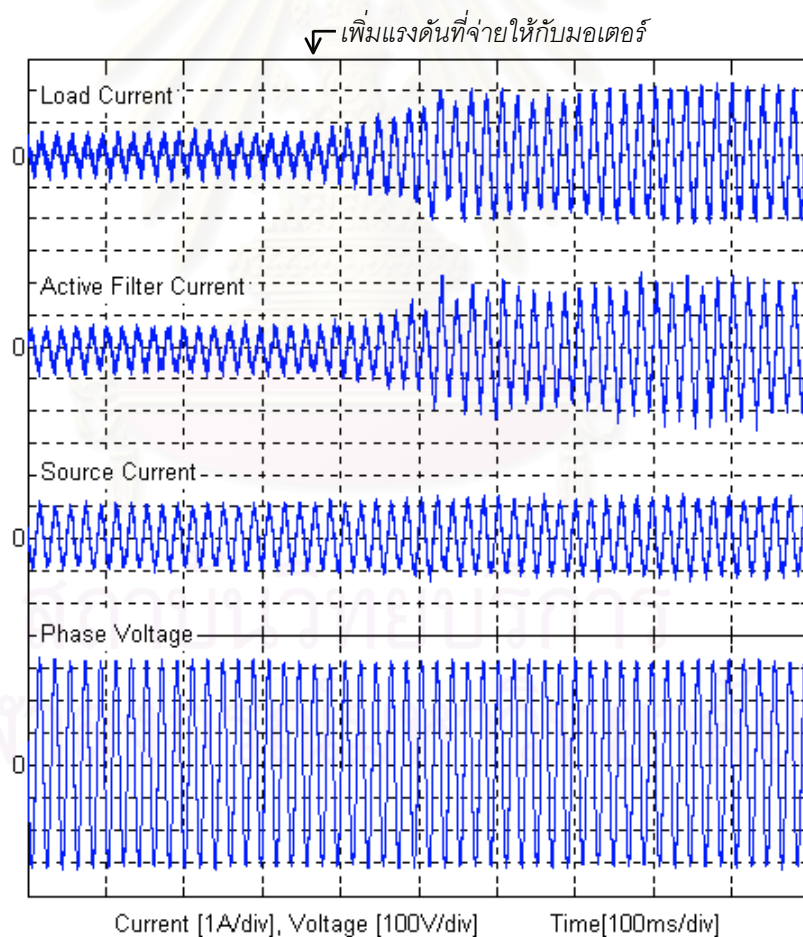
รูปที่ 7.8 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันเมื่อปลดโหลดโดยใช้การป้อนไปหน้าของกระแสช่วยในการควบคุมแรงดัน

7.2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ

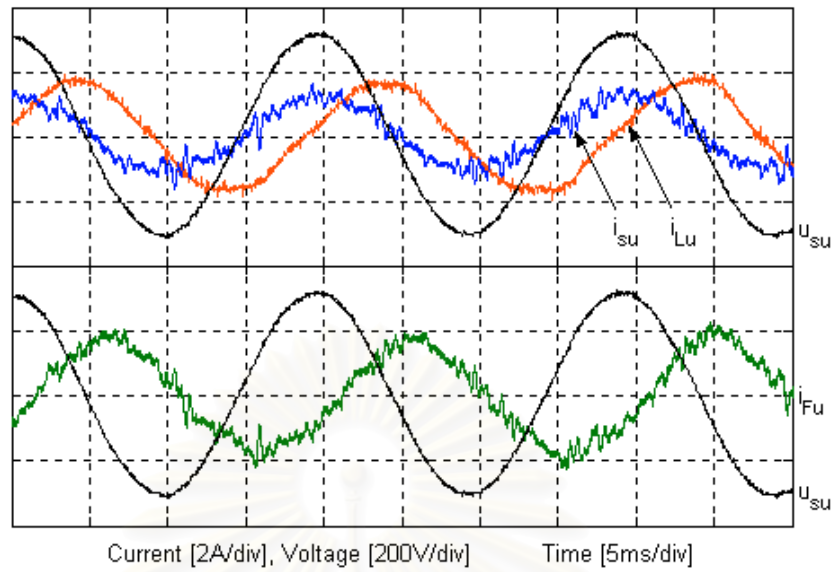
โหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของระบบปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ประกอบด้วย Variac ต่อมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 1.1 kW, 380 V, 50 Hz การเปลี่ยนแปลงขนาดของโหลดความเหนี่ยวนำทำโดยการปรับเปลี่ยนขนาดของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

รูปที่ 7.9 เปรียบเทียบให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของกระแสไหลด, กระแส วงจรกรอง, กระแสเฟส และ แรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยในช่วงแรกเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เหนี่ยวนำจ่ายไหลดค่าน้อย ๆ ค่าหนึ่งอยู่ จากนั้นก็เพิ่มไหลดขึ้นไปทีค่าประมาณ 0.8kVar โดย สังเกตได้จากขนาดของกระแสไหลดที่เพิ่มขึ้น ผลที่เกิดขึ้นคือวงจรกรองแยกที่จ่ายกระแสกำลัง รีแอกทีฟที่ไหลดต้องการเพิ่มขึ้นแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กระแสวงจรกรองแยกที่จะมี ขนาดเพิ่มตามการเพิ่มของกระแสไหลดโดยที่กระแสเฟสทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดเพิ่ม ขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

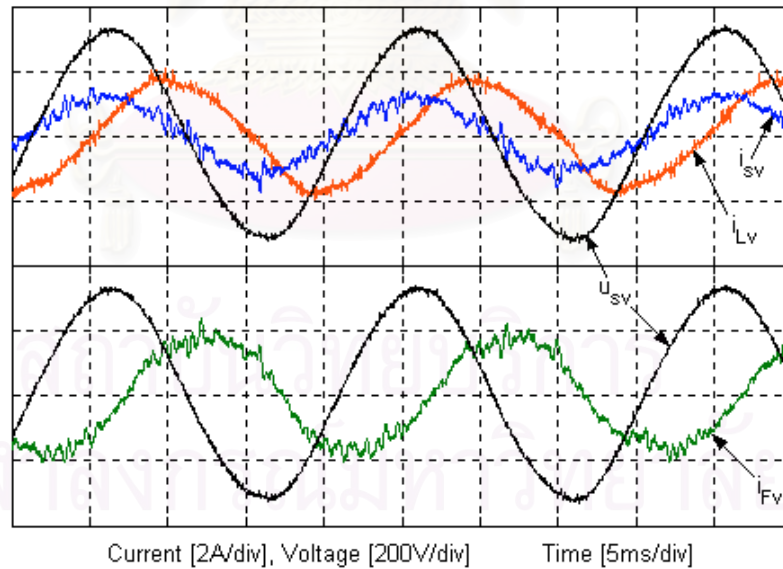
รูปที่ 7.10, 7.11 และ 7.12 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่สภาวะอยู่ตัวของ เฟส u, v และ w ตามลำดับเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายไหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ จาก รูปจะเห็นว่ากระแสไหลดจะล่าหลังแรงดันเฟสอยู่ประมาณ 90 องศา ขณะที่กระแสในสายเฟสของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีขนาดเล็กกว่ากระแสไหลดและเกือบจะมีเฟสตรงกันกับเฟสของแรงดัน



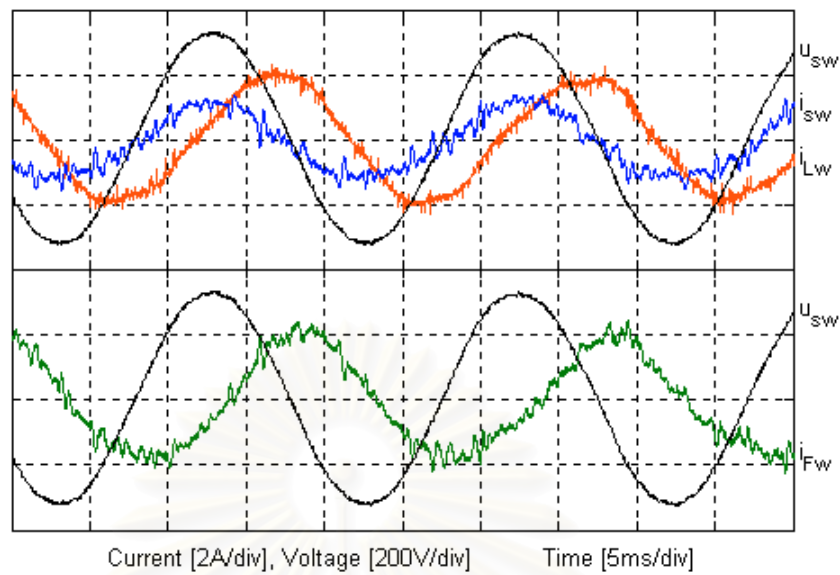
รูปที่ 7.9 รูปคลื่นกระแส-แรงดันขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
จ่ายไหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ



รูปที่ 7.10 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (U-phase) ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ



รูปที่ 7.11 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (V-phase) ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ



รูปที่ 7.12 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (W-phase) ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดที่มีค่าความเหนี่ยวนำ

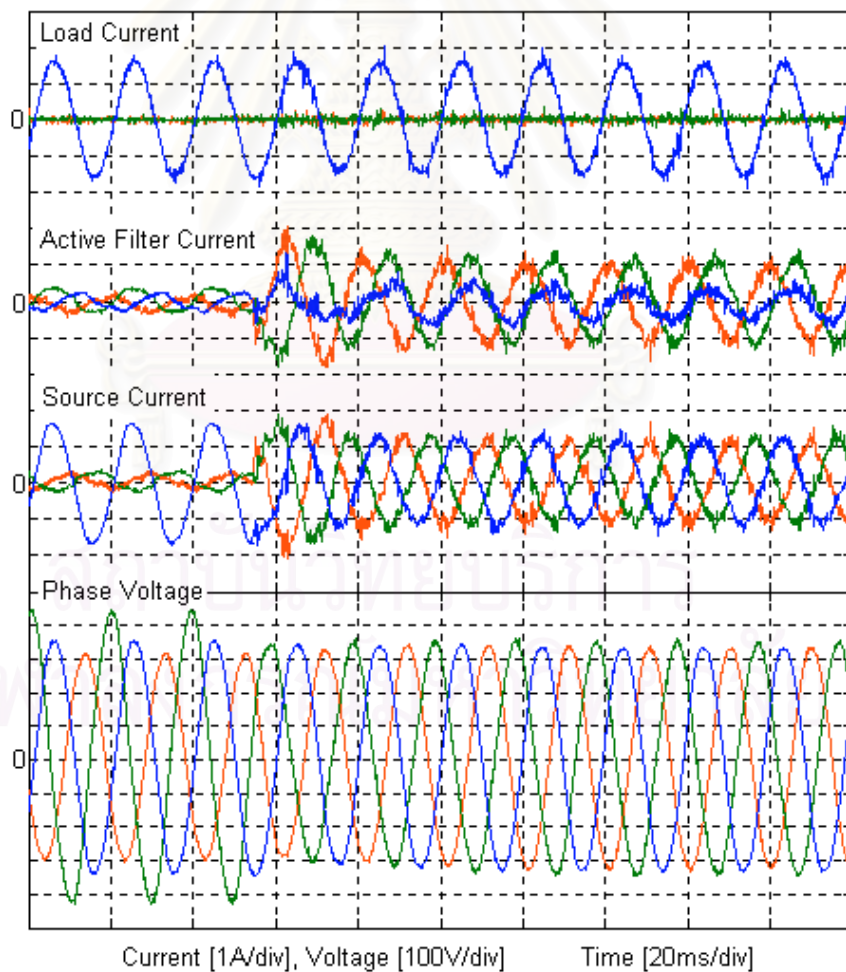
7.3 การทดสอบในสภาวะโหลดไม่สมดุล

การทดสอบการทำงานของระบบปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสภาวะโหลดไม่สมดุลกระทำโดยการต่อโหลดความต้านทานขนาดประมาณ $210\ \Omega$ เข้าที่เฟส w ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงเฟสเดียว วิธีการทดสอบจะกระทำในสองกรณีคือ กรณีแรกเราจะให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่สมดุลไปก่อนจากนั้นจึงเริ่มให้วงจรกรองแอกทีฟทำงาน กรณีที่สองคือเราให้วงจรกรองแอกทีฟทำงานไปก่อนจากนั้นจึงให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่สมดุล

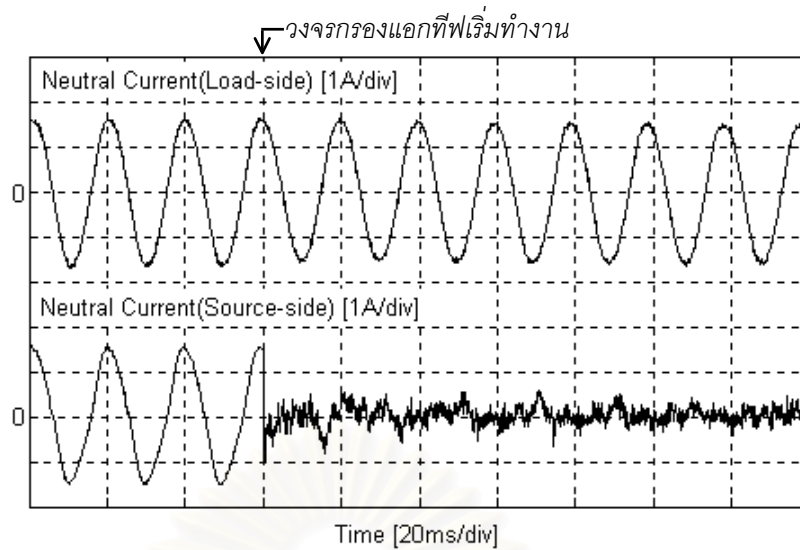
รูปที่ 7.13 และ 7.14 เป็นการทดสอบการทำงานของระบบในกรณีแรกคือให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่สมดุลไปก่อน ในช่วงเวลานี้จะเห็นว่ากระแสเฟสทางด้านเครื่องกำเนิดจะไม่สมดุล เป็นผลให้แรงดันเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สมดุลไปด้วย แต่เมื่อวงจรกรองแอกทีฟเริ่มทำงานคือเริ่มจ่ายกระแสเพื่อชดเชยโหลดไม่สมดุล กระแสในสายเฟสทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละเฟสก็จะเริ่มมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมากขึ้นคือกระแสเฟสเริ่มมีความสมดุลกันมากขึ้นนั่นเองซึ่งเป็นผลให้แรงดันเฟสมีความสมดุลตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 7.13

เราสามารถดูผลการทำงานของวงจรกรองแอกทีฟในแง่ของการชดเชยโหลดไม่สมดุลโดยดูที่กระแสนิวทรัลได้ดังแสดงในรูปที่ 7.14 ก่อนที่วงจรกรองแอกทีฟจะจ่ายกระแสชดเชย โหลดไม่สมดุล กระแสในสายนิวทรัลด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีขนาดใกล้เคียงกับกระแสในสายนิวทรัลด้านโหลด แต่เมื่อวงจรกรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแสชดเชยโหลดไม่สมดุลจะเห็นว่ากระแสในสายนิวทรัลด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะลดขนาดลงจนเป็นศูนย์

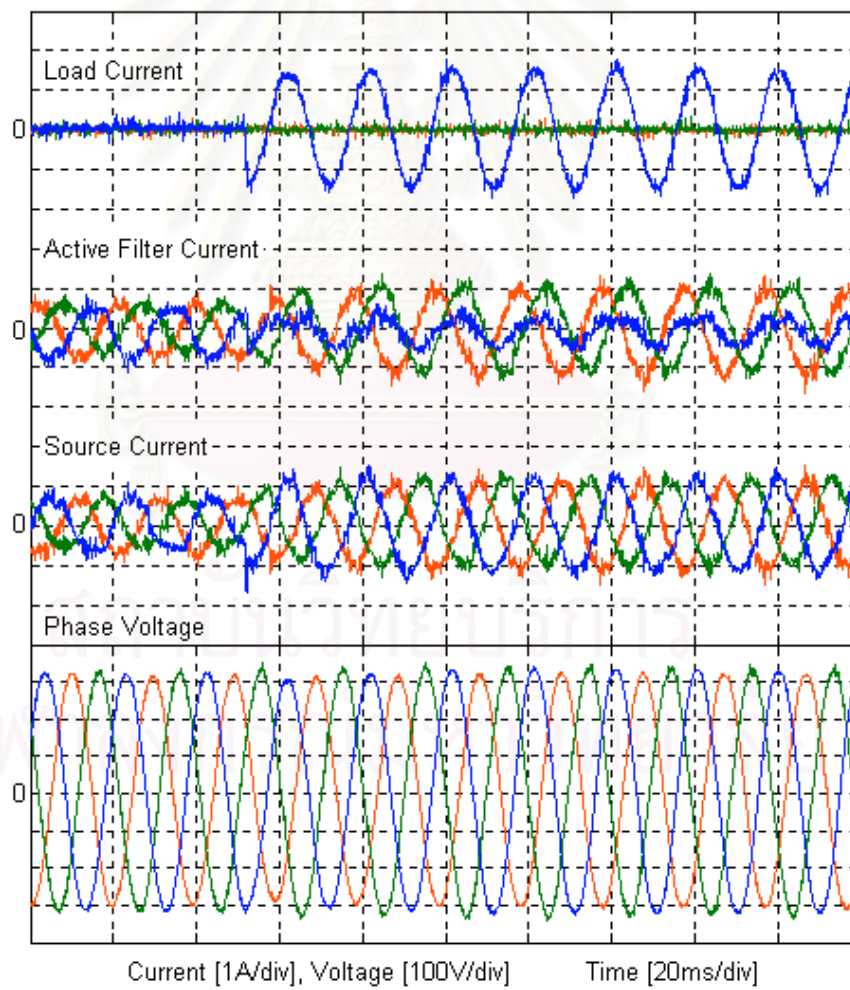
รูปที่ 7.15 และ 7.16 เป็นการทดสอบการทำงานของระบบในกรณีที่สองคือให้วงจรกรองแอกทีฟทำงานไปก่อนจากนั้นจึงเริ่มต่อโหลดไม่สมดุลให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลที่ได้จากการทดสอบคือกระแสในสายเฟสทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าค่อนข้างจะมีความสมดุลดีแม้ในขณะที่เริ่มต่อโหลดจึงทำให้แรงดันด้านออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ เวลานั้นค่อนข้างจะมีความสมดุลดีตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 7.15 หรือดูผลจากขนาดกระแสในสายนิวทรัลด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อต่อโหลดซึ่งยังคงมีค่าประมาณศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 7.16



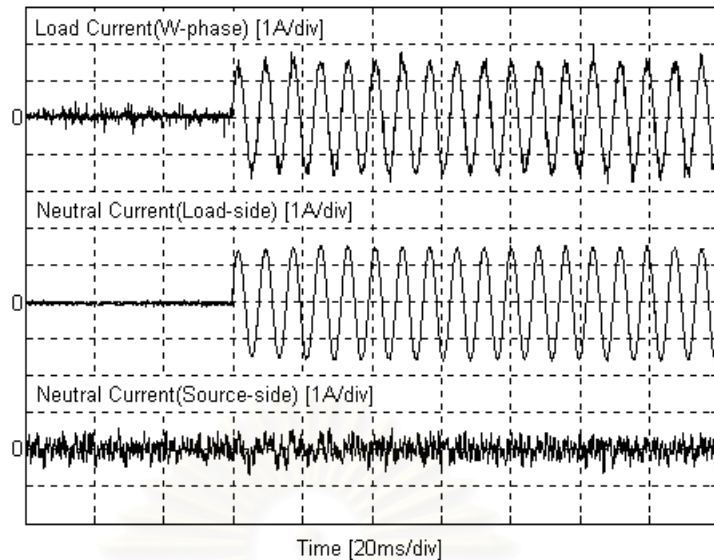
รูปที่ 7.13 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดันขณะวงจรกรองแอกทีฟเริ่มทำงาน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่สมดุล



รูปที่ 7.14 สภาวะชั่วครู่ของกระแสนิวทรัลด้านโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เมื่อวงจรกรองแอกทีฟเริ่มทำงาน



รูปที่ 7.15 รูปคลื่นกระแส-แรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
เริ่มจ่ายโหลดไม่สมดุลในขณะที่วงจรกรองแอกทีฟทำงาน



รูปที่ 7.16 รูปคลื่นกระแสโหลดเฟส w, กระแสนิวทรัลด้านโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เมื่อเริ่มจ่ายโหลดไม่สมดุลในขณะที่วงจรรองแอกทีฟทำงาน

7.4 การทดสอบในสภาวะโหลดไม่เชิงเส้น

ในกรณีนี้เราจะให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นซึ่งเป็นวงจรเรียงกระแส 3 เฟสขนาดกำลังประมาณ 1 kW ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปที่ 7.17, 7.18, 7.19 และ 7.20 สอดคล้องกับผลการจำลองการทำงานที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้คือ ก่อนที่วงจรรองแอกทีฟจะจ่ายกระแสชดเชย กระแสทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกปะปนอยู่มาก ผลจากแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ภายในของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกทำให้แรงดันเฟสผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์และผลจากการจ่ายโหลดยังทำให้ขนาดแรงดันลดลงด้วย เมื่อวงจรรองแอกทีฟเริ่มจ่ายกระแสชดเชยจะเห็นว่าฮาร์มอนิกในกระแสและแรงดันเฟสจะลดลงภายใน 1 คาบ และแรงดันเฟสมีขนาดเพิ่มขึ้นเนื่องจากวงจรรองแอกทีฟจ่ายกำลังรีแอกทีฟเพื่อควบคุมแรงดันออกให้ได้ตามค่าแรงดันคำสั่ง

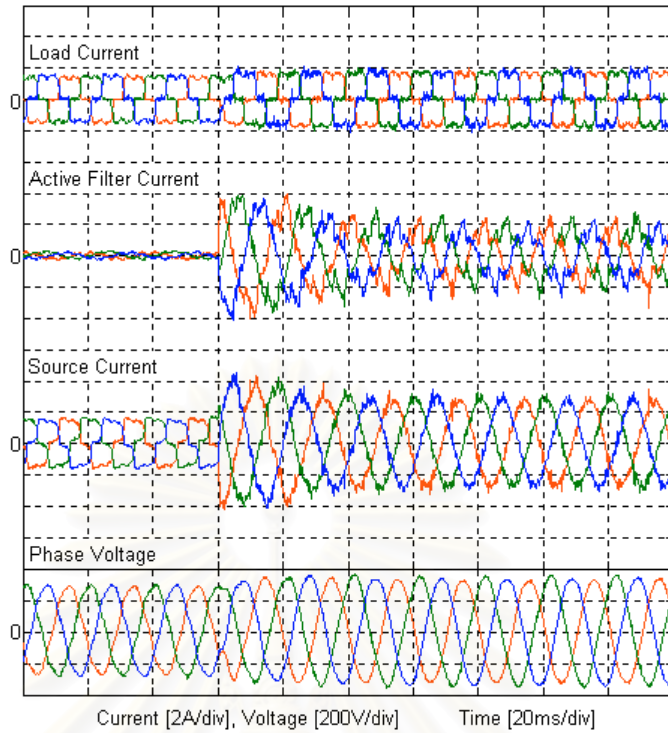
รูปที่ 7.21, 7.22, 7.23 และ 7.24 แสดงผลตอบสนองในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเริ่มจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นโดยก่อนหน้าที่จะให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดเราให้วงจรรองแอกทีฟจ่ายกระแสเพื่อควบคุมแรงดันไปก่อนแล้ว จากนั้นจึงเริ่มจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น พบว่ากระแสทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขนาดขึ้นตามการเพิ่มของกระแสโหลดแต่ยังคงมีรูปคลื่นเป็นไซน์ ในส่วนของแรงดันเฟสพบว่าขณะเริ่มจ่ายโหลดขนาดแรงดันเฟสจะลดลง และใช้เวลาประมาณ 2 คาบก็สามารถกลับเข้าสู่ค่าคำสั่งได้โดยลักษณะของแรงดันยังคงเป็นรูปคลื่นไซน์อยู่

รูปที่ 7.25, 7.26 และ 7.27 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่สภาวะอยู่ตัวของ เฟส u, v และ w ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่ากระแสในสายเฟสทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีรูปคลื่นที่ใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์แม้กระแสไหลจะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นเหลี่ยมคือมีฮาร์มอนิกปนอยู่มากก็ตาม แสดงว่าวงจรกรองแอกที่ฟสามารถที่จะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกออกมาเพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกจากโหลดได้ดี

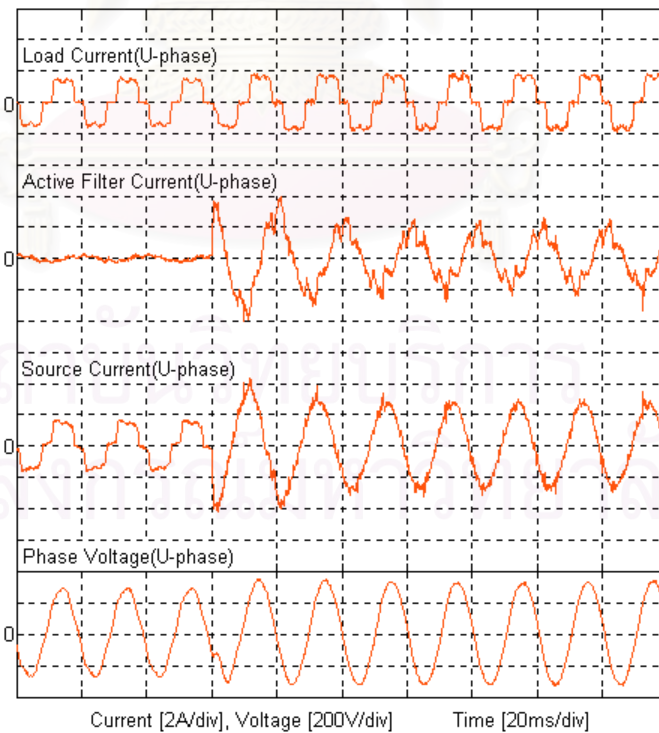
รูปที่ 7.28, 7.29 และ 7.30 แสดงองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายที่เฟส u, v และ w ตามลำดับเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังวงจรกรองแอกที่ฟจ่ายกระแสชดเชย ก่อนหน้าที่วงจรกรองแอกที่ฟจะจ่ายกระแสชดเชย กระแสทางด้านแหล่งจ่ายจะมีฮาร์มอนิกอันดับ 5,7,11,13,17 และ 19 ปรากฏอยู่โดยมีค่า THD เท่ากับ 21.97 %, 22.07 % และ 22.15 % ที่เฟส u, v และ w ตามลำดับ หลังจากที่ยังวงจรกรองแอกที่ฟจ่ายกระแสชดเชยแล้วพบว่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกในอันดับดังกล่าวจะลดลงไปโดยมีค่า THD เป็น 4.78 %, 5.02 % และ 5.88 % ที่เฟส u,v และ w ตามลำดับ อย่างไรก็ตามแม้ดูเหมือนว่าค่า THD ที่ได้หลังจากวงจรกรองแอกที่ฟจ่ายกระแสชดเชยแล้วจะลดลงจากก่อนหน้าที่วงจรกรองแอกที่ฟจะจ่ายกระแสชดเชยค่อนข้างมาก ผลที่เป็นเช่นนี้ส่วนหนึ่งมาจากเมื่อวงจรกรองแอกที่ฟทำงานก็จะทำให้กระแสที่องค์ประกอบมูลฐานมีขนาดเพิ่มขึ้น

รูปที่ 7.31, 7.32 และ 7.33 แสดงองค์ประกอบฮาร์มอนิกของแรงดันเฟสที่เฟส u,v และ w ตามลำดับเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังวงจรกรองแอกที่ฟจ่ายกระแสชดเชย พบว่าก่อนที่ยังวงจรกรองแอกที่ฟจะจ่ายกระแสชดเชย แรงดันเฟสจะมีฮาร์มอนิกในอันดับหลักที่ตรงกับอันดับของฮาร์มอนิกในกระแสเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คืออันดับที่ 5,7,11,13,17 และ 19 แต่หลังจากที่ยังวงจรกรองแอกที่ฟจ่ายกระแสชดเชยแล้วฮาร์มอนิกที่แรงดันเฟสในอันดับดังกล่าวก็จะลดลง

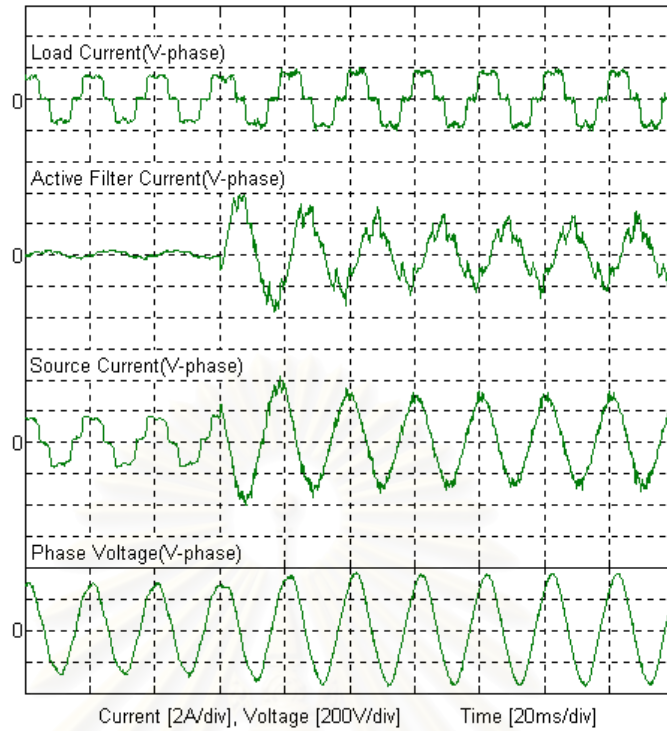
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



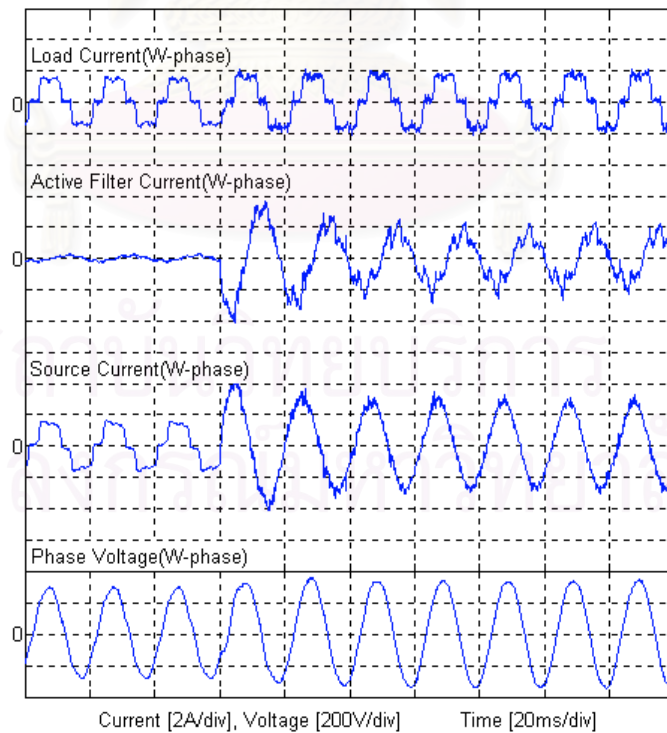
รูปที่ 7.17 รูปคลื่นกระแส-แรงดันขณะวงจรกรองแอกทีฟเริ่มทำงาน โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น



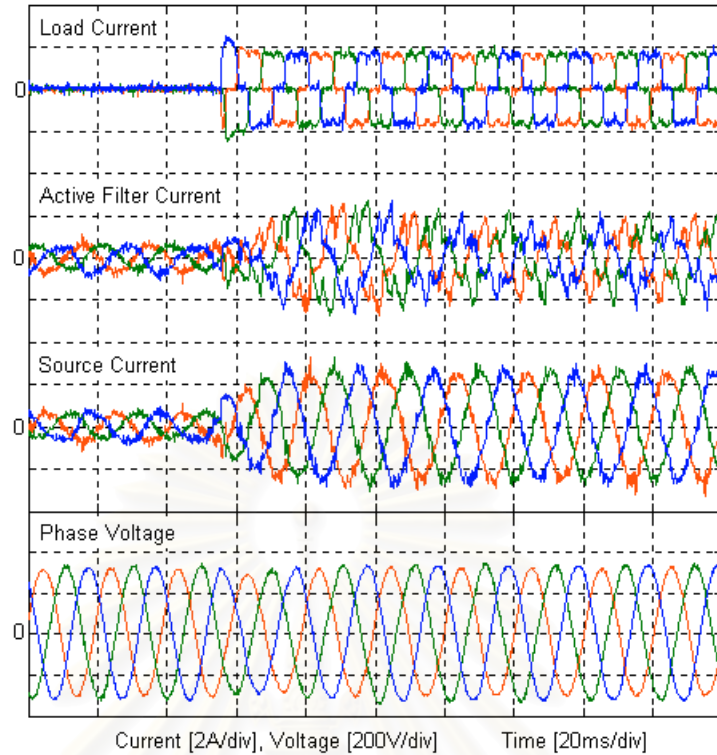
รูปที่ 7.18 สภาวะชั่วคราวของกระแส-แรงดัน (U-phase) ขณะวงจรกรองแอกทีฟเริ่มทำงานโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น



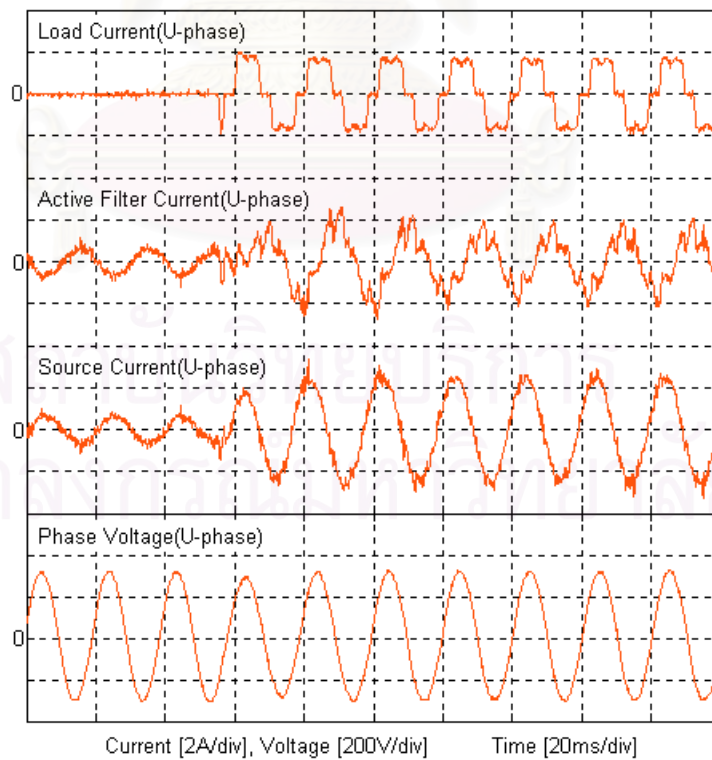
รูปที่ 7.19 สถานะชั่วครู่ของกระแสแรงดัน (V-phase) ขณะวงจรกรองแอกทีฟเริ่มทำงานโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น



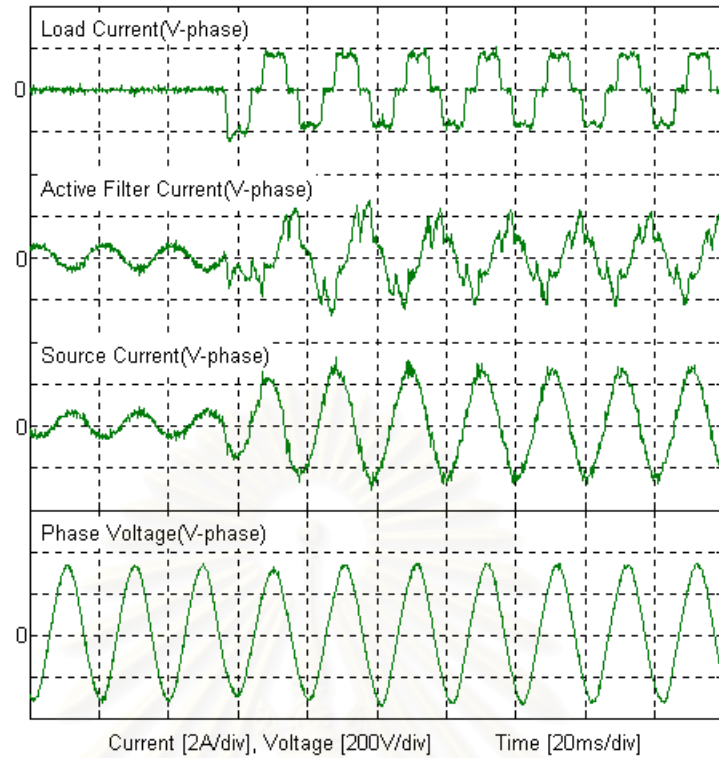
รูปที่ 7.20 สถานะชั่วครู่ของกระแสแรงดัน (W-phase) ขณะวงจรกรองแอกทีฟเริ่มทำงานโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น



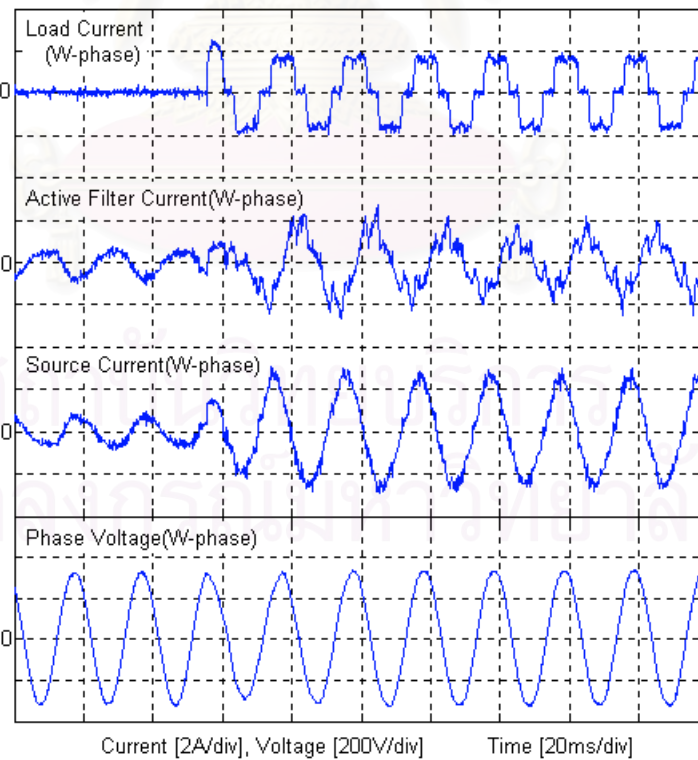
รูปที่ 7.21 รูปคลื่นกระแส-แรงดันขณะเริ่มจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น
โดยที่วงจรรองแอกทีฟทำงาน



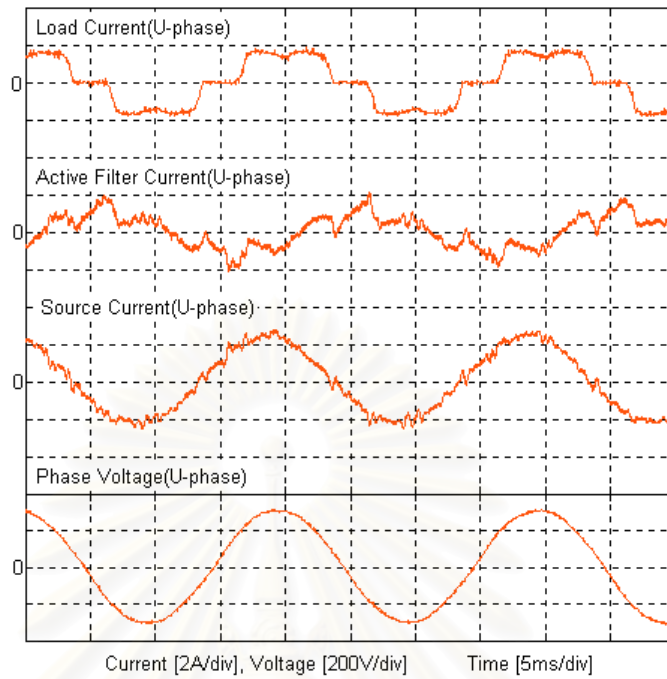
รูปที่ 7.22 สภาวะชั่วครู่ของกระแส-แรงดัน (U-phase) ขณะเริ่ม
จ่ายโหลดไม่เชิงเส้นโดยที่วงจรรองแอกทีฟทำงาน



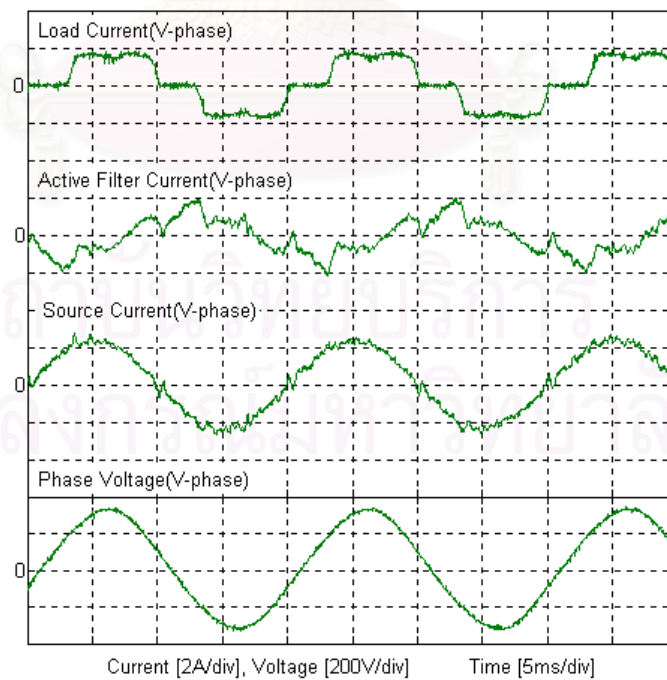
รูปที่ 7.23 สภาวะชั่วคราวของกระแสแรงดัน (V-phase) ขณะเริ่มจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นโดยที่วงจรรองแอกทีฟทำงาน



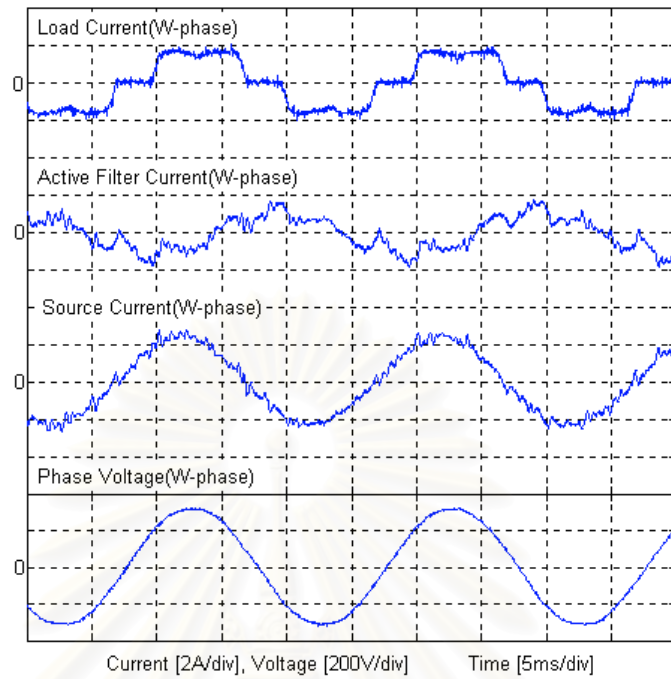
รูปที่ 7.24 สภาวะชั่วคราวของกระแสแรงดัน (W-phase) ขณะเริ่มจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นโดยที่วงจรรองแอกทีฟทำงาน



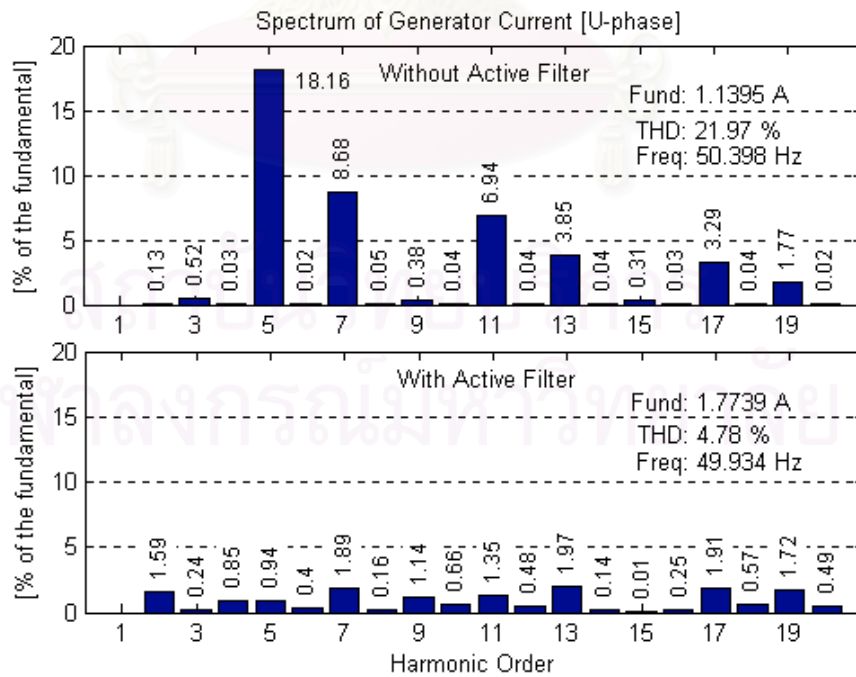
รูปที่ 7.25 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (U-phase) ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นและวงจรกรองแอกทีฟทำงาน



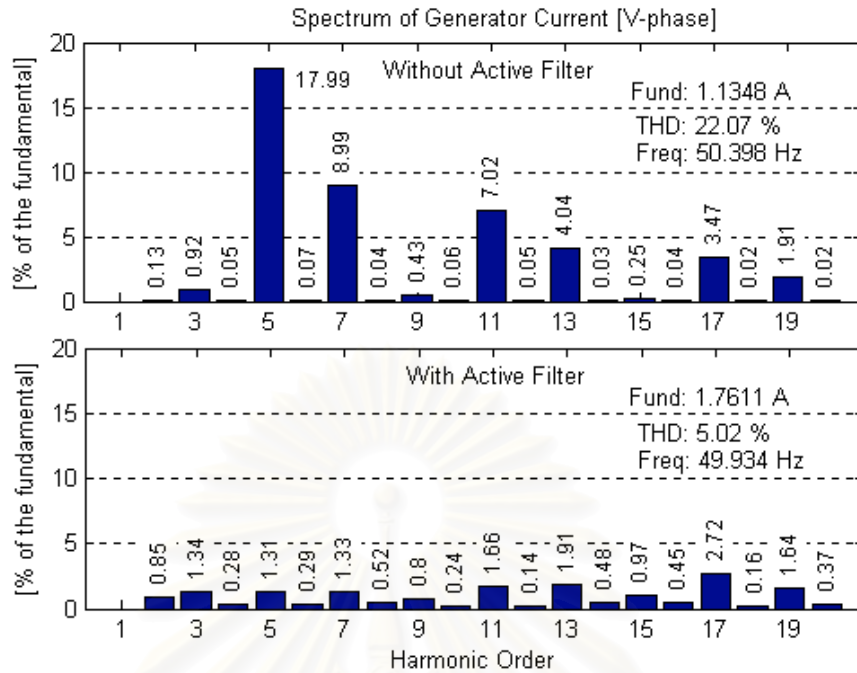
รูปที่ 7.26 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (V-phase) ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นและวงจรกรองแอกทีฟทำงาน



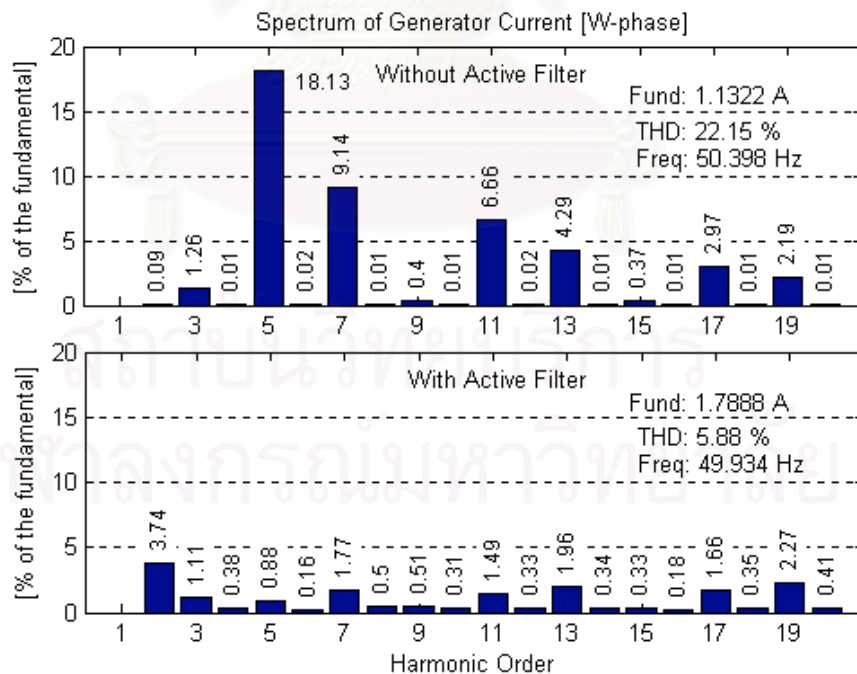
รูปที่ 7.27 รูปคลื่นกระแส-แรงดัน (W-phase) ในสภาวะอยู่ตัวเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นและวงจรกรองแอกทีฟทำงาน



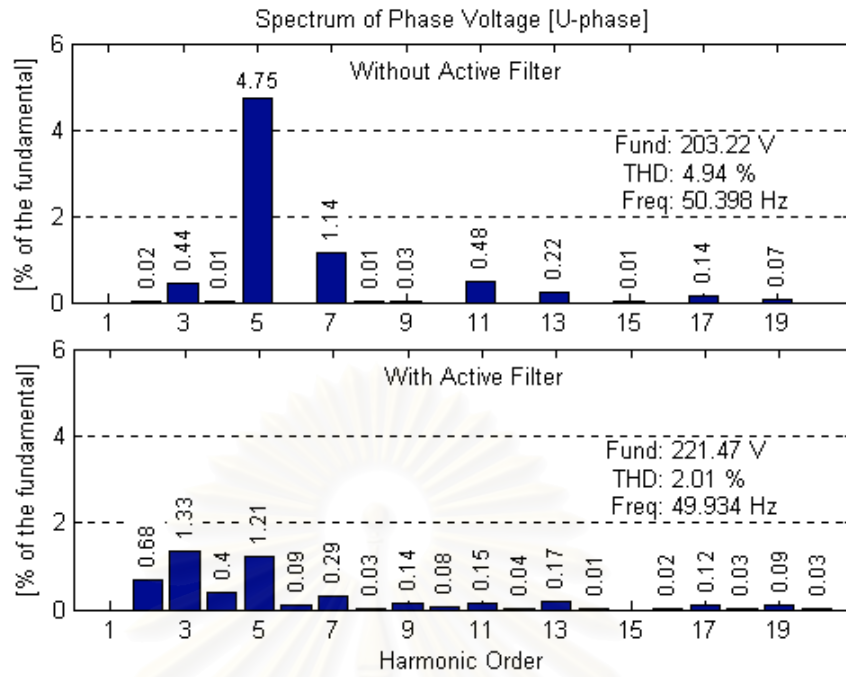
รูปที่ 7.28 สเปกตรัมของกระแสในสายเฟส (U-phase) ก่อนและหลังวงจรกรองแอกทีฟทำงาน



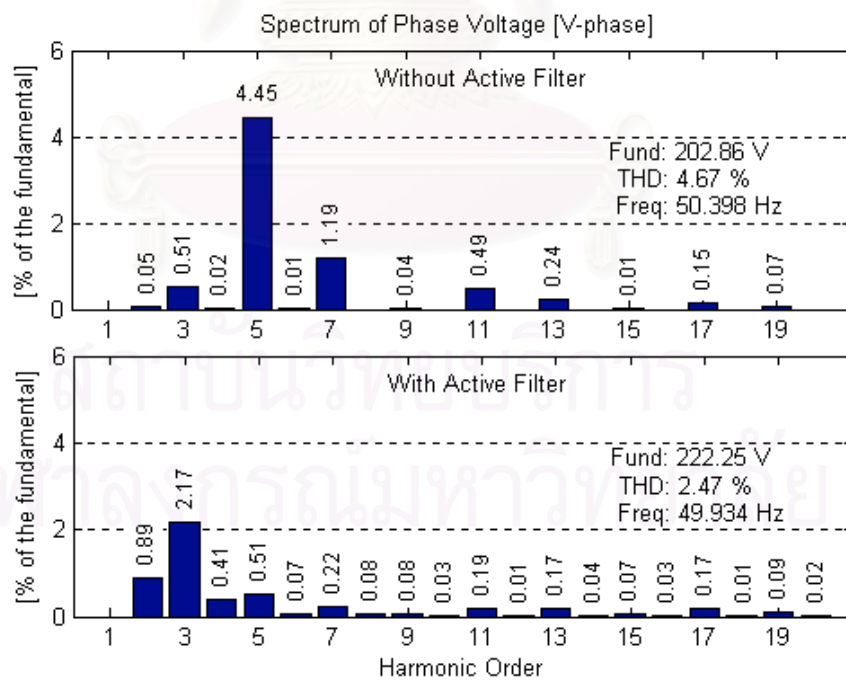
รูปที่ 7.29 สเปกตรัมของกระแสในสายเฟส (V-phase)
ก่อนและหลังวงจรกรองแอกทีฟทำงาน



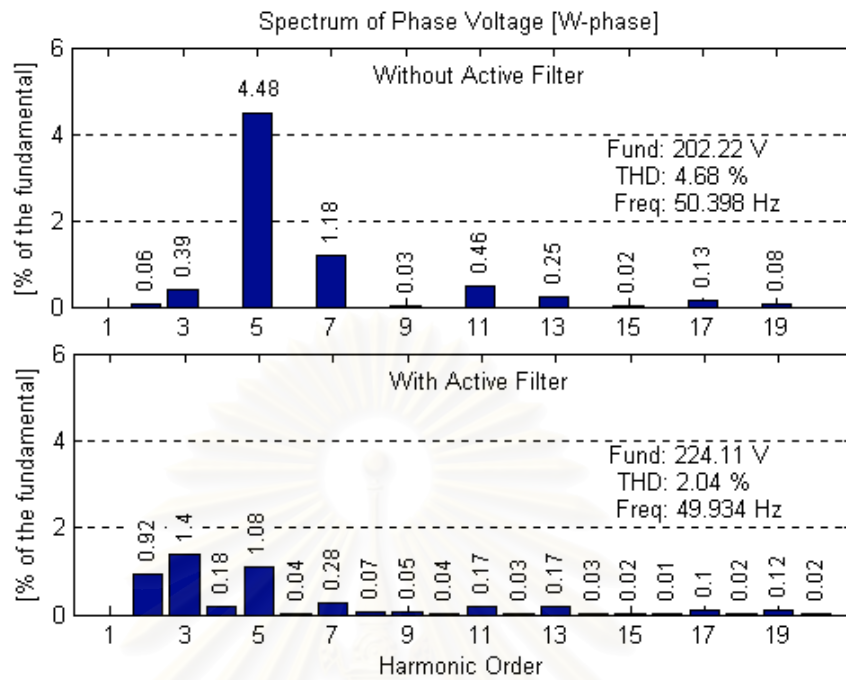
รูปที่ 7.30 สเปกตรัมของกระแสในสายเฟส (W-phase)
ก่อนและหลังวงจรกรองแอกทีฟทำงาน



รูปที่ 7.31 สเปกตรัมของแรงดันเฟส (U-phase) ก่อน
และหลังวงจรกรองแอกที่ฟทำงาน



รูปที่ 7.32 สเปกตรัมของแรงดันเฟส (V-phase) ก่อน
และหลังวงจรกรองแอกที่ฟทำงาน



รูปที่ 7.33 สเปกตรัมของแรงดันเฟส (W-phase) ก่อน

และหลังวงจรกรองแอกทีฟทำงาน

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้นำวงจรกรองแอกทีฟมาต่อขนานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองเพื่อปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หน้าที่หลักของวงจรกรองแอกทีฟคือการจ่ายกระแสกำลังรีแอกทีฟเพื่อควบคุมแรงดันออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ได้ตามค่าแรงดันคำสั่งรวมทั้งจ่ายกำลังรีแอกทีฟที่โหลดต้องการแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วงจรกรองแอกทีฟยังทำหน้าที่จ่ายกระแสเพื่อชดเชยโหลดไม่สมดุลทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามองเห็นโหลด 3 เฟสมีความสมดุลเสมอ นอกจากนี้วงจรกรองแอกทีฟยังสามารถจ่ายกระแสเพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกของโหลดได้ด้วย

จากผลการทดสอบระบบทั้งหมดเราได้ข้อสรุปว่าเราสามารถปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองได้โดยใช้วงจรกรองแอกทีฟจ่ายกระแสชดเชยกระแสฮาร์มอนิกของโหลดไม่เชิงเส้น กระแสลำดับลบและกระแสลำดับศูนย์ของโหลดไม่สมดุลรวมทั้งกระแสกำลังรีแอกทีฟของโหลดความเหนี่ยวนำ ขนาดแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถควบคุมผ่านกระแสกำลังรีแอกทีฟให้มีค่าคงที่ตลอดการทำงาน ทำให้คุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่ได้เมื่อมีการชดเชยดังกล่าวแล้วจะมีลักษณะเป็นไซน์และสมดุลตลอดเวลา

8.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดโหลดแม้ว่าเราจะสามารถควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ได้ก็ตาม แต่เนื่องด้วยความถี่สลิปซึ่งแปรค่าตามขนาดโหลดทำให้ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไม่คงที่ แต่เราสามารถควบคุมความถี่ของแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ได้โดยการชดเชยความถี่สลิป กล่าวคือเราจะต้องหมุนโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มโหลดหรือลดความเร็วของโรเตอร์ลงเมื่อลดโหลด โดยที่ค่าความเร็วโรเตอร์ที่ต้องชดเชยนี้สามารถคำนวณได้จากความถี่สลิปขณะใด ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรืออาจจะมาจากวงจรควบคุมความถี่ที่เพิ่มเติมเข้าไป

เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีในการชดเชยองค์ประกอบกระแสของวงจรกรองแอกทีฟที่ใช้การตรวจจับกระแสด้านไหลดนั้นขึ้นอยู่กับความถูกต้องในการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับกระแส (current sensor) และการตรวจจับกระแสด้านไหลดเป็นการทำงานแบบวงรอบเปิดดังนั้นถ้าอุปกรณ์ตรวจจับกระแสทำงานไม่ถูกต้องจะทำให้การชดเชยไม่สมบูรณ์ กระแสทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงอาจจะมีองค์ประกอบกระแสที่ไม่ต้องการหลงเหลืออยู่ แต่ถ้าใช้วงจรกรองแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่ายซึ่งเป็นระบบวงรอบปิดปัญหาเหล่านี้ก็จะหมดไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- [1] ประจวบ บุญศรีรัมย์ "วงจรรองกำลังแอกทีฟขนานสำหรับระบบ 3 เฟส 4 สายที่ใช้รีเคอร์ซีฟ ดีเอพีทีและการควบคุมกระแสแบบวิธีทำซ้ำ" วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545

ภาษาอังกฤษ

- [2] Bhim Singh and L.B. Shilpakar, "Analysis of a novel solid state voltage regulator for a self-excited induction generator", Proc. of IEE Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 6, November, 1998, pp. 647-655.
- [3] Guibin Zhang and Zheng Xu, "A New Real-time Negative and Positive Sequence Components Detecting Method Based on Space Vector", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, Vol. 1, pp. 275-280.
- [4] Ion Boldea and Syed A. Nasar, The Induction Machine Handbook, CRC Press, 2002.
- [5] Peter Vas, Electrical Machines and Drives: A Space-Vector Theory Approach, Clarendon Press Oxford, 1992.
- [6] R. Krishnan, Electric motor drives, Prentice Hall, 2001.
- [7] S.-C.Kuo and L. Wang , "Analysis of voltage control for a self-excited induction generator using a current-controlled voltage source inverter (CC-VSI)", Proc. of IEE Gener. Transm. Distrib., Vol. 148, No. 5, September, 2001, pp. 431-438.
- [8] Shee-Mun Ong, Dynamic simulation of electric machinery, Prentice Hall PTR, 1998.
- [9] Shinji Hara, Yutaka Yamamoto, Tohru Omata, Michio Nakano, "Repetitive Control system: A New Type Servo System for Periodic Exogenous Sigals", *IEEE Trans. on Autom. Contr.*, AC-33, July, 1998, pp. 659-667.
- [10] S.S. Wekhande and V. Agarwal, "Simple Control for a Wind-Driven Induction Generator" IEEE Industry Applications Magazine, March/April 2001, pp. 44-53.

- [11] Sunt Srianthumrong, Somboon Sangwongwanich, "An Active Power Filter with Harmonic Detection Method based on recursive DFT", Proc. of ICHQP'98, Volume 1, October, 1998, pp. 127-132.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

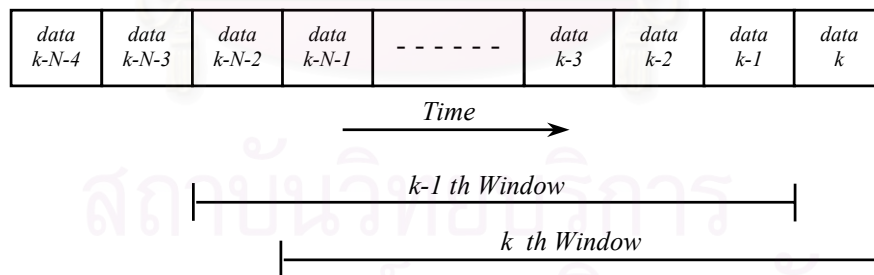
ภาคผนวก ก

การพิสูจน์สมการ Recursive ของการทำ DFT แบบเต็มคาบ

ในที่นี้เราจะทำการพิสูจน์ว่าการทำ DFT แบบเต็มคาบโดยใช้ Sliding Basis ตามสมการที่ (3.3) สามารถเขียนเป็นสมการ Recursive ได้ดังสมการที่ (3.4) เริ่มจากพิจารณาสมการที่ (3.3)

$$\bar{I}_h = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \bar{i}(k) \cdot W^{-hk} \tag{3.3}$$

การตรวจจับองค์ประกอบกระแสสำหรับวงจรของกำลังแอกทีฟนั้นจะต้องมีการสุ่มกระแสเข้ามาเพื่อคำนวณปรับค่าองค์ประกอบกระแสใหม่อยู่ตลอดเวลาเนื่องจากองค์ประกอบกระแสในระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ดังนั้นในการทำ DFT เราจึงต้องเลื่อนกรอบข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้ไปกับเวลาซึ่งจะทำให้ค่า DFT ที่ได้เป็นฟังก์ชันกับเวลาเรียกว่า Running DFT หรือ Sliding Window DFT การทำ DFT ในลักษณะเช่นนี้จะให้ค่าที่ได้จากการคำนวณออกมาเป็นสัญญาณขององค์ประกอบกระแสที่ต้องการทันที เราสามารถคำนวณ Sliding Basis DFT ได้โดยใช้สมการที่ (ก.1) ซึ่งลักษณะนิยามของดัชนี n ทำให้การใช้สัญญาณกระแส $i(k-n)$ ในการคำนวณมีลักษณะย้อนหลังเชิงเวลา ดังนั้นพจน์เดิมที่เราใช้ W^{-hk} จึงต้องเปลี่ยนมาเป็น W^{hn}



รูปที่ ก.1 แสดงหลักการเลื่อนกรอบข้อมูลในการทำ Running DFT

$$\bar{I}_h(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{i}(k-n) \cdot W^{hn} \tag{ก.1}$$

$$\bar{I}_h(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} \bar{i}(k-n) \cdot W^{hn} + \frac{1}{N} i(k) \tag{ก.2}$$

แทนค่า k ด้วย $k-1$ ลงในสมการ (ก.1) จะได้

$$\bar{I}_h(k-1) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{i}(k-n-1) \cdot W^{hn} \quad (\text{ก.3})$$

แทนค่า $n+1 = m$ จะได้

$$\bar{I}_h(k-1) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \bar{i}(k-m) \cdot W^{hm} W^{-h} \quad (\text{ก.4})$$

คูณทั้งสองข้างของสมการ (ก.4) ด้วย W^h และแยกพจน์ของ $\bar{i}(k-m)$ เมื่อ $m = N$ ออกมาจะได้

$$W^h \bar{I}_h(k-1) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{N-1} \bar{i}(k-m) \cdot W^{hm} + \frac{1}{N} \bar{i}(k-N) \cdot W^{hN} \quad (\text{ก.5})$$

ตั้งนัยจากสมการ (ก.2) และ (ก.5) เราจะได้ว่า

$$W^h \bar{I}_h(k-1) = \bar{I}_h(k) - \frac{1}{N} \bar{i}(k) + W^h \bar{I}_h(k-1) + \frac{1}{N} \bar{i}(k-N) \cdot W^{hN} \quad (\text{ก.6})$$

โดยการแทนค่า $W^{hN} = e^{j\frac{2\pi}{N}hN} = 1$ และจัดรูปเราจะได้ว่า

$$\bar{I}_h(k) = W^h \bar{I}_h(k-1) + \frac{1}{N} (\bar{i}(k) - \bar{i}(k-N)) \quad (\text{ก.7})$$

ซึ่งตรงกับสมการที่ (3.6)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ประจวบ เอี่ยมล้ำอาจ เกิดเมื่อวันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2518 ที่จังหวัด ประจวบคีรีขันธ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) จากมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ในปีการศึกษา 2540 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในภาคการศึกษาปลายปีการศึกษา 2543

ผลงานวิจัย

ประจวบ เอี่ยมล้ำอาจ และ สมบูรณ์ แสงวงศ์วานิชย์ "การปรับปรุงคุณภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกระตุ้นตัวเองด้วยวงจรกรองแอกทีฟ" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25, 2545: หน้า 167-171

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย