

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่จ่าย
โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกันด้วยเกณฑ์ของมิตเดิลบรูก



นางสาวจุฑาทิพย์ กล้าสงคราม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**STABILITY ANALYSIS OF AC-DC POWER SYSTEM
FEEDING PARALLELED CONSTANT POWER LOADS
USING MIDDLEBROOK'S CRITERIA**

Juthatip Klasongkram



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

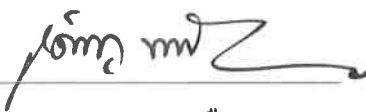
Suranaree University of Technology

Academic Year 2020

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดิจิทัลที่จ่ายโหลด
กำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกันด้วยเกณฑ์ของมิตเดิลบรูก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.กองพัน อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)




(อ. ดร.เทพพนม โสภากเพิ่ม)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(รศ. ดร.กิตติ อັตถกิจมงคล)

กรรมการ



(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จุฑาทิพย์ กล้าสงคราม : การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่จ่าย
โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกันด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบрук (STABILITY ANALYSIS OF
AC-DC POWER SYSTEM FEEDING PARALLELED CONSTANT POWER LOADS
USING MIDDLEBROOK'S CRITERIA) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์, 198 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มี
โหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมขนานกัน ซึ่งโหลดวงจรแปลงผันดังกล่าวจะมี
พฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง
โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบрук ผ่าน
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบที่ได้พิสูจน์ขึ้น โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธี
ดีคิวและวิธีค่าค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากทั้ง 2 วิธี สามารถคาด
เดาจุดขาดเสถียรภาพได้สอดคล้องกัน แต่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของ
มิดเดิลบрукจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนน้อยกว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง
เมื่อระบบที่พิจารณามีการเพิ่มจำนวนของโหลดที่นำมาต่อแบบขนานมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ไม่
จำเป็นต้องพิจารณาหาแบบจำลองของระบบใหม่ทั้งหมด สำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์
เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้อาศัยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบน
คอมพิวเตอร์และผลจากชุดทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามการยืนยันผลจากชุดทดสอบนั้นจำเป็นต้อง
ทราบค่าพารามิเตอร์ที่ถูกตั้งของชุดทดสอบก่อน ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงมีการหา
ค่าพารามิเตอร์ของชุดทดสอบโดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่มีชื่อเรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตาม
เชิงปรับตัว จากการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพโดย
อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบрукสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพได้
อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์บน
คอมพิวเตอร์และผลจากชุดทดสอบ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา ศุภกมล กล้าสงคราม
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ก้องพันธ์ อารีรักษ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม เทพพนม ไชยวัฒน์

JUTHATIP KLASONGKRAM : STABILITY ANALYSIS OF AC-DC
POWER SYSTEM PARALLELED CONSTANT POWER LOADS USING
MIDDLEBROOK'S CRITERIA. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
KONGPAN AREERAK, Ph.D., 198 PP.

STABILITY ANALYSIS/ CONSTANT POWER LOAD/BUCK CONVERTER/
DQ MODELING/GSSA MODELING

The thesis presents the stability analysis of AC – DC power system feeding paralleled controlled buck converters. These loads behave as a constant power load that can degrade the system stability. Both eigenvalue theorem and Middlebrook's criteria were used for the stability analysis via the proposed model derived from the generalized state space averaging and DQ methods. However, the advantage of Middlebrook's criteria is very flexible. This is because when other loads are connected to the feeder, the derived model is required only for the added load. In term of eigenvalue theorem, for this case, the model of the whole system has to be derived. As for the validation of stability results, the simulation and experimental results were used. Moreover, the adaptive tabu search has also applied to identify the system parameters of the testing rig. From the results, good agreements between the analytical, simulation, and experiment results can be achieved.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature จตุทิพย์ คลาสองคราม

Advisor's Signature ดร. กงปาน อเรอระก

Co-Advisor's Signature ดร. กงปาน อเรอระก

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ทองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทานรายงาน วิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นกำลังใจและเป็นแบบอย่างที่ดีในด้านการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ ดร.เทพพนม โสภานเพิ่ม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้แนะนำ และแนะแนวทางในการทำวิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงาน วิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

คณาจารย์ เลขานุการและผู้ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความรู้ทางวิชาการ การติดต่อประสานงานและข้อคิดในด้านต่าง ๆ อย่างดียิ่งมาโดยตลอด

คุณบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษา อำนวยความสะดวกในการทำงาน การใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดต่าง ๆ รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อนพี่น้องบัณฑิตศึกษาในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุมทุกท่านที่ให้คำปรึกษาให้กับผู้วิจัยอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ร่วมทั้งญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้กำลังใจ อบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

จุฑาทิพย์ กล้าสงคราม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้นของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อ เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ.....	8
2.4 สรุป.....	11
3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	13
3.1 บทนำ.....	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุม.....	13
3.2.1	การแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transform)	15
3.2.2	การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ มายังแกน dq	16
3.2.3	ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่ง	17
3.2.4	ตัวเก็บประจุของสายส่ง	19
3.2.5	แบบจำลองของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น	21
3.2.6	วงจรสมมูลดีคิวของระบบรวม	25
3.2.7	การพิสูจน์หาแบบจำลองของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ที่ไม่มีการควบคุม	27
3.2.8	การหาค่าในสถานะคงตัว	36
3.2.9	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	38
3.3.	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม	40
3.3.1	การทำให้เป็นเชิงเส้น	44
3.3.2	การคำนวณค่าในสถานะคงตัว	47
3.3.3	การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	49
3.3.4	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	53
3.4	สรุป	56
4	การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	58
4.1	บทนำ.....	58
4.2	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	58
4.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง	59
4.4	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูก	60
4.5	การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ	69
4.6	สรุป	71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	ระบบไฟฟ้ากำลังเอชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์	
	ที่มีการควบคุมขนานกัน	72
5.1	บทนำ.....	72
5.2	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง	
	เอชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์	
	ที่มีการควบคุมขนานกัน	72
5.2.1	การทำให้เป็นเชิงเส้น	77
5.2.2	การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว	81
5.2.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	82
5.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชียเป็นดีซีที่มีโหลด	
	เป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุมขนานกัน	84
5.3.1	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง	85
5.3.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูค.....	87
5.3.3	การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ	89
5.4	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชียเป็นดีซีที่มีโหลด	
	เป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุมขนานกันมากกว่า 2 ชุด	
	ด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูค	91
5.4.1	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกรณี	
	ที่มีโหลดขนานกัน 3 ชุด.....	91
5.4.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกรณี	
	ที่มีโหลดขนานกัน 4 ชุด.....	93
5.5	สรุป	95
6	การสร้างชุดทดสอบ.....	97
6.1	บทนำ.....	97
6.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มี โหลดตัวต้านทาน	97
6.2.1	ภาพรวมของระบบ	97

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2.2	ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดตัวต้านทาน	99
6.3	วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดตัวต้านทาน	100
6.3.1	ภาพรวมของระบบ	100
6.3.2	การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดตัวต้านทาน	101
6.3.3	การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	106
6.3.4	วงจรขยายสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนสวิตซ์ของ วงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	107
6.3.5	ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดตัวต้านทาน	108
6.4	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม	110
6.4.1	ภาพรวมของระบบ	110
6.4.2	ชุดทดสอบวงจรแหล่งจ่ายสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	111
6.4.3	ชุดทดสอบวงจรตรวจจับ	112
6.4.4	การเขียน โปรแกรมตัวควบคุมพีไอด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	113
6.4.5	ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม	115
6.5	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน	116
6.5.1	ภาพรวมของระบบ	116
6.5.2	ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน	117
6.6	สรุป	118
7	การระบุเอกลักษณ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว	120
7.1	บทนำ.....	120

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.2 ระบบที่พิจารณา	120
7.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ด้วยเครื่องมือวัด.....	122
7.4 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์.....	125
7.4.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแส สามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน	125
7.4.2 การทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มี โหลดตัวต้านทานด้วยชุดทดสอบจริง	130
7.4.3 การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัว.....	131
7.5 สรุป	142
8 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง.....	144
8.1 บทนำ.....	144
8.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง	144
8.3 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ	148
8.4 สรุป	154
9 สรุปและข้อเสนอแนะ	156
9.1 สรุป	156
9.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	159
รายการอ้างอิง.....	160
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวัตน์ – ราวสัน สำหรับคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและค่าในสถานะอยู่ตัว.....	162
ภาคผนวก ข. บล็อกการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง บนโปรแกรม MATLAB	166
ภาคผนวก ค. โปรแกรมการสร้างสัญญาณพัลส์ด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	169

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	176
ประวัติผู้เขียน	198



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	6
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ต่อระบบไฟฟ้าและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ	8
3.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1.....	38
3.2 พารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.18.....	54
4.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1.....	68
5.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1.....	82
7.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ	123
7.2 ผลการวัดค่าความเหนี่ยวนำ	124
7.3 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 7.2.....	129
7.4 ขอบเขตพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด.....	136
7.5 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น	137
7.6 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง	138
7.7 การทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น	139
7.8 การทดสอบค่าปรับลดรัศมี	139
7.9 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบจำนวน 100 รอบ ทั้งหมด 5 ครั้ง	141
8.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 8.1.....	145

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ ที่ไม่มี การควบคุม.....14
3.2	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน $\alpha\beta$15
3.3	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq16
3.4	ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส17
3.5	วงจรสมมูลคิวิที่พิจารณาตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของ สายส่งกำลังไฟฟ้า.....19
3.6	ตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า19
3.7	วงจรสมมูลคิวิที่พิจารณาตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....21
3.8	วงจรเรียงกระแสสามเฟสและความต้านทานมุมเคลื่อน21
3.9	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์22
3.10	วงจรสมมูลคิวิของระบบทางฝั่งแหล่งจ่ายสามเฟส.....25
3.11	แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงคิวิ26
3.12	ตัวต้านทานอนุกรมตัวเหนี่ยวนำในสายส่ง27
3.13	วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนคิวิ27
3.14	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์30
3.15	สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส36
3.16	ผลการตอบสนองเมื่อวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ (d) เท่ากับ 0.6 (60 %).....39
3.17	ผลการตอบสนองเมื่อวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ (d) เท่ากับ 0.8 (80 %).....40
3.18	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ต่อกับวงจรแปลงผันแบบบักก์ ที่มีการควบคุม41
3.19	วงจรสมมูลของระบบกรณีวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุม.....42
3.20	รูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า49
3.21	รูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 ผลการตอบสนองของ V_o และ V_{dc} ของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o^* จาก 30 V เป็น 35 V.....	55
3.23 ผลการตอบสนองของ V_o และ V_{dc} ของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o^* จาก 35 V เป็น 40 V.....	55
4.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม.....	59
4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง.....	60
4.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม.....	61
4.4 วงจรที่พิจารณาทางฝั่งแหล่งจ่าย.....	61
4.5 วงจรที่พิจารณาทางด้านฝั่ง โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม.....	64
4.6 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in}	68
4.7 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บน คอมพิวเตอร์ เมื่อกำหนด $V_o^* = 44$ V.....	69
4.8 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บน คอมพิวเตอร์ เมื่อกำหนด $V_o^* = 46$ V.....	70
4.9 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บน คอมพิวเตอร์ เมื่อกำหนด $V_o^* = 48$ V.....	70
5.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน.....	73
5.2 วงจรสมมูลบนแกนดีคิวเมื่อ กำหนด $\phi_1 = \phi$	73
5.3 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิวรวมถึง ตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	75
5.4 ผลการตอบสนอง V_{o1} , V_{o2} และ V_{dc} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_{o1}^* และ V_{o2}^* จาก 15 V ไปเป็น 20 V.....	83
5.5 ผลการตอบสนอง V_{o1} , V_{o2} และ V_{dc} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_{o1}^* และ V_{o2}^* จาก 20 V ไปเป็น 25 V.....	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง เมื่อกำหนด $V_{o1}^* = 20 \text{ V}$	85
5.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง เมื่อกำหนด $V_{o1}^* = 25 \text{ V}$	86
5.8 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} เมื่อคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลด วงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 1 เท่ากับ 20 V	88
5.9 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} เมื่อคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลด วงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 1 เท่ากับ 25 V	88
5.10 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บน คอมพิวเตอร์ เมื่อกำหนด $V_{o1}^* = 20 \text{ V}$ และ $V_{o2}^* = 40 \text{ V}$	89
5.11 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บน คอมพิวเตอร์ เมื่อกำหนด $V_{o1}^* = 20 \text{ V}$ และ $V_{o2}^* = 42 \text{ V}$	90
5.12 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บน คอมพิวเตอร์ เมื่อกำหนด $V_{o1}^* = 20 \text{ V}$ และ $V_{o2}^* = 44 \text{ V}$	90
5.13 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} กรณีโหลด วงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดนานกัน 3 ซูด	92
5.14 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วย การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์	92
5.15 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} กรณีโหลด วงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดนานกัน 4 ซูด	94
5.16 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วย การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์	94
6.1 วงจรสำหรับทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดตัวต้านทาน	98
6.2 ชุดแหล่งจ่าย Chroma Programmable 3-Phase AC Source	99
6.3 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน	99
6.4 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน	100
6.5 วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีโหลดตัวต้านทาน	101
6.6 อุปกรณ์สวิตซ์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.7	ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคค์..... 104
6.8	ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัคค์..... 105
6.9	ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบัคค์..... 105
6.10	ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATMEGA2560..... 106
6.11	วงจรร่วมระหว่างวงจรจุดชนวนเกทกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์..... 108
6.12	ชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดตัวต้านทาน..... 108
6.13	ผลการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่การทำงานของสวิตช์จาก 20% เป็น 30%..... 109
6.14	ผลการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่การทำงานของสวิตช์จาก 50% เป็น 40%..... 109
6.15	ชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม..... 111
6.16	ชุดทดสอบวงจรแหล่งจ่ายสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์..... 112
6.17	โครงสร้างวงจรตรวจจับแรงดัน..... 112
6.18	โครงสร้างวงจรตรวจจับกระแส..... 113
6.19	ผลการตอบสนองของ V_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o^* จาก 20 V เป็น 30 V..... 115
6.20	ชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน..... 116
6.21	ผลการตอบสนองของ V_{o1} และ V_{o2} เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{o1}^* จาก 20 V เป็น 30 V และ V_{o2}^* จาก 20 V เป็น 30 V..... 117
6.22	ผลการตอบสนองของ V_o และ V_{o2} เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{o1}^* จาก 15 V เป็น 25 V และ V_{o2}^* จาก 30 V เป็น 40 V..... 118
7.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน..... 121
7.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน..... 121
7.3	วงจรทดสอบการหาค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ..... 122
7.4	เครื่องมือวัด LCR METER รุ่น 897 จากบริษัท BK PRECISION..... 124

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.5 วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนคิกิวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดตัวต้านทาน.....	126
7.6 ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต	130
7.7 ผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตจากชุดทดสอบ	131
7.8 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา.....	132
7.9 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0	133
7.10 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่.....	133
7.11 กำหนดค่า S_0 ใหม่.....	134
7.12 กลไกการเดินย้อนรอย	134
7.13 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาพารามิเตอร์ของ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน	135
7.14 ผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี	142
8.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	145
8.2 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงด้วย วิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจง.....	146
8.3 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง ด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก	147
8.4 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วย การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์	148
8.5 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดทดสอบจริง	149
8.6 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง ด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก เมื่อ $V_s = 35 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$	150
8.7 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บน คอมพิวเตอร์ เมื่อ $V_s = 35 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$	151
8.8 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดทดสอบจริง เมื่อ $V_s = 35 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$	151

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.9 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง ด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก เมื่อ $V_s = 45 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$	152
8.10 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บน คอมพิวเตอร์ เมื่อ $V_s = 45 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$	153
8.11 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดทดสอบจริง เมื่อ $V_s = 45 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$	153
ข.1 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีตัวควบคุม	167
ข.2 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม	167
ข.3 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน	168
ข.4 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดตัวต้านทาน	168

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังโดยส่วนใหญ่จะเป็นวงจรแปลงผันกำลัง เช่น วงจรแปลงผันไฟฟ้าดิซีสเป็นดิซีส เอซีสเป็นดิซีส ที่มีการควบคุมสัญญาณออกให้เป็นที่ไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังมีประสิทธิภาพสูง การดูแลรักษาต่ำ และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย จึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant Power Load: CPL) (Emadi, Khaligh, Rivetta, and Williamson, 2006) ซึ่งโหลดในลักษณะนี้จะมีค่าเป็นตัวต้านทานติดลบ (negative impedance) ต่อระบบ โดยรวม (R.D. Middlebrook, 1997; A. Emadi, B. Fahimi, and M. Ehsani, 1999) เมื่อนำโหลดชนิดดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังอาจจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรงได้ ซึ่งการขาดเสถียรภาพจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมแย่งจากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษา และการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยอาศัยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อสามารถนำไปใช้ในการคาดเดาจุดการทำงานของระบบที่เกิดการขาดเสถียรภาพ จากงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการนำเสนอแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นอยู่ด้วยกัน 2 แนวทาง โดยแนวทางแรกเป็นการพิจารณาเสถียรภาพของระบบโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และแนวทางที่ 2 ใช้เกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูค แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระบบที่พิจารณามีการเพิ่มจำนวนของโหลดที่มาต่อขนานมากขึ้น จะทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพที่อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงมีความยุ่งยาก และซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เพราะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นที่ผ่านการพิสูจน์จากระบบที่เชื่อมถึงกันทั้งหมด ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูค โดยอาศัยการวิเคราะห์เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) และอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) โดยพิจารณาจากจำนวนของโหลดที่เพิ่มขึ้นแต่การคำนวณหาเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของระบบยังคงเหมือนเดิม และในส่วนของคำนวณหาอินพุตอิมพีแดนซ์จะพิจารณาเหมือนมิมพีแดนซ์ต่อขนานกัน (Xiaogang Feng, Jinjun Liu and Fred, 2002; Antonino Riccobono and Enrico Santi, 2014) โดยที่ไม่จำเป็นต้องพิจารณาการวิเคราะห์ระบบทั้งหมด ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีความซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อมีโหลดเพิ่มขึ้นมาหลาย ๆ ชุด สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ และผลการยืนยันจาก

ชุดทดสอบจริง เพื่อให้วิธีการที่ได้รับการพิสูจน์ในทางทฤษฎีมีความถูกต้องแม่นยำ และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นานกัน

1.2.2 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นานกัน

1.2.3 เพื่อศึกษาและดำเนินการสร้างชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นานกันสำหรับนำมายืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพได้

1.2.4 เพื่อศึกษาและดำเนินการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องจากชุดทดสอบ โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์แบบดั้งเดิม

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้นของงานวิจัย

1.3.1 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blocksets) SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

1.3.2 ระบบสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นานกัน

1.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สร้างขึ้นร่วมกันระหว่างวิธีดีคิว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

1.3.4 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคกซ์ได้ใช้วิธีการแบบดั้งเดิมที่อาศัยความรู้จากทฤษฎีระบบควบคุม

1.3.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ 2 วิธี คือ อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก

1.3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

1.3.7 การตรวจสอบความถูกต้องเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์และผลจากชุดทดสอบ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ขนานกันเท่านั้น

1.4.2 การทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซ์จะพิจารณาในช่วงโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (continuous conduction mode: CCM)

1.4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอาศัยแบบจำลองที่ทำให้เป็นเชิงเส้น (linearized mode) ภายใต้ทฤษฎีค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) และเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก (middlebrook criterion)

1.4.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกรณีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ขนานกัน 3 ชุดและ 4 ชุด อาศัยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก (middlebrook criterion)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ขนานกัน ด้วยการอาศัยทฤษฎีค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) และเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก (middlebrook criterion)

1.5.2 ได้องค์ความรู้การสร้างชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ขนานกัน

1.5.3 ได้องค์ความรู้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์

1.5.4 ได้บทความวิจัยเผยแพร่ในวารสารหรือการประชุมวิชาการระดับชาติ และ/หรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 9 บท โดยแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้
 บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทศวรรษกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้าและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

บทที่ 3 นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุม และมีการควบคุม โดยอาศัยวิธีดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์

บทที่ 4 นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิล บรูก และยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์

บทที่ 5 นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน โดยอาศัยวิธีดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ รวมทั้งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก ยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ และมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยอาศัยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูกเมื่อระบบที่พิจารณามีโหลดที่นำมาต่อแบบขนานเพิ่มขึ้นเป็น 3 ชุด และ 4 ชุด

บทที่ 6 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน เพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบ

บทที่ 7 นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว เพื่อให้ทราบค่าพารามิเตอร์ของชุดทดสอบที่มีความถูกต้องเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง

บทที่ 8 นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง นั่นคือวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก

บทที่ 9 บทสรุปและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวกมีอยู่ 4 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก. โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราฟสัน สำหรับคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและค่าในสภาวะอยู่ตัว ภาคผนวก ข. บล็อกการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB ภาคผนวก ค. โปรแกรมการสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เอชเป็นดีซีที่โหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นจึงมีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาผู้ทำการวิจัยและค้นคว้าเกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อเสถียรภาพของระบบ และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ และยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ทำการสำรวจและศึกษางานวิจัยในแขนงดังกล่าว เพื่อนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ในงาน ซึ่งจะนำเสนอการสำรวจวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยในแต่ละหัวข้อจะนำเสนอเรียงตามลำดับปีที่พิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

งานวิจัยวิทยานิพนธ์มุ่งเน้นที่การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพและหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบควบคุม นอกจากนี้ยังสามารถนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้กับอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของระบบ ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1997	Mahdavi, J., Emaadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M.	บทความนี้ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized state-space averaging)
1998	Han, S.B., Choi, N.S., Rim, C.T., and Cho, G.H.	บทความนี้ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสโดยการแปลงวงจรให้อยู่บนแกนดีคิว และวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของเอาต์พุตกระแสตรง เช่น กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าปรากฏ และตัวประกอบกำลังของระบบ
2004	Emadi, A.	บทความนี้ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโหนดอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2004	Mahdavi, J., Emadi, A., Geoffrey, A., and Williamson, G.A.	บทความนี้ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแบบมัลติคอนเวอร์เตอร์ของเรือไฟฟ้าด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	บทความนี้ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีดีคิว ในระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้เทคนิคการควบคุมด้วยพีดีบีเบิลยูเอ็ม และวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	บทความนี้ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีสี่ที่มีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกับตัวต้านทาน และวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง
2011	Ruttanee, P., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	บทความนี้ นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง เอซีเป็นดิซีสี่ควบคุมได้ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ด้วยวิธีคิดวิเคราะห์ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2015	Javaid, U., and Dujic, D.	บทความนี้ นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดิซีสี่เป็นดิซีสี่ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

จากตารางที่ 2.1 พบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดิซีสี่เป็นดิซีสี่นิยมใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และการพิสูจน์หาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์นิยมใช้วิธีดีคิว เนื่องจากวิธีดีคิวเหมาะกับระบบสามเฟสและทำให้แบบจำลองที่ได้มีความซับซ้อนน้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้วิธีการผสมผสานระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน โดยจะใช้วิธีดีคิวสำหรับวิเคราะห์แบบจำลองในส่วนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวิเคราะห์วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้ากำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

เนื่องจากปัจจุบัน วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน ซึ่งเมื่อนำวงจรดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีผ่านวงจรกรองจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของตัวควบคุมและอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าได้ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังและการวิเคราะห์เสถียรภาพจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถแสดงเป็นปรัทัศน์วรรณกรรมสำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้าและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1976	Middlebrook, R.D.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวนี้จะมีพฤติกรรมเป็นค่าความต้านทานติดลบและส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ
1995	Wildrick, M., Lee, C., Cho, H., and Choi, B.	บทความนี้เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยพิจารณาเอาต์พุตอิมพีแดนซ์และอินพุตอิมพีแดนซ์ร่วมกับเกณฑ์เสถียรภาพของไนคริสต์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีสองระบบเชื่อมต่อกันแบบคาสเคด ผ่านแผนภาพโบลเดและแผนภาพโพลาร์
2006	Emadi, A., Khaling, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A.	บทความนี้นำเสนอผลจากแอมพีแดนซ์เชิงลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อความไม่มีเสถียรภาพของระบบยานยนต์ไฟฟ้า รวมทั้งเสนอแนวคิดการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังในระบบยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้าและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2006	Liutanakul, P., Pierfederici, S., Bilal, A., and Nahid-Mobarakeh, B.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอินเวอร์เตอร์มอเตอร์ขับเคลื่อน โดยอาศัยการวิเคราะห์จากอิมพีแดนซ์ของระบบด้วยแผนภาพในควิสต์และแผนภาพโบเด
2008	Han, L., Wang, J., Griffio, A. and Howe, D.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบสัญญาณขนาดเล็กของระบบพลังงานไฟฟ้าไฮบริดจกระแสดับสำหรับเครื่องบินด้วยวิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจงโดยใช้เมตริกซ์จาโคเบียนของระบบ
2009	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., de Lillo, L., Asher, G.M., Thomas, D.W.P., Watson, A., and Wu, T.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของสัญญาณขนาดเล็กของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีสำหรับระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีคิ่วในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและมีการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยชุดทดสอบ
2012	Zhao, M., Ying, X., Liu, T., and Liu, J.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาเอาต์พุตอิมพีแดนซ์และอินพุตอิมพีแดนซ์ของระบบโซลาร์เซลล์ไฟฟ้า และพิจารณาเสถียรภาพจากอิมพีแดนซ์ของระบบด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูก

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้าและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2012	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., de Lillo, L., Thomas, D.W.P.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของสัญญาณขนาดเล็กของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีสำหรับระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินแบบไฮบริดจ์โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีคิวในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง พิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อเสถียรภาพของระบบ และมีการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยชุดทดสอบ
2014	Riccobono, A., and Santi, E.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบสองระบบที่เชื่อมต่อกันแบบคาสเคด ด้วยวิธีการต่าง ๆ โดยอาศัยอิมพีแดนซ์ของระบบ และพิจารณาอินพุตอิมพีแดนซ์ของระบบเมื่อมีการขนานกันของโหลด
2015	De Cristofaro, M., Femia, N., Petrone, G., Buticchi, G., De Carne, G., and Liserre, M.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อเสถียรภาพของหม้อแปลงอัจฉริยะ พิจารณาผลของค่าความจุไฟฟ้า ค่าความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ และค่าความเหนี่ยวนำในวงจรกรองต่อเสถียรภาพของระบบ
2017	Aldhaheri, A., and Etemadi, A.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีที่มีการเชื่อมต่อกันแบบคาสเคด โดยใช้เกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก์ที่ได้ อาศัยเอาต์พุตอิมพีแดนซ์และอินพุตอิมพีแดนซ์ของระบบในการวิเคราะห์ และนำเสนอแนวทางการลดขนาดของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้าและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2018	Ying-xi, L., Xin-hua, M., Hong-juan, G., and Hua, J.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวบนเครื่องบิน โดยพิจารณาการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงดันและกระแสที่ไหลผ่านโหลด และเสนอแนวทางที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น 2 แนวทาง คือ การเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง และการลดแรงดันเอาต์พุตของระบบ

จากตารางที่ 2.2 เป็นการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังและการวิเคราะห์เสถียรภาพ ซึ่งพบว่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังที่เป็นวงจรแปลงผันกำลังประเภทต่าง ๆ เมื่อมีการควบคุมสัญญาณขาออกให้เป็นไปตามความต้องการจะทำให้วงจรแปลงผันดังกล่าวนั้นมีลักษณะเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดในลักษณะนี้จะมีค่าเป็นตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม โดยทั่วไปโหลดวงจรแปลงผันนี้จะถูกต่อเข้ากับวงจรกรองของระบบไฟฟ้า เมื่อเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวหรือมีค่าเป็นตัวต้านทานติดลบจะทำให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณจากวงจรกรองหรือระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งการขาดเสถียรภาพจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบควบคุมหรือสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมแฉ่ง และอาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์การสวิตซ์ได้ จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อลดเอาจุดขาดเสถียรภาพของระบบ โดยแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้ศึกษาจะมี 2 แนวทาง คือ การวิเคราะห์ผ่านโดเมนความถี่ที่ได้อาศัยอิมพีแดนซ์ของระบบ และการวิเคราะห์ในระนาบเอสทีอาสัยค่าเจาะจงของระบบ

2.4 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 นี้ เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีด้วยวิธีคิว การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยงานวิจัยในอดีตต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอในบทนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคส์ที่มีการควบคุม
ขนานกันที่ได้ทำในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างยิ่ง และยังสามารถพัฒนาสำหรับการวิเคราะห์
เสถียรภาพของระบบจริงให้มีความถูกต้องแม่นยำได้ต่อไป



บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์

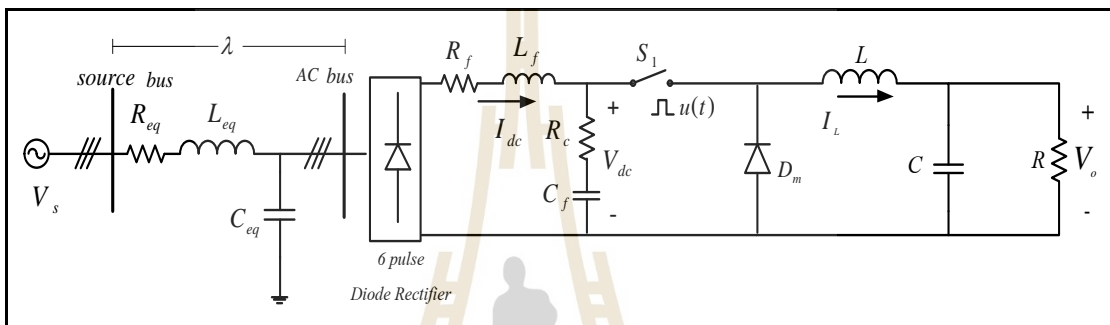
3.1 บทนำ

ในการศึกษาและทำวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงคือ พฤติกรรมการทำงานและพลวัตของระบบ เนื่องจากมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการนำไปใช้ต่อยอดสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไป ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับพฤติกรรมการทำงานและพลวัตของระบบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในที่นี้คือวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ให้มีความถูกต้องและแม่นยำนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการนำไปใช้ในการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบที่จะมีการนำเสนอในบทที่ 4 ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้พิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีคิดร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized State-Space Averaging Approach, GSSA) เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และในบทนี้ยังได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการพิสูจน์หาแบบจำลองนั้นก็คือทฤษฎีพื้นฐานการแปลงแกนดีคิวด้วยการแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transform) และการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ มายังแกน dq นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นในบทนี้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำหรับพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นั้นคือการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกันที่จะนำเสนอในบทที่ 5

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุม

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่าย

กำลังไฟฟ้าสามเฟสสมดุล โดยที่ V_s คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล, R_{eq} , L_{eq} และ C_{eq} คือความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ของสายส่งกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ ส่วนที่ 2 ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 คือ วงจรกรองสัญญาณดิซี โดยที่ L_f , R_f , C_f และ R_c คือความเหนี่ยวนำ ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า และความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ตามลำดับ และส่วนสุดท้ายคือ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มี โหลดเป็นตัวต้านทาน



รูปที่ 3.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุม

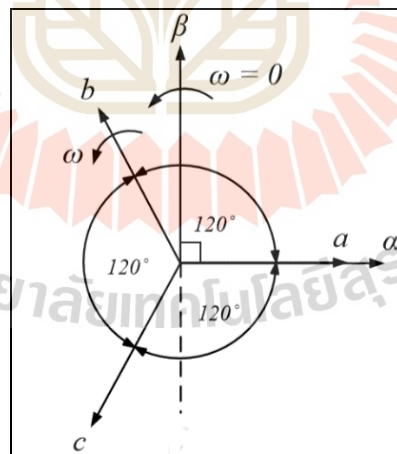
การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มี โหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ระบบไฟฟ้างกล่าวมามีการทำงานของสวิตช์ ในวงจรแปลงผันและวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีการทำงานตามฟังก์ชันของเวลา แบบจำลองของระบบจึงเป็นแบบจำลองที่ขึ้นกับเวลา (time varying model) จะทำให้การวิเคราะห์ระบบนั้นมีความซับซ้อน ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยวิธีการแปลงดีคิว (DQ method) ซึ่งเหมาะกับระบบไฟฟ้าสามเฟส (S.B. Han, N.S. Choi, C.T. Rim, and G.H. Cho, 1998) ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized State-Space Averaging method: GSSA method) ซึ่งเหมาะกับวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี (A. Emadi, 2004) วิธีการดังกล่าวจะทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา (time invariant model) และทำให้การวิเคราะห์ระบบมีความสะดวกมากขึ้น ซึ่งในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการแปลงดีคิวสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลที่มี วงจรสมดุลสายส่งผ่านวงจรเรียงกระแสชนิดเต็มคลื่น ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับ วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 3.1 จะต้องพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของแหล่งจ่ายที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุลที่มีวงจรสมดุลสายส่งผ่านวงจรเรียงกระแสชนิดเต็มคลื่น โดยใช้วิธีดีคิวในการหา

แบบจำลอง และส่วนที่สองคือโพลด์ที่เป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการหาแบบจำลอง

หลักการของการแปลงดีคิว คือการแปลงปริมาณใด ๆ บนแกน 3 เฟส ให้เป็นปริมาณบนแกน 2 เฟส โดยมีแกนหมุนอ้างอิงร่วมกัน ทำให้มุมมองของความเร็วสัมพันธ์ (velocity relationship) ระหว่างแกน 3 เฟสและแกนดีคิวมีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้พารามิเตอร์ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาเปรียบเสมือนเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา โดยมีรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.2.1 การแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transform)

การแปลงของคลาร์กเป็นการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ โดยวิธีการแปลงของคลาร์กแสดงได้ด้วยแผนภาพเวกเตอร์ดังรูปที่ 3.2 ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณาการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสที่มีส่วนประกอบลำดับเฟสบวก (positive sequence) ซึ่งมีมุมห่างกัน 120° หรือ $2\pi/3$ เรเดียน และแกน $\alpha\beta$ จะต้องทำมุมตั้งฉากกัน แกนหมุน $\alpha\beta$ หรือแกนหมุนอ้างอิง คือแกนที่อยู่กับที่ ($\omega=0$) โดยกำหนดให้แกน α วางตัวในแนวเดียวกันกับเฟส a และแกน β นำหน้าแกน α อยู่ 90° สมการการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ พิจารณาได้ดังสมการที่ (3-1) เมื่อ f_{abc} คือ ปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสใด ๆ ซึ่งอาจแทนด้วยแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า เป็นต้น



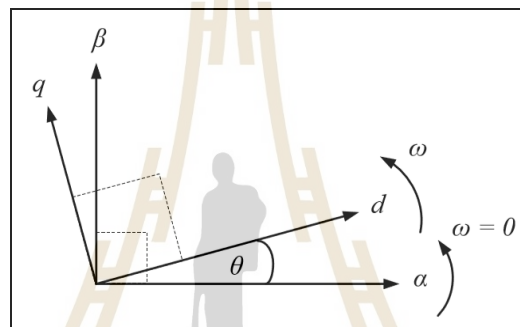
รูปที่ 3.2 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน $\alpha\beta$

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

เมื่อ k คือ ตัวปรับคูณการแปลง โดยงานวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวปรับคูณแบบคงค่ากำลัง (power conserving convention) ซึ่ง มี ค่า $k = \sqrt{2/3}$ (K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, 2008)

3.2.2 การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ มายังแกน dq

การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ (แกนหยุดนิ่ง) ให้อยู่บนแกน dq (แกนหมุนจะพิจารณาโดยใช้แผนภาพเวกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของสมการระหว่างแกน $\alpha\beta$ และแกน dq แสดงดังสมการที่ (3-2) เมื่อ θ คือ มุมการหมุนสำหรับการแปลงดีควิมิต่าเท่ากับ ωt



รูปที่ 3.3 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

จากสมการที่ (3-1) และ (3-2) จะได้สมการสำหรับการแปลงปริมาณ 3 เฟส ให้เป็นปริมาณ 2 เฟส บนแกนดีควิมิต่า คือ

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \mathbf{K} \cdot \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

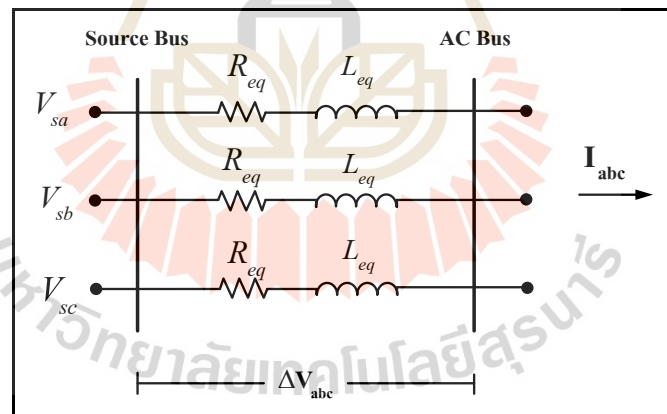
เมื่อ \mathbf{K} คือ เมตริกซ์การแปลงดีควิมิต่า มีค่าเท่ากับ

$$\mathbf{K} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

โดยที่ θ คือ มุมระหว่างแกน α และแกน d

ลำดับต่อไปจะนำการแปลงดีคิวมาพิจารณาร่วมกับส่วนประกอบต่างๆ ในส่วนของแหล่งจ่ายที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุลที่มีวงจรสมมูลสายส่งผ่านวงจรเรียงกระแสชนิดเต็มคลื่น ของระบบในรูปที่ 3.1 ที่ประกอบด้วย ตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ รวมถึงวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.3 ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่ง



รูปที่ 3.4 ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส

จากรูปที่ 3.4 ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า (Ong, 1998) สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลดีคิวได้โดยเริ่มต้นพิจารณาจากแรงดันที่ตกคร่อมสายส่ง (ΔV_{abc}) ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (3-4) ดังนี้

$$\Delta \mathbf{V}_{abc} = R_{eq} \mathbf{I}_{abc} + L_{eq} \left(\frac{d\mathbf{I}_{abc}}{dt} \right) \quad (3-4)$$

จากสมการที่ (3-4) จะเห็นว่ามิถุนันตัวแปรที่เป็นปริมาณ 3 เฟส ปรากฏอยู่ ซึ่งสามารถแปลงให้เป็นปริมาณ 2 เฟส บนแกนดิกิวโดยอาศัยเมตริกซ์การแปลงดิกิว (\mathbf{K}) ได้ดังนี้

$$\mathbf{K}^{-1} \Delta \mathbf{V}_{dq} = R_{eq} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq}) + L_{eq} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq})$$

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{K}^{-1} \Delta \mathbf{V}_{dq} = R_{eq} (\mathbf{K} \cdot \mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq}) + \mathbf{K} \cdot L_{eq} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq})$$

$$\Delta \mathbf{V}_{dq} = R_{eq} \mathbf{I}_{dq} + L_{eq} \mathbf{K} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq})$$

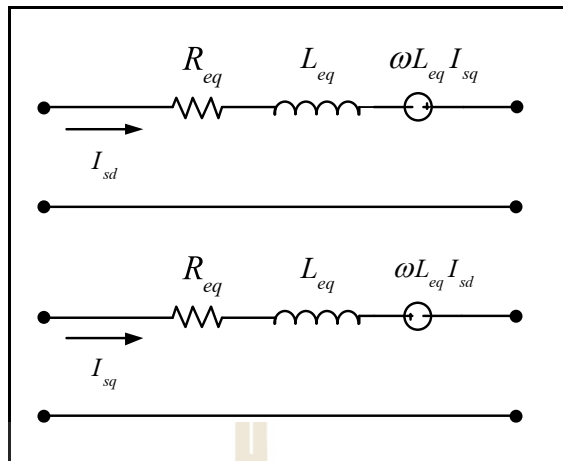
$$\Delta \mathbf{V}_{dq} = R_{eq} \mathbf{I}_{dq} + L_{eq} \mathbf{K} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{K}^{-1} \right) \mathbf{I}_{dq} + L_{eq} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{I}_{dq} \right)$$

เมื่อ $\mathbf{K} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{K}^{-1} \right) = \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

ดังนั้น จะได้สมการของแรงดันตกคร่อมสายส่งที่อยู่บนแกนดิกิว ดังสมการที่ (3-5) ดังนี้

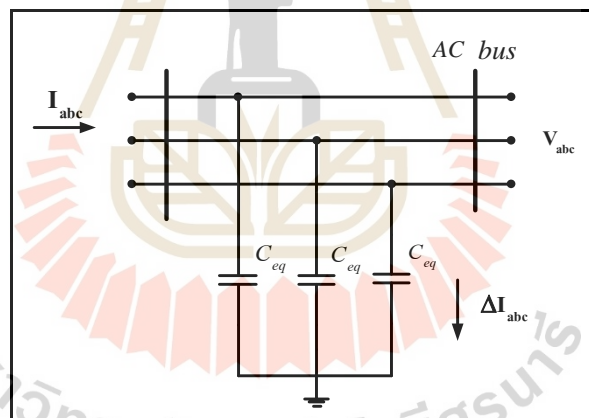
$$\Delta \mathbf{V}_{dq} = \begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \end{bmatrix} = R_{eq} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L_{eq} \begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} + \omega L_{eq} \begin{bmatrix} -I_q \\ I_d \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

จากสมการที่ (3-5) เป็นสมการที่ใช้ในการหาแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสที่อยู่บนแกนดิกิว ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปวงจรมุมโดยใช้การวิเคราะห์พื้นฐานทางไฟฟ้า จากวงจรมุมดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการแปลงตัวต้านทานอนุกรมตัวเหนี่ยวนำของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่บนแกนดิกิว ได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลคิวกวที่พิจารณาตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า

3.2.4 ตัวเก็บประจุของสายส่ง



รูปที่ 3.6 ตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.6 ตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลคิวกวได้โดยพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ $\Delta \mathbf{I}_{abc}$ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3-6) คือ

$$\Delta \mathbf{I}_{abc} = C_{eq} \frac{d}{dt} (\mathbf{V}_{abc}) \quad (3-6)$$

ทำการแปลงสมการที่ (3-6) ให้อยู่บนแกนดีควิโดยอาศัยเมตริกซ์ \mathbf{K} ได้ดังนี้

$$\mathbf{K}^{-1} \Delta \mathbf{I}_{dq} = C_{eq} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}_{dq})$$

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{K}^{-1} \Delta \mathbf{I}_{dq} = \mathbf{K} \cdot C_{eq} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}_{dq})$$

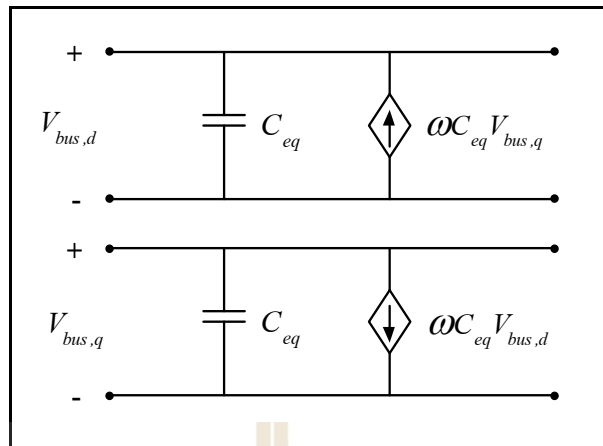
$$\Delta \mathbf{I}_{dq} = \mathbf{K} \cdot C_{eq} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1}) \mathbf{V}_{dq} + \frac{d}{dt} (\mathbf{V}_{dq})$$

$$\text{เมื่อ } \mathbf{K} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{K}^{-1} \right) = \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

จะได้สมการของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุบนแกนดีควิดังสมการที่ (3-7)

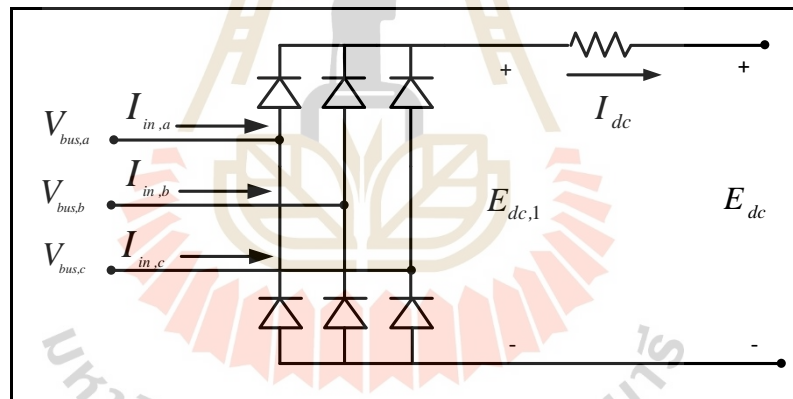
$$\Delta \mathbf{I}_{dq} = \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} = C_{eq} \begin{bmatrix} \dot{V}_d \\ V_d \\ \dot{V}_q \\ V_q \end{bmatrix} + \omega C_{eq} \begin{bmatrix} -V_q \\ V_d \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

จากสมการที่ (3-7) เป็นสมการที่ใช้ในการหาค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังสามเฟสที่อยู่บนแกนดีควิ ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปวงจรมุมโดยใช้การวิเคราะห์พื้นฐานทางไฟฟ้า จากวงจรมุมดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการแปลงตัวเก็บประจุของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสให้อยู่บนแกนดีควิ ได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลดีคิวิตีที่พิจารณาตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า

3.2.5 แบบจำลองของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น



รูปที่ 3.8 วงจรเรียงกระแสสามเฟสและความต้านทานมุมเหลื่อม

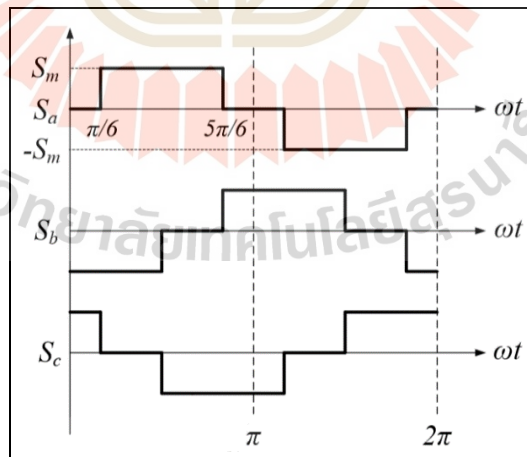
วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นสร้างขึ้นโดยใช้ไดโอด 6 ตัว แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 ทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบสามเฟสไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นจะมีไดโอดเป็นอุปกรณ์การสวิตช์ซึ่งจะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time varying model) ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังนั้นเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงอาศัยหลักการแปลงดีคิวิตีเพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดใน

วงจรเรียงกระแส โดยจะพิจารณาจากฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดและกำหนดให้การทำงานของวงจรเรียงกระแสมีสมมติฐานดังนี้

1. วงจรเรียงกระแสสามเฟสดังกล่าวทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง
2. วงจรเรียงกระแสมีแหล่งจ่ายเป็นสามเฟสสมดุล
3. ไม่พิจารณาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น
4. มุมเหลื่อมที่เกิดขึ้นจาก L_{eq} ต้องมีค่าน้อยกว่า 60 องศา

หากวงจรเรียงกระแสที่พิจารณามีลักษณะตรงตามสมมติฐานดังกล่าวจะสามารถใช้วิธีตีควในการแปลงฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอด โดยสามารถแสดงฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นได้ดังรูปที่ 3.9 และจากผลของ L_{eq} ในสายส่งกำลังไฟฟ้าที่มีการต่อวงจรเรียงกระแสสามเฟส จะทำให้เกิดมุมเหลื่อม (overlap angle) ซึ่งจะทำให้แรงดันเอาต์พุตตก ผลกระทบนี้สามารถพิจารณาแทนได้ด้วยการใส่ตัวต้านทาน R_μ ทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส (Mohan, Underland, and Robbins, 2003) โดยที่ค่า R_μ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-8)

$$R_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (3-8)$$



รูปที่ 3.9 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

จากรูปที่ 3.9 สามารถแสดงสมการสัญญาณการสวิตช์ของไดโอดด้วยอนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังสมการที่ (3-9) เมื่อพิจารณาความถี่มูลฐานสามารถเขียนฟังก์ชันการสวิตช์ (Sakui, Fujita,

and Shioya, 1989) โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะความถี่มูลฐานและไม่คำนึงถึงฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ

$$\mathbf{S}_{abc} = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi\right) \\ \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \phi\right) \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

เมื่อ ϕ คือมุมเฟสที่บัลเอซี

ทำการแปลงฟังก์ชันการสวิตช์ให้อยู่บนแกนดีควโดยอาศัยเมตริกซ์ \mathbf{K} ดังนี้

$$\mathbf{S}_{dq} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{S}_{abc}$$

$$\mathbf{S}_{dq} = \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi - \theta) \\ \cos(\omega t + \phi - \theta) \end{bmatrix}$$

กำหนดให้ $\theta = \omega t - \frac{\pi}{2} + \phi$ จะได้ฟังก์ชันการสวิตช์ที่อยู่บนแกนดีควดั่งสมการที่

(3-10)

$$\mathbf{S}_{dq} = \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi - \phi_1) \\ \sin(\phi - \phi_1) \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

เมื่อ ϕ_1 คือ มุมเฟสของแกน d เทียบกับแกน α

พิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตและด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสในรูปที่ 3.8 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-11)

$$\mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{S}_{abc} I_{dc} \quad (3-11)$$

แปลงสมการที่ (3-11) ให้อยู่บนแกนดีคิวโดยอาศัยเมตริกซ์ \mathbf{K} จะได้สมการความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่อยู่บนแกนดีคิวดังสมการที่ (3-12) ดังนี้

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{S}_{abc} I_{dc}$$

$$\mathbf{I}_{in,dq} = \begin{bmatrix} I_{in,d} \\ I_{in,q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} \cdot I_{dc} \quad (3-12)$$

พิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิของวงจรเรียงกระแสสามเฟสในรูปที่ 3.8 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3-13) ดังนี้

$$E_{dc,1} = \mathbf{S}_{abc}^T \mathbf{V}_{bus,abc} \quad (3-13)$$

แปลงสมการที่ (3-13) ให้อยู่บนแกนดีคิวโดยอาศัยเมตริกซ์ \mathbf{K} จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่อยู่บนแกนดีคิวดังสมการที่ (3-14) ดังนี้

$$E_{dc,1} = (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{S}_{dq})^T (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}_{bus,dq})$$

$$E_{dc,1} = \mathbf{S}_{dq}^T (\mathbf{K}^{-1})^T (\mathbf{K}^{-1}) \mathbf{V}_{bus,dq} \quad (3-14)$$

เมื่อเมตริกซ์ \mathbf{K} มีคุณสมบัติเป็นออโธโกนอล (orthogonal matrix) ดังนั้น $\mathbf{K}^{-1} = \mathbf{K}^T$ จะได้

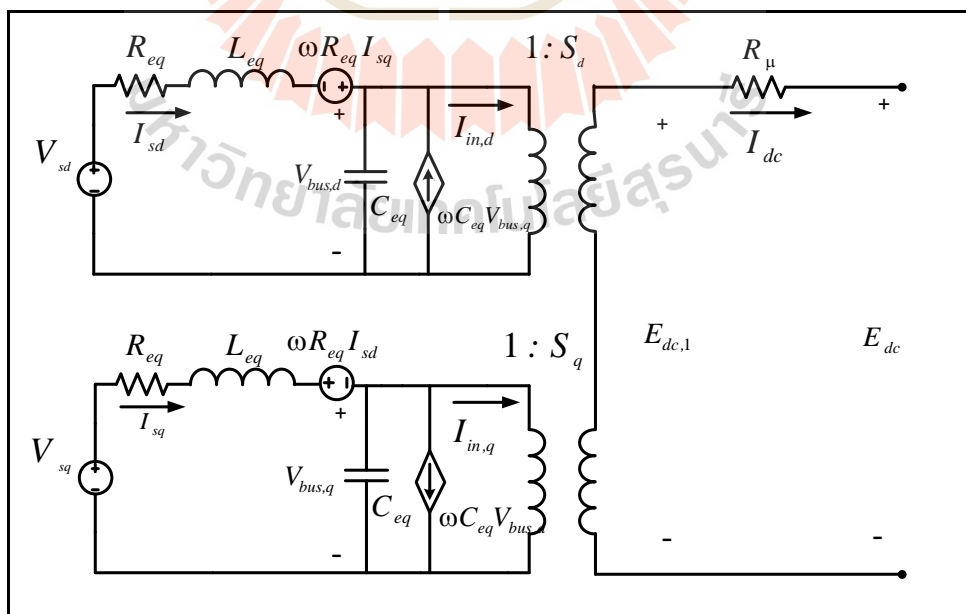
$$E_{dc,1} = \mathbf{S}_{dq}^T \mathbf{V}_{bus,dq} = \begin{bmatrix} S_d & S_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{bus,d} \\ V_{bus,q} \end{bmatrix}$$

$$E_{dc,1} = S_d V_{bus,d} + S_q V_{bus,q} \quad (3-15)$$

จากสมการที่ (3-12) และ (3-15) พบว่าเมื่อใช้วิธีดิกิวในการแปลงฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสโดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระแสและแรงดันตามลำดับ จะได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกระแสและแรงดัน ซึ่งลักษณะอัตราส่วนดังกล่าวมีลักษณะคล้ายสมการหม้อแปลงกำลังไฟฟ้า และเมื่อใช้กฎพื้นฐานทางไฟฟ้าสามารถอธิบายด้วยวงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสบนแกนดิกิวได้ดังรูปที่ 3.10 โดยที่ S_d และ S_q คำนวณได้จากสมการที่ (3-10)

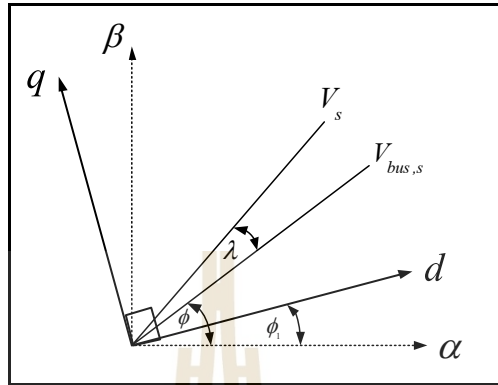
3.2.6 วงจรสมมูลดิกิวของระบบรวม

การรวมวงจรสมมูลดิกิวของตัวด้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของสายส่งตัวเก็บประจุของสายส่ง และวงจรเรียงกระแสที่สร้างขึ้นในหัวข้อที่ 3.2.3, 3.2.4 และ 3.2.5 สามารถนำมาเขียนรวมกันได้ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลบนแกนดิกิวทางฝั่งแหล่งจ่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลดิกิวของระบบทางฝั่งแหล่งจ่ายสามเฟส

จากสมการที่ (3-10) เป็นสมการการแปลงฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอด ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของสมการได้ในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว

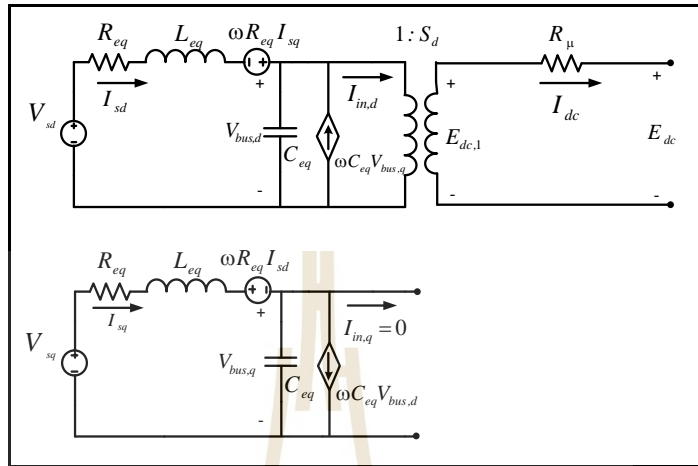
จากรูปที่ 3.11 ประกอบด้วย แกน $\alpha\beta$ ที่เป็นแกนอ้างอิงไม่มีการหมุน ซึ่งแกนดีคิวมีมุมต่างเฟสกับแกนอ้างอิงเท่ากับ ϕ_1 ส่วน V_s คือ แรงดันเฟสที่บัสแหล่งจ่าย และ V_{bus} คือ แรงดันเฟสบัสดิจิ ซึ่งประมาณให้มีมุมเฟสตรงกับฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟส (S) จากแผนภาพนี้ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้กำหนดให้แกน d มีมุมเฟสตรงกับมุมของฟังก์ชันการสวิตช์ หรือนั่นคือ กำหนดให้ ϕ_1 เท่ากับ ϕ เพื่อให้ปริมาณของฟังก์ชันการสวิตช์บนแกน q มีค่าเป็นศูนย์ เพื่อช่วยลดความซับซ้อนในแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสสามเฟส ดังนั้นฟังก์ชันการสวิตช์เขียนได้ ดังสมการที่ (3-16)

$$S_{dq} = \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

และเนื่องจากการแปลงดีคิว ใช้ตัวปรับคุณการแปลงแบบคงค่ากำลัง ดังนั้นสามารถคำนวณหาแรงดันที่บัสแหล่งจ่ายบนแกนดีคิว ($V_{s,dq}$) ได้ดังสมการที่ (3-17) ดังนี้

$$V_{s,dq} = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \cdot V_s \begin{bmatrix} \cos(\lambda) \\ \sin(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

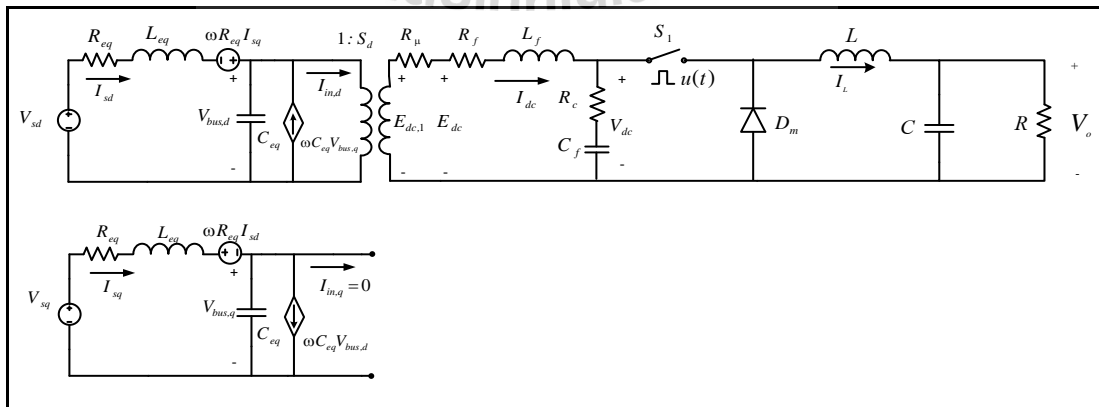
จากสมการที่ (3-16) สามารถเขียนวงจรสมมูลดีคิวกของระบบทางฝั่งแหล่งจ่ายสามเฟสได้ใหม่ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ตัวต้านทานอนุกรมตัวเหนี่ยวนำในสายส่ง

3.2.7 การพิสูจน์หาแบบจำลองของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ไม่มีการควบคุม

เมื่อทำการสร้างวงจรสมมูลดีคิวกของระบบทางฝั่งแหล่งจ่ายสามเฟสเสร็จสิ้นแล้ว ในลำดับต่อไปจะพิจารณาทางฝั่งโพลนั้นก็คือวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ไม่มีการควบคุมโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาที่เป็นผลมาจากอุปกรณ์การสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบักก์ โดยเริ่มจากการนำโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์มาเชื่อมต่อกับวงจรสมมูลดีคิวกของระบบทางฝั่งแหล่งจ่ายสามเฟส ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิวก

ทำการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าโดยอาศัยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) มาวิเคราะห์วงจรในรูปที่ 3.13 ซึ่งทำให้ได้ชุดสมการอนุพันธ์ แสดงได้ดังสมการที่ (3-18) ดังนี้

$$\left\{ \begin{array}{l} \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{array} \right. \begin{cases} I_{sd} = -\frac{R_{eq} I_{sq}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \frac{V_m \cos(\lambda)}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \\ I_{sq} = -\frac{R_{eq} I_{sd}}{L_{eq}} - \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \frac{V_m \sin(\lambda)}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \\ V_{bus,d} = \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_{dc}}{C_{eq}} \\ V_{bus,q} = \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\ I_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_{bus,d}}{L_f} - \frac{(R_\mu + R_f + R_c) I_{dc}}{L_f} - \frac{V_{dc}}{L_f} + \frac{R_c u(t)}{L_f} I_L \\ V_{dc} = \frac{I_{dc}}{C_f} - \frac{I_L u(t)}{C_f} \\ I_L = -\frac{V_o}{L} + \frac{V_{dc} u(t)}{L} \\ V_o = \frac{I_L}{C} - \frac{V_o}{RC} \end{cases} \quad (3-18)$$

เมื่อ $u(t)$ คือฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัทคัท

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-18) พบว่ามีพารามิเตอร์ $u(t)$ ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา (time varying) ที่เกิดจากพฤติกรรมการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัทคัท จึงต้องทำการแปลงแบบจำลองให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา โดยใช้วิธีวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาจากผลของอุปกรณ์การสวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าคิซีเป็นดีซี เนื่องจากผลของอุปกรณ์การสวิตช์จะทำให้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลานั้นจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนต่อการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในบทที่ 4 ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนจึงได้อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมากำจัดผลของอุปกรณ์การสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบักก์ สามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จาก (J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani)

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรเวลาของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier series) ไปเป็นตัวแปรสถานะโดยหลักการพื้นฐานของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

โดยทั่วไป สัญญาณ $f(t)$ ใดๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบเป็น T สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน (T.W. Gamelin, 2000) ได้ดังสมการที่ (3-19) ดังนี้

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle X \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} \quad (3-19)$$

เมื่อ $\langle x \rangle_k(t)$ คือ สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier coefficients)

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะอาศัย $\langle X \rangle_k(t)$ เป็นตัวแปรสถานะของระบบซึ่งสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (3-20)

$$\langle X \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (3-20)$$

$$\text{โดยที่ } \omega_s = \frac{2\pi}{T}$$

คุณสมบัติที่จำเป็นของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนสำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 3.13 โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมีดังนี้

คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (3-21) ดังนี้

$$\frac{d}{dt}\langle X \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dx} \right\rangle_k - jk\omega_s \langle X \rangle_k \quad (3-21)$$

คุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณ แสดงได้ดังสมการที่ (3-22) ดังนี้

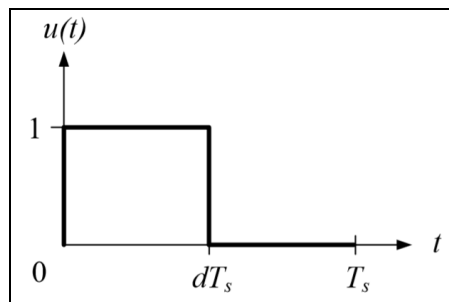
$$\langle XY \rangle_k = \sum_i \langle X \rangle_{k-i} \langle Y \rangle_i \quad (3-22)$$

ถ้า $f(t)$ คือ ค่าจริง (ค่าจริงที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรายคาบ) แสดงได้ดังสมการที่ (3-23) ดังนี้

$$\langle X \rangle_{-k} = \overline{\langle X \rangle_k} = \langle X \rangle_k^* \quad (3-23)$$

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะไม่พิจารณาผลของฮาร์มอนิกในอันดับมากกว่าศูนย์ เนื่องจากไม่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ (zero-order approximation) ของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน (Mahdavi, Emadi, Bellar, and Ehsani, 1997) เพื่อหาเพียงสัมประสิทธิ์ที่ความถี่มูลฐานโดยการกำหนดค่า k ของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนให้มีค่าเท่ากับศูนย์

พิจารณาจากรูปที่ 3.13 พบว่าสัญญาณรายคาบของอุปกรณ์การสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบักมีลักษณะการทำงานในโหมดการนำกระแสและหยุดนำกระแสเป็นดังรูปที่ 3.14 เมื่อ T_s คือ คาบการสวิตช์ และ d คือ วัฏจักรหน้าที่การทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัก



รูปที่ 3.14 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก

จากรูปที่ 3.14 สามารถพิจารณาเงื่อนไขของฟังก์ชันการสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบักก์ ได้ดังสมการที่ (3-24)

$$u(t) = \begin{cases} 1, 0 < t < dT_s \\ 0, dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (3-24)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ในรูปที่ 3.14 เมื่อพิจารณาการประมาณอันดับศูนย์ ทำได้โดยกำหนดให้ค่า $k=0$ และแทนค่า $u(t)$ จากสมการที่ (3-19) ลงในสมการที่ (3-21) จะได้

$$\langle u \rangle_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} 1 \cdot e^{j0t} dt$$

$$\langle u \rangle_0 = \frac{1}{T_s} \cdot dT_s$$

ดังนั้น จะได้สัมประสิทธิ์การประมาณค่าอันดับศูนย์ของสัญญาณการสวิตช์ ดังสมการที่ (3-25)

$$\langle u \rangle_0 = d \quad (3-25)$$

เมื่อ d คือ ค่าวัฏจักรการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบักก์

สำหรับตัวแปรสถานะของแบบจำลองในสมการที่ (3-18) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนอันดับศูนย์ แสดงได้ดังสมการที่ (3-26) ดังนี้

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle I_{sd} \rangle_0 = I_{sd} \\ \langle I_{sq} \rangle_0 = I_{sq} \\ \langle V_{bus,d} \rangle_0 = V_{bus,d} \\ \langle V_{bus,q} \rangle_0 = V_{bus,q} \\ \langle I_{dc} \rangle_0 = I_{dc} \\ \langle V_{dc} \rangle_0 = V_{dc} \\ \langle I_L \rangle_0 = I_L \\ \langle V_o \rangle_0 = V_o \end{array} \right. \quad (3-26)$$

จากสมการที่ (3-18) สามารถใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปพิสูจน์หาแบบจำลองโดยเริ่มต้นพิจารณาที่สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของ I_{sd} เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองที่ใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ แสดงได้ดังสมการที่ (3-27) ดังนี้

$$\langle \dot{I}_{sd} \rangle_0 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} \langle I_{sd} \rangle_0 + \omega \langle I_{sq} \rangle_0 - \frac{1}{L_{eq}} \langle V_{bus,d} \rangle_0 + \frac{1}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_m \cos(\lambda) \quad (3-27)$$

จากสมการที่ (3-27) สามารถแทน $\langle I_{sd} \rangle_0 = I_{sd}$, $\langle I_{sq} \rangle_0 = I_{sq}$, $\langle V_{bus,d} \rangle_0 = V_{bus,d}$ จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาแสดงดังสมการที่ (3-28) ดังนี้

$$\dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_m \cos(\lambda) \quad (3-28)$$

จากสมการที่ (3-28) เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ I_{sq} เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ดำเนินการเช่นเดียวกับ I_{sd} จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตแสดงดังสมการที่ (3-29) ดังนี้

$$\left\{ \begin{aligned} \left\langle \dot{I}_{sq} \right\rangle_0 &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} \left\langle I_{sq} \right\rangle_0 - \omega \left\langle I_{sd} \right\rangle - \frac{1}{L_{eq}} \left\langle V_{bus,q} \right\rangle_0 + \frac{1}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_m \sin(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \omega I_{sd} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_m \sin(\lambda) \end{aligned} \right. \quad (3-29)$$

สำหรับตัวแปรสถานะ $V_{bus,d}$, $V_{bus,q}$, I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o ดำเนินการเช่นเดียวกับ I_{sd} และ I_{sq} จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองดังสมการที่ (3-30) ถึง (3-35) ตามลำดับดังนี้

$$\left\{ \begin{aligned} \left\langle \dot{V}_{bus,d} \right\rangle_0 &= \frac{1}{C_{eq}} \left\langle I_{sd} \right\rangle_0 + \omega \left\langle V_{bus,q} \right\rangle_0 - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_{eq}} \left\langle I_{dc} \right\rangle_0 \\ \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_{dc}}{C_{eq}} \end{aligned} \right. \quad (3-30)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \left\langle \dot{V}_{bus,q} \right\rangle_0 &= \frac{1}{C_{eq}} \left\langle I_{sq} \right\rangle_0 - \omega \left\langle V_{bus,d} \right\rangle_0 \\ \dot{V}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} + \omega V_{bus,d} \end{aligned} \right. \quad (3-31)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \left\langle \dot{I}_{dc} \right\rangle_0 &= \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_f} \left\langle V_{bus,d} \right\rangle_0 - \frac{(R_\mu + R_f + R_c)}{L_f} \left\langle I_{dc} \right\rangle_0 + \frac{R_c \langle u \rangle_0}{L_f} I_L - \frac{1}{L_f} \left\langle V_{dc} \right\rangle_0 \\ \dot{I}_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_{bus,d}}{L_f} - \frac{(R_\mu + R_f + R_c) I_{dc}}{L_f} + \frac{R_c d}{L_f} I_L - \frac{1}{L_f} V_{dc} \end{aligned} \right. \quad (3-32)$$

$$\begin{cases} \langle \dot{V}_{dc} \rangle_0 = \frac{1}{C_f} \langle I_{dc} \rangle_0 - \frac{\langle u \rangle_0}{C_f} I_L \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_f} I_{dc} - \frac{d}{C_f} I_L \end{cases} \quad (3-33)$$

$$\begin{cases} \langle \dot{I}_L \rangle_0 = -\frac{1}{L} \langle V_o \rangle_0 + \frac{\langle u \rangle_0}{L} \langle V_{dc} \rangle_0 \\ \dot{I}_L = -\frac{1}{L} V_o + \frac{d}{L} V_{dc} \end{cases} \quad (3-34)$$

$$\begin{cases} \langle \dot{V}_o \rangle_0 = \frac{1}{C} \langle I_L \rangle_0 - \frac{1}{RC} \langle V_o \rangle_0 \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \end{cases} \quad (3-35)$$

จากสมการที่ (3-30) ถึง (3-35) สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของแบบจำลองตัวแปรสถานะได้ดังสมการที่ (3-36)

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (3-36)$$

เมื่อ ตัวแปรสถานะ คือ $\mathbf{x}(t) = [I_{sd} \quad I_{sq} \quad V_{bus,d} \quad V_{bus,q} \quad I_{dc} \quad V_{dc} \quad I_L \quad V_o]^T$
 อินพุต คือ $\mathbf{u}(t) = [V_s]$
 เอาต์พุต คือ $\mathbf{y}(t) = [I_{dc} \quad V_{dc} \quad I_L \quad V_o]^T$

และรายละเอียดของ \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} และ \mathbf{D} ในสมการที่ (3-36) แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
 \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_f} & 0 & -\left(\frac{R_\mu + R_f + R_c}{L_f}\right) & -\frac{1}{L_f} & \frac{R_c d}{L_f} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & -\frac{d}{C_f} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC}
 \end{bmatrix}_{8 \times 8}$$

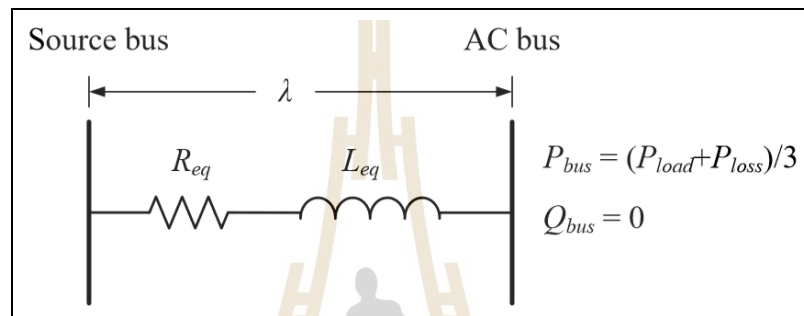
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix}
 \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\cos(\lambda)}{L_{eq}} \\
 \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sin(\lambda)}{L_{eq}} \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}_{8 \times 1}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix}_{4 \times 8}$$

$$\mathbf{D} = [0]_{1 \times 1}$$

3.2.8 การหาค่าในสถานะคงตัว

เนื่องจากในเมตริกซ์ B ของสมการที่ (3-36) มีพารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่าอยู่ นั่นคือ λ หรือค่าความต่างเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสเอชี่ ซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว โดยพิจารณาให้เป็นสายส่งหนึ่งเฟสเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ และไม่พิจารณาความจุไฟฟ้าของสายส่งเนื่องจากมีค่าน้อยมาก ดังนั้นระบบที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 3.15 สามารถพิสูจน์หาสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ ดังนี้

จาก $\mathbf{S} = \mathbf{VI}^* = P_{bus} + jQ_{bus}$

$$P_{bus} + jQ_{bus} = V_{bus} \angle 0^\circ \left(\frac{V_s \angle \lambda - V_{bus} \angle 0^\circ}{Z \angle \gamma} \right)^*$$

$$P_{bus} + jQ_{bus} = V_{bus} \angle 0^\circ \left(\frac{V_s \angle (\lambda - \gamma)}{Z} - \frac{V_{bus} \angle (-\gamma)}{Z} \right)^*$$

$$P_{bus} + jQ_{bus} = \frac{V_s V_{bus} \angle (\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \angle (\gamma)}{Z}$$

$$P_{bus} + jQ_{bus} = \left(\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) + j \frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) \right) - \left(\frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) + j \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) \right)$$

$$P_{bus} + jQ_{bus} = \left(\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) \right) + j \left(\frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) + \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) \right)$$

ดังนั้น สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (3-37)

$$\begin{cases} \frac{V_{bus} V_s \cos(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \cos(\gamma)}{Z} = P_{bus} \\ \frac{V_{bus} V_s \sin(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \sin(\gamma)}{Z} = Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-37)$$

โดยที่ V_s คือ แรงดันเฟสที่บัสแหล่งจ่าย

V_{bus} คือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรรองดีซี (rad/s)

λ คือ มุมต่างเฟสระหว่าง V_s และ V_{bus}

Z คือ ขนาดอิมพีแดนซ์ของสายส่ง

γ คือ มุมเฟสอิมพีแดนซ์ของสายส่ง

โดยที่ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟพิจารณาที่บัสเอชซี จะได้ดังสมการที่ (3-38)

$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{1}{3} \left(\frac{V_0^2}{R} + P_{loss} \right) \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-38)$$

จากสมการที่ (3-37) และ (3-38) สามารถเขียนโปรแกรมการคำนวณค่าด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตัน-ราฟสัน คูได้จากภาคผนวก ก. เพื่อใช้ในการหาผลการตอบสนองจากแบบจำลอง

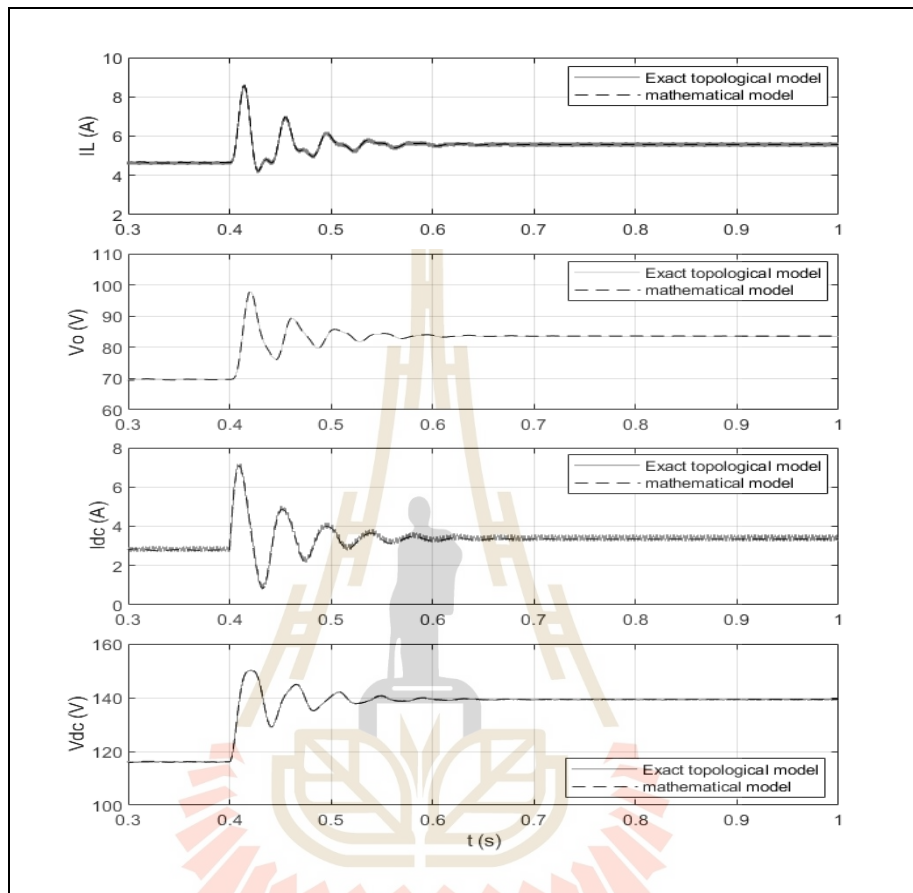
3.2.9 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุมที่ได้พิสูจน์ขึ้น โดยใช้วิธีดีคิวกวกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปได้ดังสมการที่ (3-36) และเพื่อยืนยันว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นนี้มีความถูกต้อง สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบและการออกแบบตัวควบคุมได้ จึงมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ในโปรแกรม MATLAB โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่กำหนดขึ้นแสดงดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1

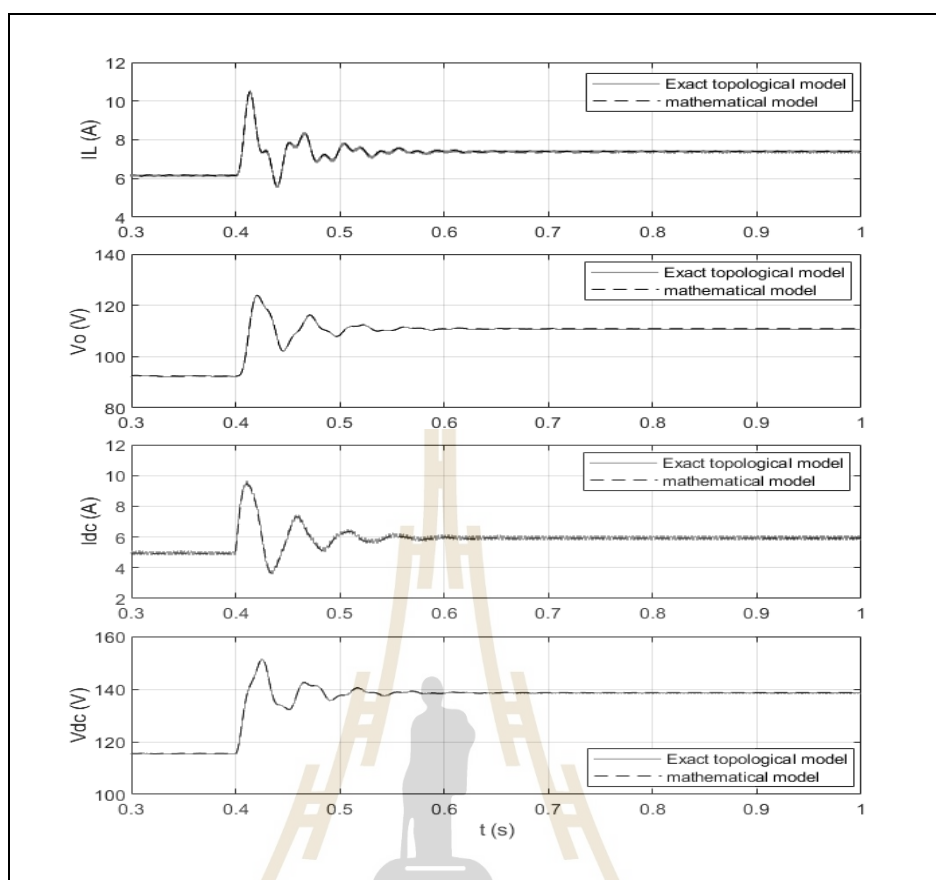
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	50 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	24 μ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
R_f	0.1 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_f	30 mH	ความเหนี่ยวนำวงจรกรอง
R_c	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_f	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าวงจรกรอง
$L(\Delta I_L \leq 0.2A)$	15 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคค์
$C(\Delta V_o \leq 2.8mV)$	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคค์
R	15 Ω	ความต้านทานของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์

เมื่อกำหนดค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ (d) เท่ากับ 0.6 (60 %) ได้ผลการ I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o ของระบบ ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ผลการตอบสนองเมื่อวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ (d) เท่ากับ 0.6 (60 %)

และเมื่อกำหนดค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ (d) เท่ากับ 0.8 (80 %) ได้ผลการตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o ของระบบ ดังรูปที่ 3.17



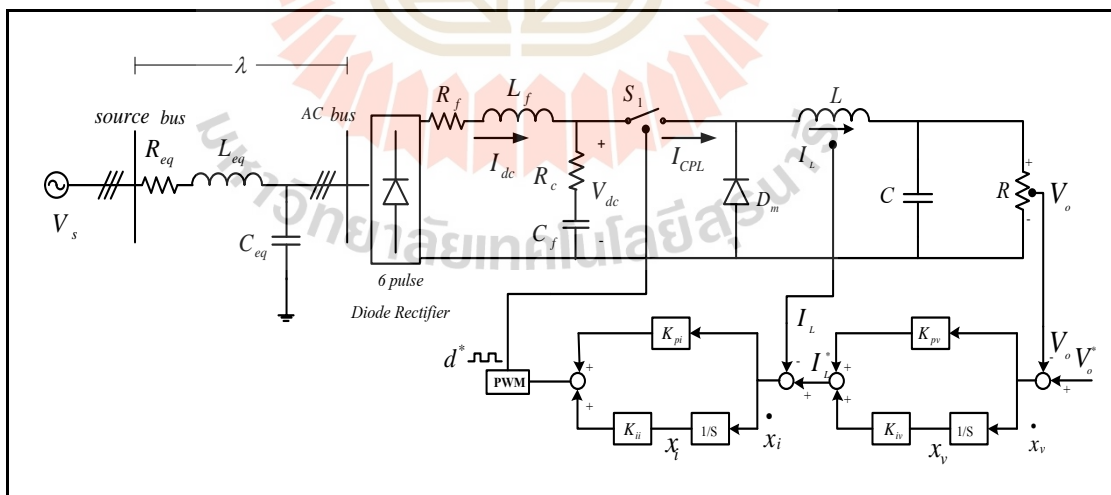
รูปที่ 3.17 ผลการตอบสนองเมื่อวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ (d) เท่ากับ 0.8 (80 %)

จากการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบจากรูปสัญญาณในรูปที่ 3.16 และ 3.17 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะอยู่ตัว และสถานะชั่วคราว ดังนั้น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวกและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 ถือเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้อง แม่นยำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมได้ต่อไป

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม

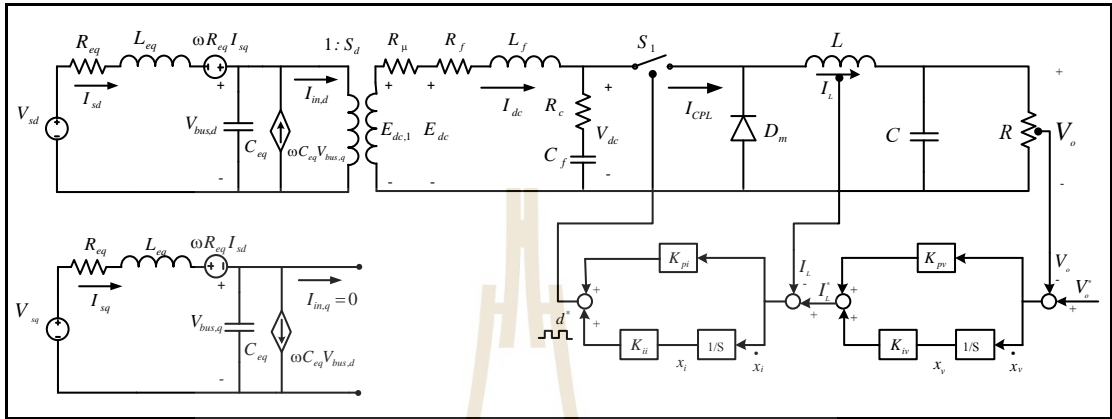
การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม จะพัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน

หัวข้อที่ 3.2 โดยเพิ่มในส่วนของตัวควบคุมในวงจรแปลงผันแบบบัลค์ เพื่อใช้ในการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต จากวงจรแปลงผันแบบบัลค์แบบไม่มีตัวควบคุมที่ได้วิเคราะห์มาแล้วในหัวข้อที่ 3.2 พบว่าอินพุตของระบบคือ V_s การปรับแรงดันเอาต์พุตสามารถทำได้สองแนวทาง คือ การปรับที่แรงดัน V_s และอีกทางหนึ่งคือการปรับค่าวัฏจักรการทำงาน (d) ของวงจรแปลงผัน เมื่อต้องการค่าแรงดันเอาต์พุตค่าหนึ่งจะต้องคำนวณหาค่า d ที่ทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการ ซึ่งถ้าหากผู้ใช้งานจำเป็นต้องเปลี่ยนค่าแรงดันเอาต์พุตบ่อยครั้ง หรือเกิดสถานะที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตไม่สม่ำเสมอ ผู้ใช้งานอาจต้องเสียเวลากับการปรับค่าวัฏจักรการทำงาน (d) ของวงจรแปลงผันอยู่เป็นประจำ แต่เมื่อนำตัวควบคุมมาใช้กับวงจรแปลงผันจะทำให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้อย่างสะดวกขึ้น โดยป้อนแรงดันอ้างอิง (V_o^*) ที่ต้องการให้กับตัวควบคุม จากนั้นตัวควบคุมจะทำการปรับแรงดันเอาต์พุตให้โดยอัตโนมัติ ตัวควบคุมที่ใช้งานในปัจจุบันมีหลายประเภทโดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอตัวควบคุมพีไอ ซึ่งมีความเหมาะสมและเพียงพอสำหรับการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และยังมีการออกแบบตัวควบคุมที่ไม่ซับซ้อน โดยสามารถออกแบบได้ด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม (K.M. Tsang and W.L. Chan, 2005) ซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่าย โดยสามารถเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างพหุนามส่วนของระบบที่พิจารณากับระบบอันดับสองมาตรฐานเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม K_p และ K_i โดยระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัลค์ที่มีตัวควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ต่อกับวงจรแปลงผันแบบบัลค์ที่มีการควบคุม

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.18 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์สามารถแปลงให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลได้ โดยอาศัยการพิสูจน์สมการทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ผ่านมา แต่มีการเพิ่มชุดตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัก์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 วงจรสมมูลของระบบกรณีวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุม

จากรูปที่ 3.18 ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ผู้ใช้งานต้องการแทนด้วยตัวแปร V_o^* และค่าแรงดันไฟฟ้าแทนด้วย V_o หลักการของตัวควบคุมพีไอคือการหาความคลาดเคลื่อนระหว่าง V_o^* และ V_o เพื่อปรับคุณด้วยค่าสัมประสิทธิ์ K_p และ K_i จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวจะมีค่าเป็นศูนย์ โดยสัญญาณที่ได้หลังจากการปรับคุณด้วยค่าสัมประสิทธิ์จะเข้าสู่ตัวเปรียบเทียบ (comparator) เพื่อให้ได้สัญญาณวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) สำหรับควบคุมสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก์

พิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่ยังไม่มีตัวควบคุมที่ได้พิสูจน์ขึ้นในหัวข้อที่ 3.2 ดังสมการที่ (3-36) ซึ่งปรากฏพจน์ตัวแปร d คือค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัก์สำหรับระบบที่ยังไม่มีตัวควบคุม จากระบบในรูปที่ 3.18 พบว่าปรากฏพจน์ d^* คือค่าวัฏจักรหน้าที่การทำงานของสวิตช์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยตัวควบคุมเรียกว่าสัญญาณควบคุม (Control signal) โดยการพิสูจน์หาแบบจำลองที่มีการควบคุมจะดำเนินการโดยแทนค่า $d = d^*$ สำหรับสมการของ d^* แสดงได้ดังสมการที่ (3-40)

$$d^* = -K_{pi} I_L - K_{pv} K_{pi} V_o + K_{iv} K_{pi} X_v + K_{ii} X_i + K_{pv} K_{pi} V_o^* \quad (3-40)$$

ตัวควบคุมพีไอจะมีส่วนประกอบที่เป็นพจน์ปริพันธ์ (Integral) อยู่ทั้งในตัวควบคุมรูปแรงดันและตัวควบคุมรูปกระแส ทำให้มีตัวแปรสถานะของระบบเพิ่มขึ้น โดยกำหนดให้ X_v เป็นตัวแปรสถานะของรูปแรงดัน และ X_i เป็นตัวแปรสถานะของรูปกระแส ดังที่ปรากฏในรูปที่ 3.20 ซึ่งค่า X_v และ X_i แสดงได้สมการที่ (3-41)

$$\begin{cases} \dot{X}_v = -V_o + V_o^* \\ \dot{X}_i = -I_L - K_{pv} V_o + K_{iv} X_v + K_{pi} V_o^* \end{cases} \quad (3-41)$$

วงจรแปลงผันแบบบักที่มีตัวควบคุม โดยการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่การทำงานของสวิตช์จะเกิดจากกระบวนการของตัวควบคุม ซึ่งก่อนหน้านั้นเกิดจากการกำหนดค่าโดยผู้ใช้งาน ดังนั้นจากแบบจำลองของระบบที่ไม่มีตัวควบคุมสามารถเปลี่ยนให้เป็นแบบจำลองที่มีตัวควบคุมได้ โดยแทนค่า d^* จากสมการที่ (3-40) ลงในค่า d ของสมการที่ (3-36) และเพิ่มตัวแปรสถานะ X_v และ X_i ลงในสมการที่ (3-36) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีตัวควบคุม แสดงดังสมการที่ (3-42)

$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq} I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \frac{V_m \cos(\lambda)}{L_{eq}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \\ \dot{I}_{sq} = -\frac{R_{eq} I_{sq}}{L_{eq}} + \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \frac{V_m \sin(\lambda)}{L_{eq}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_{dc}}{C_{eq}} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_{bus,d}}{L_f} - \frac{(R_\mu + R_f + R_c) I_{dc}}{L_f} - \frac{V_{dc}}{L_f} - \frac{R_c K_{pi} I_L^2}{L_f} - \frac{I_L R_c K_{pv} K_{pi} V_o}{L_f} \\ \quad + \frac{R_c I_L K_{pv} K_{pi} V^*}{L_f} + \frac{R_c I_L K_{pv} K_{pi} X_v}{L_f} + \frac{R_c I_L K_{ii} X_i}{L_f} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{I_{dc}}{C_f} + \frac{K_{pi} I_L^2}{C_f} + \frac{K_{pv} K_{pi} I_L V_o}{C_f} - \frac{K_{pv} K_{pi} I_L V_o^*}{C_f} - \frac{K_{pv} K_{pi} I_L X_v}{C_f} - \frac{K_{ii} I_L X_i}{C_f} \\ \dot{I}_L = -\frac{V_o}{L} - \frac{V_{dc} K_{pi} I_L}{L} - \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc} V_o}{L} + \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc} V_o^*}{L} + \frac{K_{iv} K_{pi} V_{dc} X_v}{L} - \frac{K_{ii} V_{dc} X_i}{L} \\ \dot{V}_o = \frac{I_L}{C} - \frac{V_o}{RC} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{X}_v = -V_o + V_o^* \\ \dot{X}_i = -I_L - K_{pv} V_o + K_{pv} V_o^* + K_{iv} X_v \end{cases} \quad (3-42)$$

จากสมการที่ (3-42) สังเกตได้ว่าเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมปรากฏอยู่ในแบบจำลอง ดังนั้นการทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อนำแบบจำลองนั้นมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยทฤษฎีการควบคุมแบบเชิงเส้น นอกจากนี้แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นสามารถนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของสัญญาณขนาดเล็ก (small signal) ของระบบไฟฟ้ากำลัง (K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, 2008) ภายใต้สมมติฐานที่ว่า จุกระบบการทำงานจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นแบบจำลองในสมการที่ (3-42) สามารถใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ซึ่งรายละเอียดของการทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นมีดังนี้

3.3.1 การทำให้เป็นเชิงเส้น

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นจากสมการที่ (3-42) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพที่จะกล่าวในบทที่ 4 จึงมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้น ซึ่งสามารถเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้นได้ โดยอาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นได้โดยมีรูปแบบดังสมการที่ (3-43) ดังนี้

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (3-43)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{x} &= [\delta I_{sd} \quad \delta I_{sq} \quad \delta V_{bus,d} \quad \delta V_{bus,q} \quad \delta I_{dc} \quad \delta V_{dc} \quad \delta I_L \quad \delta V_o \quad \delta X_v \quad \delta X_i]^T \\ \delta \mathbf{u} &= [\delta V_m \quad \delta V_o^*]^T \\ \delta \mathbf{y} &= [\delta V_{dc} \quad \delta V_o]^T \end{aligned}$$

และรายละเอียดของ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)$ ของสมการที่ (3-43) แสดงได้ดังนี้

$$A(X_0, u_0) = \begin{bmatrix}
-\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_f} & 0 & -\frac{(R_\mu + R_f + R_c)}{L_f} & -\frac{1}{L_f} & A(5,7) & -\frac{R_c K_{pv} K_{pi} I_{L,o}}{L_f} & \frac{R_c K_{iv} K_{pi} I_{L,o}}{L_f} & -\frac{R_c K_{ii} I_{L,o}}{L_f} \\
0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & A(6,7) & \frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,o}}{C_f} & -\frac{K_{iv} K_{pi} I_{L,o}}{C_f} & -\frac{K_{ii} I_{L,o}}{C_f} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A(7,6) & -\frac{K_{pi} V_{dc,o}}{L} & A(7,8) & \frac{K_{iv} K_{pi} V_{dc,o}}{L} & \frac{K_{ii} V_{dc,o}}{L} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0
\end{bmatrix}_{10 \times 10}$$

$$A(5,7) = -\frac{2R_c K_{pi} I_{L,o}}{L_f} - \frac{R_c K_{pv} K_{pi} V_{o,o}}{L_f} + \frac{R_c K_{pv} K_{pi} V_{o,o}^*}{L_f} + \frac{R_c K_{pv} K_{pi} X_{v,o}}{L_f} + \frac{R_c K_{ii} X_{i,o}}{L_f}$$

$$A(6,7) = \frac{2K_{pi} I_{L,o}}{C_f} + \frac{K_{pv} K_{pi} V_{o,o}}{C_f} - \frac{K_{pv} K_{pi} V_{o,o}^*}{C_f} - \frac{K_{pv} K_{pi} X_{v,o}}{C_f} - \frac{K_{ii} X_{i,o}}{C_f}$$

$$A(7,6) = \frac{K_{pi} I_{L,o}}{L} - \frac{K_{pv} K_{pi} V_{o,o}}{L} + \frac{K_{pv} K_{pi} V_{o,o}^*}{L} + \frac{K_{iv} K_{pi} X_{v,o}}{L} - \frac{K_{ii} X_{i,o}}{L}$$

$$A(7,8) = -\frac{1}{L} - \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc,o}}{L}$$

$$B(x_o, u_o) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\cos(\lambda_o)}{L_{eq}} & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sin(\lambda_o)}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_c I_{L,o} K_{pi} K_{pv}}{L_f} \\ 0 & -\frac{I_{L,o} K_{pi} K_{pv}}{C_f} \\ 0 & \frac{V_{dc,o} K_{pi} K_{pv}}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & K_{pv} \end{bmatrix}_{10 \times 2}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 10}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 2}$$

จากสมการที่ (3-43) ในองค์ประกอบ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)$ และ $\mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)$ มีพจน์ของตัวแปรที่เป็นค่าในสถานะคงตัว ได้แก่ $V_{dc,o}$, λ_o , $V_{o,o}$, $I_{L,o}$, $X_{v,o}$ และ $X_{i,o}$ ดังนั้นในการจำลองสถานการณ์จำเป็นต้องแก้สมการเพื่อหาค่าในสถานะอยู่ตัว ซึ่งการหาค่าในสถานะคงตัวได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2

3.2.2 การคำนวณค่าในสถานะคงตัว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3-43) มีความสอดคล้องสำหรับการคำนวณหาค่า $V_{dc,o}$, λ_o , $V_{o,o}$, $I_{L,o}$, $X_{v,o}$ และ $X_{i,o}$ โดยในส่วนแรกสามารถประยุกต์สมการการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับการคำนวณค่าในสถานะคงตัวทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ในที่นี้คือ $V_{bus,o}$ และ λ_o ซึ่งได้มีการพิสูจน์ไว้ในหัวข้อที่ 3.2.6 โดยมีสมการการไหลกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (3-44) ดังนี้

$$\begin{cases} \frac{V_{bus} V_s \cos(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \cos(\gamma)}{Z} = P_{bus} \\ \frac{V_{bus} V_s \sin(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \sin(\gamma)}{Z} = Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-44)$$

เมื่อ V_{bus} คือ แรงดันเฟส (rms) ที่บัสเอช λ คือ มุมต่างเฟสระหว่าง V_s และ V_{bus} และ $Z \angle \gamma$ คือ ขนาดอิมพีแดนซ์ของสายส่ง

โดยที่ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟพิจารณาที่บัสเอช จะได้ดังสมการที่ (3-45)

$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{1}{3} \left(\frac{V_o^{*2}}{R} + P_{loss} \right) \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-45)$$

เมื่อ V_o^* คือ แรงดันเอาต์พุตที่กำหนด และ P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจาก r_L , Q_{bus} ถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ เนื่องจากการสมมติฐานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสพิจารณากระแสอินพุต ($\mathbf{I}_{in,abc}$) ที่มีเฟสเดียวกันกับแรงดันอินพุต ($\mathbf{V}_{bus,abc}$)

จากสมการที่ (3-44) สามารถเขียนโปรแกรมการคำนวณค่า $V_{bus,o}$ และ λ_o ที่สภาวะคงตัวด้วยวิธีทางคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน-ราฟสัน ดังนั้น $V_{dc,o}$, $V_{o,o}$, $I_{L,o}$, $X_{v,o}$ และ $X_{i,o}$ สำหรับแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3-43) สามารถคำนวณได้จากค่า $V_{bus,o}$ และ λ_o โดยอาศัยสมการที่ (3-46) ดังนี้

$$\begin{cases} V_{dc,o} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \left(\sqrt{2}V_{bus,o} \right) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,o} - r_L I_{dc,o} \\ V_{o,o} = V_o^* \\ I_{L,o} = \frac{V_{o,o}}{R} \\ X_{v,o} = \frac{I_{L,o}}{K_{iv}} \\ X_{i,o} = \frac{V_o}{K_{ii} V_{dc,o}} \end{cases} \quad (3-46)$$

โดยที่

$$I_{dc,o} = \frac{\sqrt{3} \left| \frac{V_s e^{j0} - V_{bus,o} e^{-j\lambda}}{Z e^{j\gamma}} \right|}{\sqrt{2} \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right)}$$

$$Z = \sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}, \quad \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \right)$$

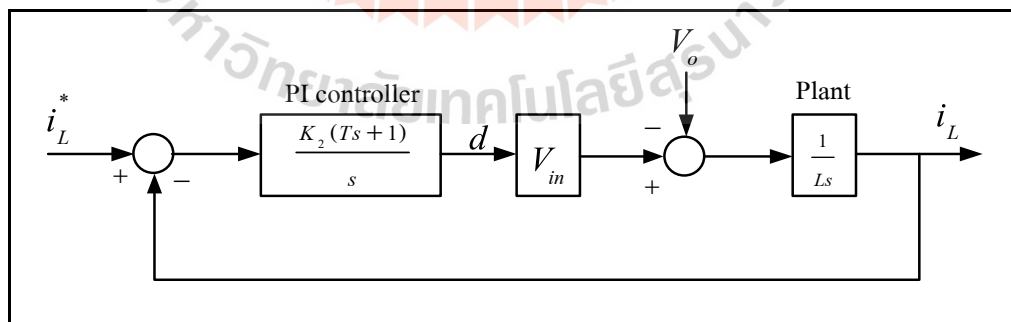
จากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3-43) และการคำนวณค่าในสภาวะคงตัวในสมการที่ (3-46) จะเห็นว่า สมการดังกล่าวมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอปรากฏอยู่ ดังนั้น การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักก์ จึงมีความจำเป็นเพื่อให้ผลการตอบสนองของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นไปอย่างถูกต้อง

3.3.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์

การควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยตัวควบคุมพีไอ การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์จะอาศัยวิธีการแบบดั้งเดิมของระบบควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ 2 รูปต่อกันแบบคาสเคด (K.M. Tsang and W.L. Chan, 2005) เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลการตอบสนองที่ดีและมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน การออกแบบตัวควบคุมจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบตัวควบคุมลูประแสไฟฟ้า และการออกแบบตัวควบคุมลูประแสไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะได้นำเสนอดังต่อไปนี้ (เทพพนม โสภภาพิม)

การออกแบบตัวควบคุมลูประแสไฟฟ้า

ในส่วนของลูประแสไฟฟ้าของการควบคุมลูประแสไฟฟ้าของระบบ สามารถแสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 3.20 ดังนี้



รูปที่ 3.20 ลูประแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.20 พบว่า K_2 และ T คือค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมลูปลกระแสไฟฟ้า ในขณะที่ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักค์ ดังนั้นจากรูปที่ 3.20 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปลกระแสไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (3-47) ดังนี้

$$\frac{I_L}{I_L^*} = \frac{K_2 V_{in} (Ts + 1)}{Ls^2 + K_2 T V_{in} s + K_2 V_{in}} \quad (3-47)$$

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมอาศัยระบบสมการอันดับสองมาตรฐานของระบบควบคุม แสดงดังสมการที่ (3-48)

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3-48)$$

ดังนั้น ตัวควบคุมลูปลกระแส สามารถออกแบบด้วยการเปรียบเทียบระหว่างตัวหารของสมการที่ (3-47) และ (3-48) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังสมการที่ (3-49) และ (3-50) ดังนี้

$$T = \frac{2\zeta_i}{N\omega_{nv}} \quad (3-49)$$

$$\omega_{ni} = N\omega_{nv} = \sqrt{\frac{K_2 V_{in}}{L}}, \quad N > 4 \quad (3-50)$$

โดยที่ N คือ ค่าคงที่สำหรับกำหนดแบนด์วิธของลูปลกระแสไฟฟ้า

จากสมการที่ (3-50) สามารถหาค่า K_2 แสดงดังสมการที่ (3-51) ดังนี้

$$K_2 = \frac{\omega_{ni}^2 L}{V_{in}} \quad (3-51)$$

จากรูปที่ 3.20 สามารถเขียนตัวควบคุมพีไอให้อยู่ในรูปตามสมการที่ (3-52) ดังนี้

$$K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} = \frac{K_2(Ts+1)}{s} \quad (3-52)$$

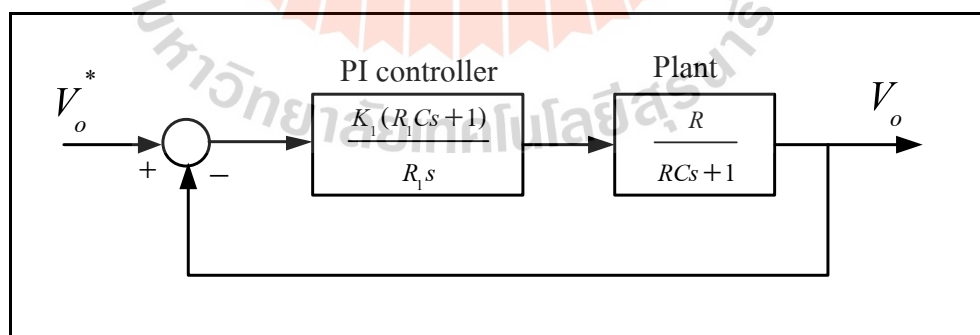
จากสมการที่ (3-50), (3-51) และ (3-52) สามารถเขียนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ K_{pi} และ K_{ii} สำหรับลูปกระแสไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (3-53) และ (3-54) ดังนี้

$$K_{pi} = \frac{2N\zeta_i \omega_{mv} L}{V_{in}} \quad (3-53)$$

$$K_{ii} = \frac{N^2 \omega_{mv}^2 L}{V_{in}} \quad (3-54)$$

การออกแบบตัวควบคุมลูปแรงดันไฟฟ้า

ในส่วนของลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบในรูปที่ 3.18 สามารถแสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 3.21 ดังนี้



รูปที่ 3.21 ลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.21 พบว่า K_1 และ R_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมลูปแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่ R และ C คือ ค่าความจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานของวงจรแปลงผัน

แบบบ็ลค์ ตามลำดับ ดังนั้นจากรูปที่ 3.21 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปรแรงดันไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (3-55) ดังนี้

$$\frac{V_o(s)}{V_o^*(s)} = \frac{K_1 R_1 RCs + K_1 R}{R_1 RCs^2 + (R_1 + K_1 R_1 RC)s + K_1 R} \quad (3-55)$$

ตัวควบคุมลูปรแรงดันไฟฟ้า สามารถออกแบบด้วยการเปรียบเทียบระหว่างตัวหารของสมการที่ (3-48) และ (3-55) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังสมการที่ (3-56) และ (3-57) ดังนี้

$$\omega_{mv} = \sqrt{\frac{K_1}{R_1 C}} \quad (3-56)$$

$$2\zeta_v \omega_{mv} = \frac{1}{RC} + K_1 \quad (3-57)$$

จากสมการที่ (3-57) จะกำหนดให้ $R=R_1$ และ $\zeta_v=1$ สำหรับการตอบสนองแบบหน่วงวิกฤต (K.M. Tsang and W.L. Chan, 2005) แสดงได้ดังสมการที่ (3-58) ดังนี้

$$2\omega_{mv} = \frac{1}{R_1 C} + K_1 \quad (3-58)$$

จากสมการที่ (3-56) และ (3-58) สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมลูปรแรงดันไฟฟ้า K_1 แสดงได้ดังสมการที่ (3-59) ดังนี้

$$K_1 = \frac{1}{R_1 C} \quad (3-59)$$

ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบตัวควบคุม ความกว้างแถบ (Bandwidth) ของลูปรแรงดันไฟฟ้า แสดงได้ดังสมการที่ (3-60) ดังนี้

$$\omega_{nv} = \frac{1}{R_1 C} \quad (3-60)$$

จากรูปที่ 3.21 สามารถเขียนตัวควบคุมแบบพีไอให้อยู่ในรูปตามสมการที่ (3-61) ดังนี้

$$K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} = \frac{K_1 (R_1 C s + 1)}{R_1 s} \quad (3-61)$$

จากสมการที่ (3-59) และ (3-61) สามารถเขียนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ K_{pv} และ K_{iv} สำหรับลูปรแรงดันไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (3-62) และ (3-63) ดังนี้

$$K_{pv} = K_1 C = \frac{1}{R_1} \quad (3-62)$$

$$K_{iv} = \frac{K_1}{R_1} = \frac{1}{R_1^2 C} \quad (3-63)$$

ตัวควบคุมแบบพีไอของลูประแสไฟฟ้าและลูปรแรงดันไฟฟ้า สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (3-53), (3-54), (3-62) และ (3-63) ตามลำดับ ซึ่งสมการของตัวควบคุมดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบ คือ อัตราส่วนของลูปรแรงดันไฟฟ้า (ζ_v) และลูประแสไฟฟ้า (ζ_i) ความกว้างแถบของลูปรแรงดันไฟฟ้า (ω_{nv}) และลูประแสไฟฟ้า (ω_{ni}) ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับวิธีการแบบดั้งเดิมนี้ออกแบบได้โดยการเลือก $\zeta_v = 1$, $\zeta_i = 0.8$ และ $\omega_{nv} = 750$ rad/s และ $\omega_{ni} = 7500$ ดังนั้น พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับการออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิม คือ $K_{pi} = 1.538$, $K_{ii} = 7211$, $K_{pv} = 0.07$ และ $K_{iv} = 4.44$

3.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

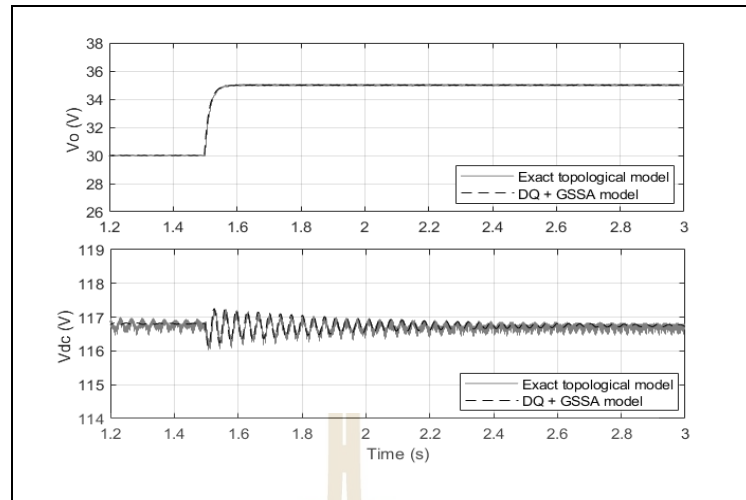
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นจากวิธีคิดร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมแสดงได้ดังสมการที่ (3-43) เป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นของระบบ เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองที่ได้รับ

การพิสูจน์ขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ จึงมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ในโปรแกรม MATLAB โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่กำหนดขึ้นแสดงดังตารางที่ 3.2 ดังนี้

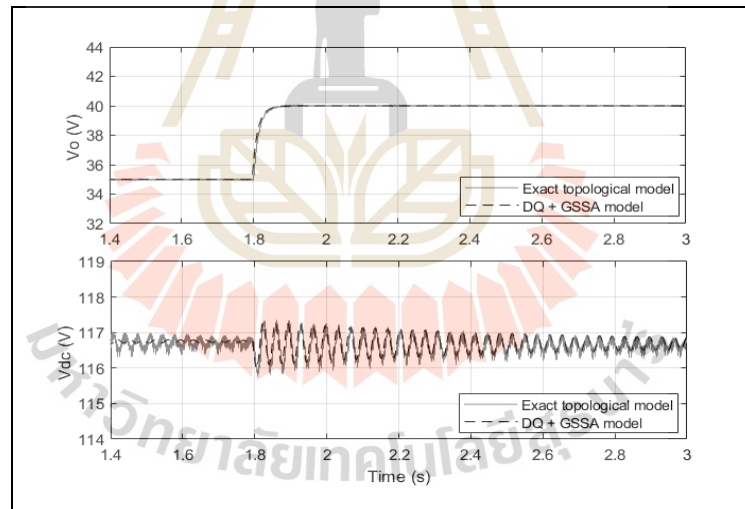
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.18

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	50 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	24 μ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
R_f	0.1 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_f	30 mH	ความเหนี่ยวนำวงจรกรอง
R_c	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_f	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าวงจรกรอง
$L(\Delta I_L \leq 0.2A)$	15 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์
$C(\Delta V_o \leq 2.8mV)$	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์
R	15 Ω	ความต้านทานของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์
K_{pv}	0.07	ตัวปรับคุณตัวควบคุมพีของลูปรแรงดัน
K_{iv}	4.44	ตัวปรับคุณตัวควบคุมไอของลูปรแรงดัน
K_{pi}	1.538	ตัวปรับคุณตัวควบคุมพีของลูปรกระแส
K_{ii}	7211	ตัวปรับคุณตัวควบคุมไอของลูปรกระแส

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o^* จาก 30 V เป็น 35 V ที่เวลา 1.5 วินาที แสดงได้ดังรูปที่ 3.22 และมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o^* จาก 35 V เป็น 40 V ที่เวลา 1.8 วินาที แสดงได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 ผลการตอบสนองของ V_o และ V_{dc} ของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o^* จาก 30 V เป็น 35 V



รูปที่ 3.23 ผลการตอบสนองของ V_o และ V_{dc} ของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o^* จาก 35 V เป็น 40 V

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในรูปที่ 3.22 และ 3.23 พบว่า ผลการตอบสนองแรงดันเอาต์พุต (V_o) แรงดันไฟฟ้าดีซี (V_{dc}) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบน

คอมพิวเตอร์ ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว ดังนั้นการพิสูจน์แบบจำลองของระบบที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมด้วยวิธีตีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ถือเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง แม่นยำ และสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้

3.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 เป็นการนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีหรือวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ โดยการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบจะเริ่มจากกรณีของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุมก่อนเนื่องจากเป็นพื้นฐานในการหาแบบจำลองของระบบที่มีการควบคุมต่อไป จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุมในส่วนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์จะมีความทำงานของไดโอดที่มีพฤติกรรมเป็นเหมือนสวิตช์ซึ่งจะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเมื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นเพื่อกำจัดปัญหาดังกล่าว งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ใช้วิธีตีควซึ่งเหมาะกับระบบไฟฟ้าสามเฟสสามขั้วของอุปกรณ์สวิตช์ในส่วนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และในลักษณะเดียวกันในส่วนของโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ก็มีอุปกรณ์สวิตช์ปรากฏอยู่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าวในวงจรแปลงผันแบบบัคค์เนื่องจากวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปนี้มีความเหมาะสมในการใช้วิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ดีซีเป็นดีซี จากการพิสูจน์หาแบบจำลองโดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีตีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไป และมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองกับผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องสำหรับระบบกรณีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุมแล้ว ก็สามารถนำแบบจำลองไปพิจารณาต่อยอดเพื่อหาแบบจำลองของระบบกรณีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมหรือวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมโดยเพิ่มตัวควบคุมแบบพีโอเข้าไปในระบบแล้วทำการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพิ่มเติมเมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกรณีมีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมที่มี

ความถูกต้องแม่นยำแล้ว ก็สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ
ที่จะมีการนำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป



บทที่ 4

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์

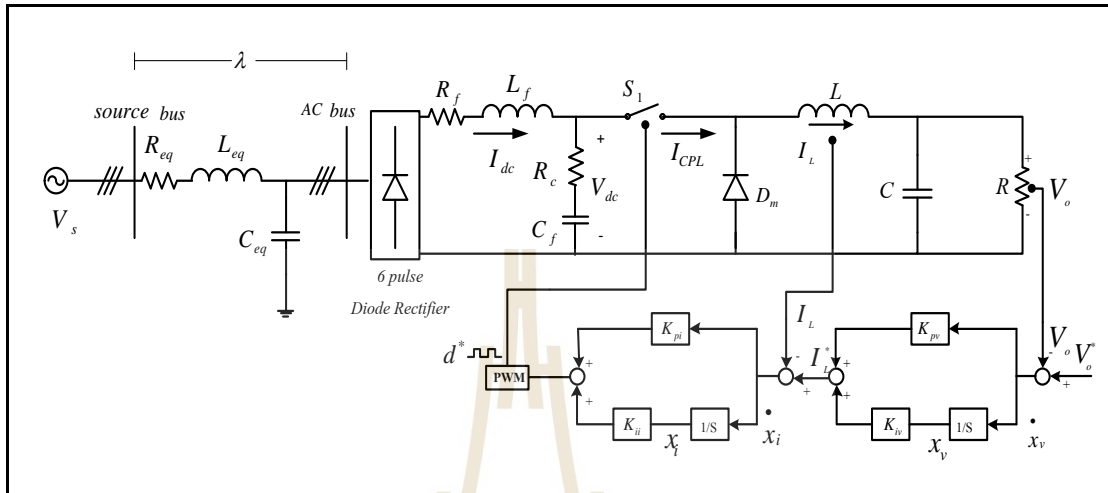
4.1 บทนำ

ในบทที่ 4 จะนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีหรือวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีโดยส่วนใหญ่จะมีวงจรกรองกำลังไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบเพื่อช่วยให้กระแสและแรงดันที่ได้มีสมรรถนะดีขึ้นแต่การเพิ่มวงจรกรองกำลังไฟฟ้าเข้ามาในระบบอาจทำให้เกิดผลเสียบางประการตามมานั้นก็คือถ้านำวงจรไปจ่ายโหลดที่มีลักษณะเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant Power Load; CPL) อาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพอีกทั้งทำให้การทำงานของระบบผิดพลาดและก่อให้เกิดความเสียหายได้ สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมซึ่งมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นเพื่อป้องกันและหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบขึ้น โดยวิธีการที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะนำเสนอด้วยกันสองวิธีคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง (Eigenvalues theorem) และเกณฑ์ของมิดเดิลบรูค (Middlebrook's criteria) ซึ่งทั้งสองวิธีจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นของระบบที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 มาทำการวิเคราะห์ อีกทั้งยังมีการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

4.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้พัฒนาระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองกำลังไฟฟ้าดิซี ซึ่งหากมีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าทางฝั่งโหลดมากเกินไปอาจทำให้ระบบดังกล่าวขาดเสถียรภาพได้ หากระบบขาดเสถียรภาพจะทำให้แรงดันทางฝั่งดิซีมีการกระเพื่อมที่มากขึ้น จากกรณีดังกล่าวอาจทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์และมากไปกว่านั้นอาจทำให้เกิด

ความไม่ปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อคาดเดาขีดความสามารถในการรับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวของระบบ



รูปที่ 4.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม

4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบพื้นฐานที่ใช้สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยจะคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อเพิ่ม โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวให้กับระบบไฟฟ้าจะทำให้ค่าเจาะจงของระบบเลื่อนจากทางฝั่งซ้ายไปทางฝั่งขวาของระนาบเอส ซึ่งถ้าค่าเจาะจงของระบบทุกค่าอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอสจะถือว่าระบบนั้นมีเสถียรภาพ แต่ถ้ามีค่าเจาะจงค่าใด ๆ อยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอสจะถือว่าระบบนั้นขาดเสถียรภาพ โดยในการวิเคราะห์นี้จะใช้เมตริกซ์ A ที่ได้จากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-43) ในบทที่ 3 และมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.1 การหาค่าเจาะจงสามารถหาได้จากสมการที่ (4-1) โดยใช้การคำนวณ ด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่านคำสั่ง “eig(A)”

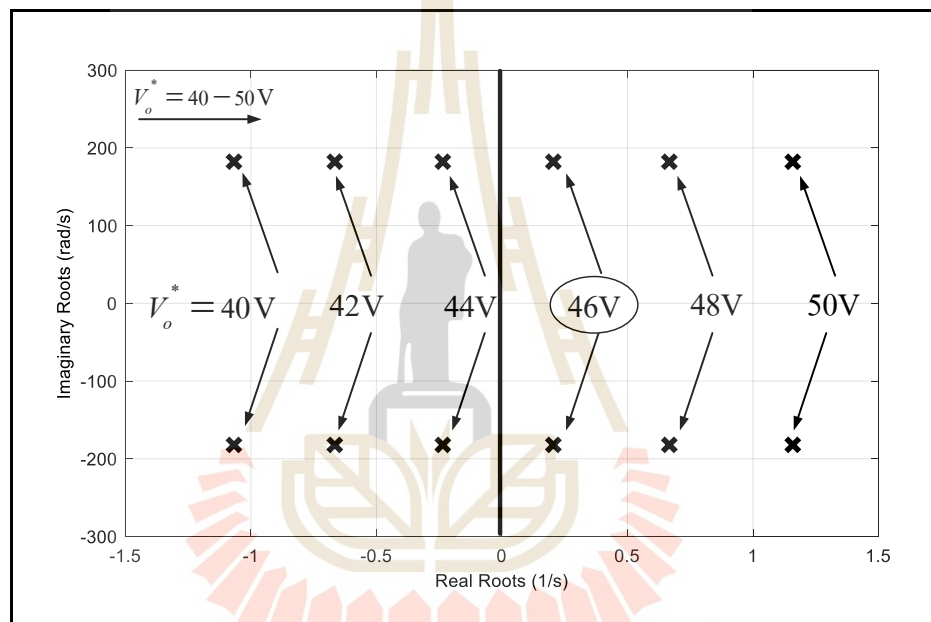
$$\det[\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}] = 0 \quad (4-1)$$

จากนั้นจะทำการตรวจสอบค่าเจาะจงของระบบ ถ้าค่าเจาะจงเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ (4-2) จะถือว่าระบบมีเสถียรภาพ

$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (4-2)$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ และ n คือ จำนวนตัวแปรสถานะของระบบ

การพิจารณาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 จะทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งจาก 30 V จนถึง 40 V เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งค่าเจาะจงของระบบ ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.2

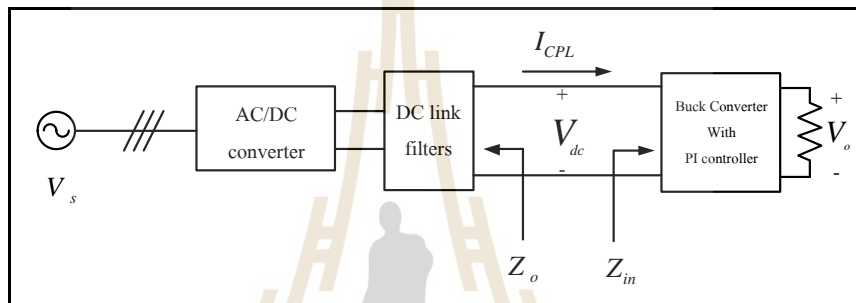


รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

จากรูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งค่าเจาะจงที่มีส่วนจริงอยู่ใกล้ศูนย์มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบมากกว่าค่าเจาะจงที่ตำแหน่งอื่น ๆ เมื่อทำการปรับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของแรงดันวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งเท่ากับ 40 V, 42 V และ 44 V พบว่าส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่าน้อยกว่าศูนย์ หรือยังอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอส นั่นคือระบบยังคงมีเสถียรภาพ แต่เมื่อทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเป็น 46 V พบว่าส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่ามากกว่าศูนย์ หรือมีตำแหน่งอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอส ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบขาดเสถียรภาพ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 จะขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 46 V เป็นต้นไป

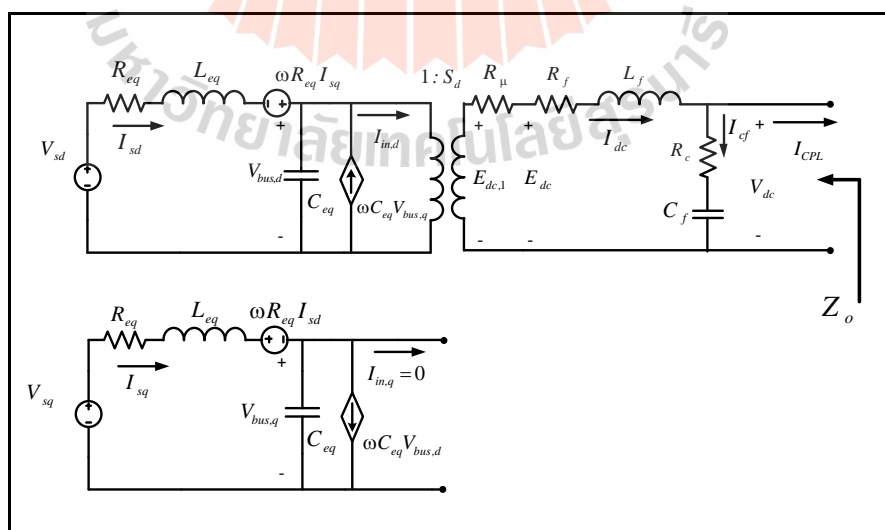
4.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของมิตเดิลบรูก

หลักการวิเคราะห์เสถียรภาพตามเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก ซึ่งจะอาศัยเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) ของวงจรด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) ของวงจรด้านฝั่งโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีการควบคุม โดยมีเงื่อนไขคือ ถ้าขนาดของ Z_o มีค่ามากกว่าขนาดของ Z_{in} ที่ความถี่ใด ๆ ระบบนั้นจะขาดเสถียรภาพจากระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยวงจรทางด้านแหล่งจ่ายที่มีวงจรกรองกำลังไฟฟ้า และวงจรทางฝั่งโหลดคือวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีการควบคุม ซึ่งในการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์สามารถแยกพิจารณาวงจรออกเป็นทีละส่วนดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีการควบคุม

พิจารณาวงจรด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 วงจรที่พิจารณาทางฝั่งแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 4.4 เมื่อทำการวิเคราะห์ห้วงจรจะได้สมการตัวแปรสถานะดังสมการที่ (4-3) ดังนี้

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} + \omega I_{sd} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_{dc}}{C_{eq}} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} + \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_{bus,d}}{L_f} - \frac{(R_{\mu} + R_f + R_c) I_{dc}}{L_f} + \frac{R_c}{L_f} I_{CPL} - \frac{1}{L_f} V_{dc} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_f} I_{dc} - \frac{1}{C_f} I_{CPL} \end{array} \right. \quad (4-3)$$

ซึ่งเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ในส่วนของวงจรที่พิจารณารูปที่ 4.4 สามารถหาได้จากสมการที่ (4-4) คือ

$$Z_o = \frac{V_{dc}}{I_{CPL}} \quad (4-4)$$

ดังนั้นจึงกำหนดให้ I_{CPL} เป็นอินพุตและ V_{dc} เป็นเอาต์พุตของระบบสมการในสมการที่ (4-3) เพื่อที่จะสามารถนำไปหาฟังก์ชันถ่ายโอนของ Z_o ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในขั้นตอนต่อไป จากสมการที่ (4-3) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (4-5) ดังนี้

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{Ax}(t) + \mathbf{Bu}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{Cx}(t) + \mathbf{Du}(t) \end{array} \right. \quad (4-5)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \mathbf{x}(t) &= \begin{bmatrix} I_{sd} & I_{sq} & V_{bus,d} & V_{bus,q} & I_{dc} & V_{dc} \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{u}(t) &= \begin{bmatrix} V_m & I_{CPL} \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{y}(t) &= \begin{bmatrix} V_{dc} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

โดยที่เมทริกซ์ **A**, **B**, **C** และ **D** ในสมการที่ (4-5) แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_f} & 0 & -\left(\frac{R_\mu + R_f + R_c}{L_f}\right) & -\frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\cos(\lambda)}{L_{eq}} & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sin(\lambda)}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_c}{L_f} \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix}_{6 \times 2}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{1 \times 6}$$

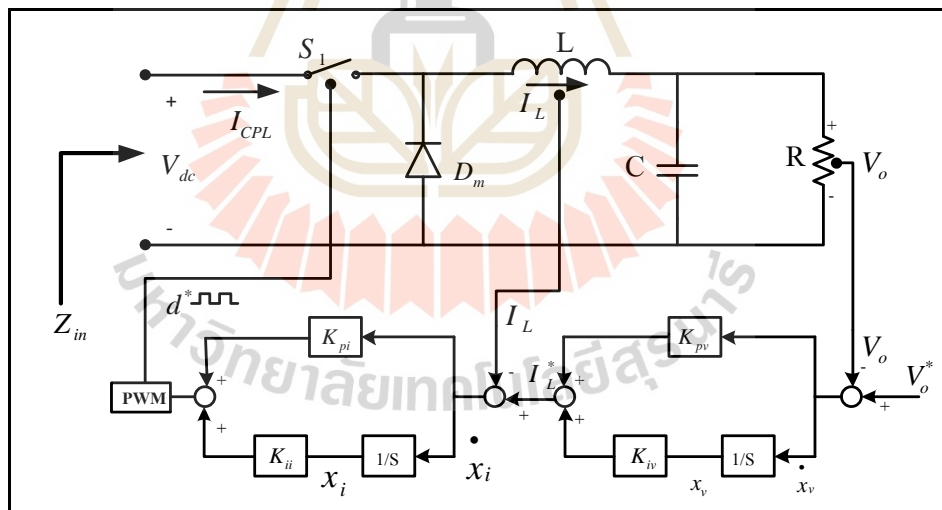
$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}_{1 \times 2}$$

พารามิเตอร์ของระบบที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.1 เมื่อทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของ Z_o ด้วยโปรแกรม MATLAB จะได้ผลดังสมการที่ (4-6) ดังนี้

$$Z_o = \frac{-1000s^5 - 8.337 \times 10^6 s^4 - 4.17 \times 10^{16} s^3 - 1.74 \times 10^{20} s^2 - 4.346 \times 10^{29} s - 4.189 \times 10^{30}}{s^6 + 8337s^5 + 4.17 \times 10^{13} s^4 + 1.74 \times 10^{17} s^3 + 4.346 \times 10^{26} s^2 + 4.334 \times 10^{27} s + 4.117 \times 10^{31}} \quad (4-6)$$

จากนั้นพิจารณาหาอินพุตอิมพีแดนซ์ในส่วนของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแสดงดังรูปที่ 4.5

พิจารณาวจรทางด้านฝั่งโหลด



รูปที่ 4.5 วงจรที่พิจารณาทางด้านฝั่งโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม

จากรูปที่ 4.5 เมื่อทำการวิเคราะห์ห้วงจรจะได้สมการตัวแปรสถานะดังสมการที่ (4-7) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_L = -\frac{R_L}{L} I_L - \frac{1}{L} V_o + \frac{d^*}{L} V_{dc} \\ \dot{V}_o = -\frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\ x_v = -V_o + V_o^* \\ \dot{x}_i = -I_L + K_{pv} V_o^* - K_{pv} V_o + K_{iv} x_v \end{cases} \quad (4-7)$$

$$\text{เมื่อ } d^* = -K_{pi} I_L - K_{pi} K_{pv} V_o + K_{pi} K_{pv} V_o^* + K_{pi} K_{iv} x_v + K_{ii} x_i$$

และเมื่อพิจารณากระแสที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันกำลังแบบบักก์ จะได้ดังสมการที่ (4-8) ดังนี้

$$I_{CPL} = u(t) I_L$$

$$I_{CPL} = -K_{pv} I_L^2 - K_{pi} K_{pv} V_o I_L + K_{pi} K_{pv} V_o^* I_L + K_{pi} K_{iv} x_v I_L + K_{ii} x_i I_L \quad (4-8)$$

ซึ่งการหา Z_{in} ของระบบสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4-9) คือ

$$Z_{in} = \frac{V_{dc}}{I_{CPL}} \quad (4-9)$$

พิจารณาสมการที่ (4-7) และ (4-8) จะพบว่า เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงให้อยู่ในรูปสมการที่เป็นเชิงเส้น โดยมีรูปแบบดังสมการที่ (4-10) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{\delta x} = A(x_o, u_o) \delta x + B(x_o, u_o) \delta u \\ \dot{\delta y} = C(x_o, u_o) \delta x + D(x_o, u_o) \delta u \end{cases} \quad (4-10)$$

จะได้

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta I_L} \\ \dot{\delta V_o} \\ \dot{\delta x_v} \\ \dot{\delta x_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{V_{dc} K_{pi}}{L} & \frac{1}{L} & -\frac{V_{dc} K_{pi} K_{pv}}{L} & \frac{V_{dc} K_{pi} K_{iv}}{L} & \frac{V_{dc} K_{ii}}{L} \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ C & RC & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta I_L \\ \delta V_o \\ \delta x_v \\ \delta x_i \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} b11 & \frac{V_{dc} K_{pi} K_{pv}}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & K_{pv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta V_{dc} \\ \delta V_o^* \end{bmatrix}$$

$$b11 = -\frac{K_{pi} I_L}{L} - \frac{K_{pi} K_{pv} V_o}{L} + \frac{K_{pi} K_{pv} V_o^*}{L} + \frac{K_{pi} K_{iv} x_v}{L} + \frac{K_{ii} x_i}{L}$$

$$[\delta I_{CPL}] = \begin{bmatrix} c11 & -K_{pi} K_{pv} I_L & K_{pi} K_{iv} I_L & K_{ii} x_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta I_L \\ \delta V_o \\ \delta x_v \\ \delta x_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & K_{pi} K_{pv} I_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta V_{dc} \\ \delta V_o^* \end{bmatrix}$$

$$c11 = -2K_{pi} I_L - K_{pi} K_{pv} V_o + K_{pi} K_{pv} V_o^* + K_{pi} K_{iv} x_v + K_{ii} x_i$$

ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของอินพุตอิมพีแดนซ์ Z_{in} ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยมีการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก 40 V จนถึง 50 V ซึ่งจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของ Z_{in} ดังสมการที่ (4-11) – (4-16) ตามลำดับดังนี้

ที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 40 V

$$Z_{in1} = \frac{-s^4 - 9.329 \times 10^4 s^3 - 2.738 \times 10^7 s^2 + 3.502 \times 10^8 s - 7.296 \times 10^{10}}{612.4 s^3 + 1.809 \times 10^5 s^2 - 2.313 \times 10^6 s + 4.819 \times 10^8} \quad (4-11)$$

ที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 42 V

$$Z_{in2} = \frac{-s^4 - 9.326 \times 10^4 s^3 - 2.737 \times 10^7 s^2 + 3.501 \times 10^8 s - 7.294 \times 10^{10}}{697 s^3 + 2.058 \times 10^5 s^2 - 2.632 \times 10^6 s + 5.484 \times 10^8} \quad (4-12)$$

ที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 44 V

$$Z_{in3} = \frac{-s^4 - 9.323 \times 10^4 s^3 - 2.737 \times 10^7 s^2 + 3.5 \times 10^8 s - 7.292 \times 10^{10}}{787 s^3 + 2.324 \times 10^5 s^2 - 2.973 \times 10^6 s + 6.193 \times 10^8} \quad (4-13)$$

ที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 46 V

$$Z_{in4} = \frac{-s^4 - 9.321 \times 10^4 s^3 - 2.736 \times 10^7 s^2 + 3.499 \times 10^8 s - 7.29 \times 10^{10}}{882.6 s^3 + 2.607 \times 10^5 s^2 - 3.334 \times 10^6 s + 6.945 \times 10^8} \quad (4-14)$$

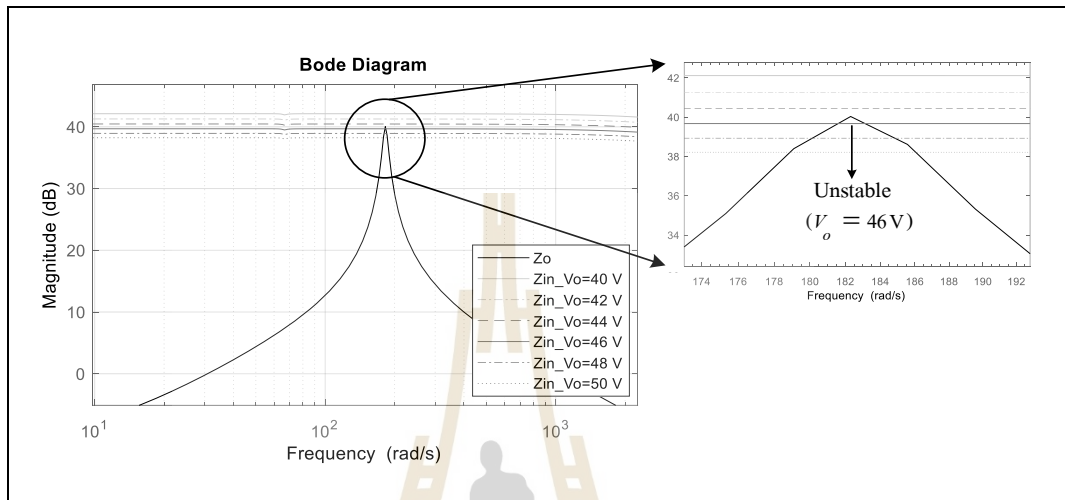
ที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 48 V

$$Z_{in5} = \frac{-s^4 - 9.318 \times 10^4 s^3 - 2.735 \times 10^7 s^2 + 3.498 \times 10^8 s - 7.287 \times 10^{10}}{983.7 s^3 + 2.905 \times 10^5 s^2 - 3.715 \times 10^6 s + 7.78 \times 10^8} \quad (4-15)$$

ที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 50 V

$$Z_{in6} = \frac{-s^4 - 9.315 \times 10^4 s^3 - 2.734 \times 10^7 s^2 + 3.497 \times 10^8 s - 7.283 \times 10^{10}}{1090 s^3 + 3.22 \times 10^5 s^2 - 4.118 \times 10^6 s + 8.57 \times 10^8} \quad (4-16)$$

นำฟังก์ชันถ่ายโอนของ Z_o และ Z_{in} ที่ได้วิเคราะห์มาทั้งหมดไปเขียนบนแผนภาพโบเด โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อแสดงขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองในย่านความถี่ต่าง ๆ ได้ผล ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in}

จากรูปที่ 4.6 พบว่าการปรับเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้สูงขึ้นจะทำให้ขนาดของ Z_{in} ลดลงในทุก ๆ ย่านความถี่ จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 46 V ขนาดของ Z_o จะมากกว่าขนาดของ Z_{in} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบเริ่มมีการขาดเสถียรภาพ ซึ่งผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1

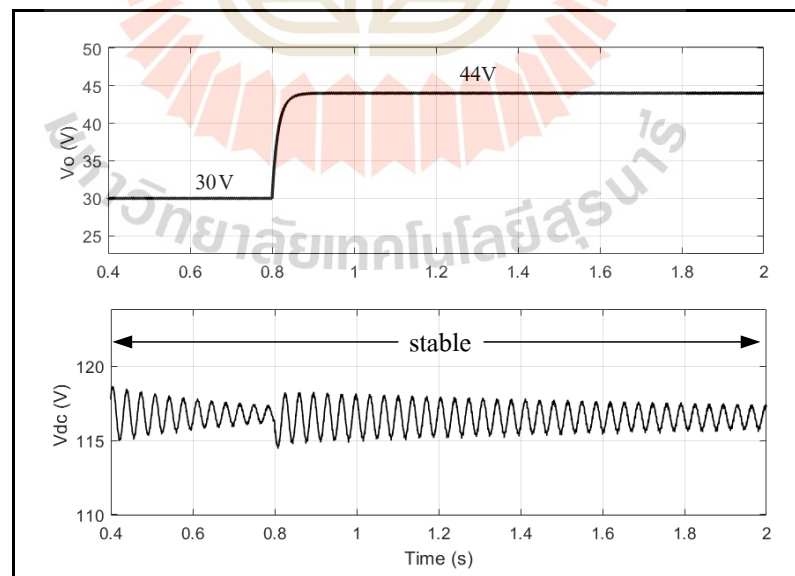
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	50 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	24 μ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
R_f	0.1 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
L_f	30 mH	ความเหนี่ยวนำวงจรกรอง
R_c	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_f	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าวงจรกรอง
$L(\Delta I_L \leq 0.2A)$	15 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักค์
$C(\Delta V_o \leq 2.8mV)$	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักค์
R	15 Ω	ความต้านทานของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์

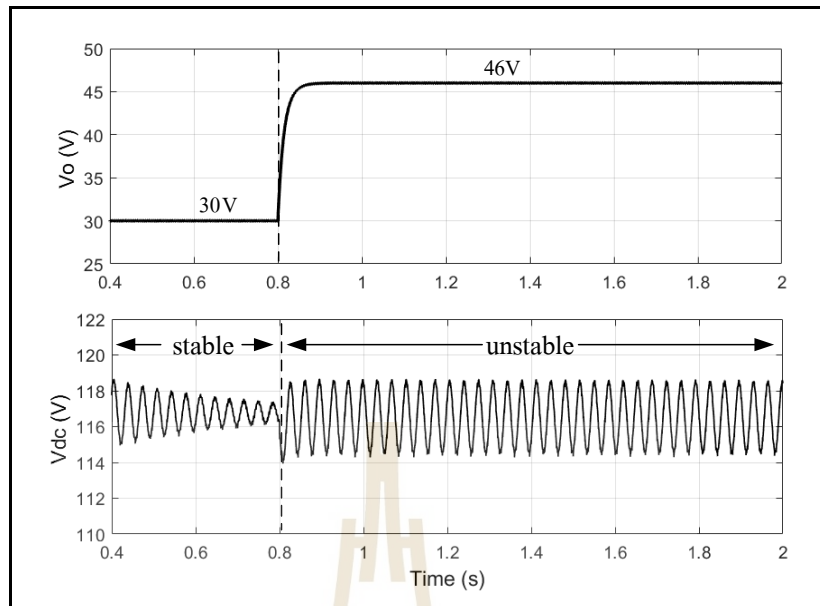
4.5 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์ของมิตเดิลบรูก เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์จะทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากทั้งสองวิธีดังกล่าวกับการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์เช่นเดียวกับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 ถึง รูปที่ 4.9 ดังนี้

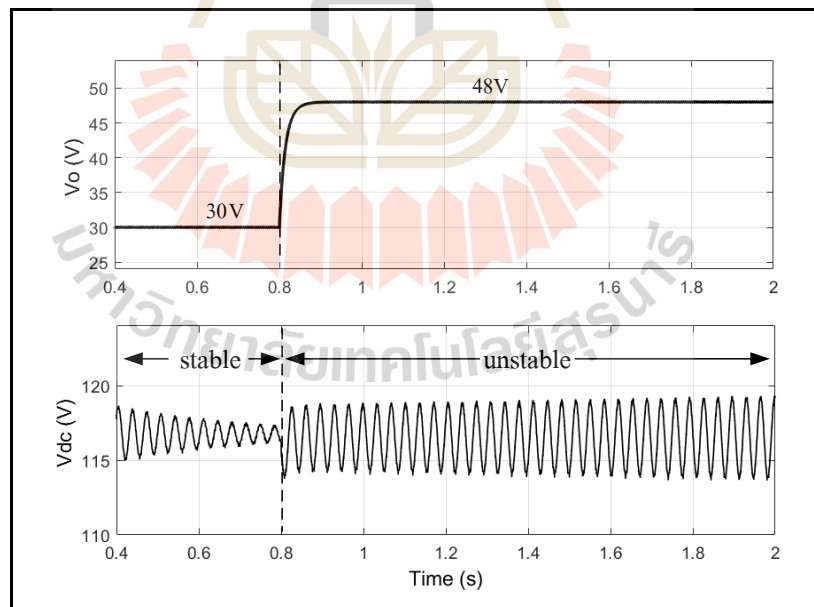


รูปที่ 4.7 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

เมื่อกำหนด $V_o^* = 44$ V



รูปที่ 4.8 การขึ้นชั้นผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
เมื่อกำหนด $V_o^* = 46 \text{ V}$



รูปที่ 4.9 การขึ้นชั้นผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
เมื่อกำหนด $V_o^* = 48 \text{ V}$

จากผลการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9 สังเกตได้ว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 46 V จะทำให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่มากขึ้น หรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในการวิเคราะห์จุดขาดเสถียรภาพโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรुक สามารถคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้อง

4.6 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงที่เป็นทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ระบบที่เป็นเชิงเส้น และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรुकที่ใช้การวิเคราะห์จากอิมพีแดนซ์ของระบบ โดยทั้งสองวิธีจะอาศัยการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 จากผลการวิเคราะห์พบว่าทั้งสองวิธีการที่ได้นำเสนอในบทนี้สามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพได้ตรงกัน อีกทั้งยังมีการยืนยันผลวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ซึ่งพบว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพจากทั้งสองวิธีมีผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรुक สามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถนำไปต่อยอดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกันที่จะได้รับการนำเสนอในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

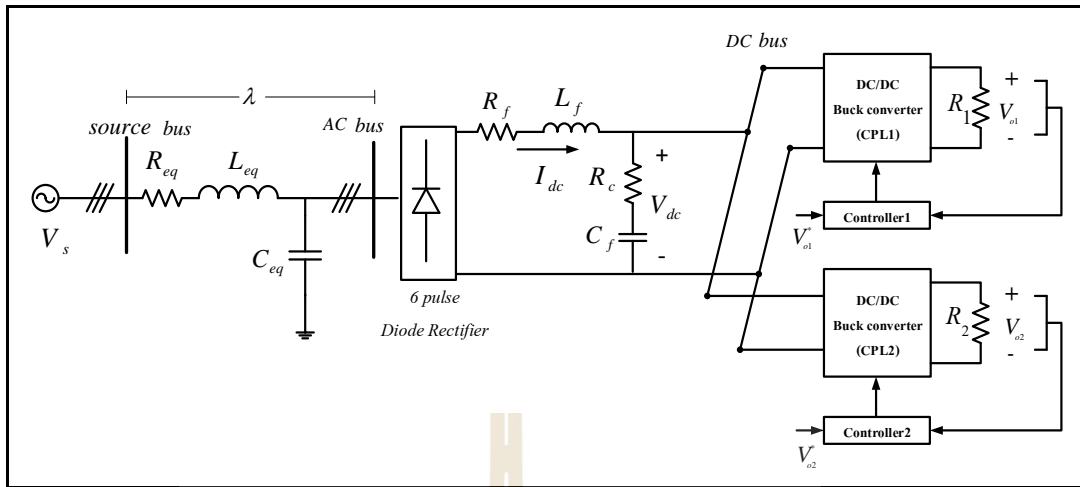
ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม การควบคุมขนานกัน

5.1 บทนำ

ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ได้มีการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอการพิจารณาการเพิ่มจำนวนของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีผ่านวงจรกรอง ที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ ซึ่งการขาดเสถียรภาพนั้นอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง หรือส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ ดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีการเพิ่มของจำนวนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งก็คือ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการต่อขนานกัน โดยในการวิเคราะห์เสถียรภาพจะเริ่มจากการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และการวิเคราะห์เสถียรภาพ

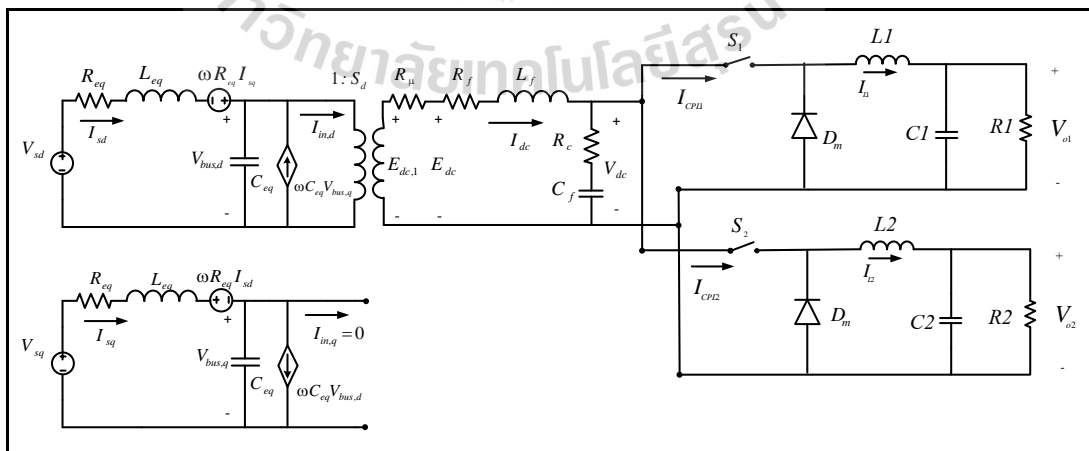
5.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มี โหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาคือวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกันแสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสสมดุล โดยที่ V_s คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล, R_{eq} , L_{eq} และ C_{eq} คือความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ของสายส่งกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ ส่วนที่ 2 ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 คือ วงจรกรองสัญญาณดิซี โดยที่ L_f , R_f , C_f และ R_c คือความเหนี่ยวนำ ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า และความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ตามลำดับ และส่วนสุดท้ายคือ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน 2 ชุด ซึ่ง โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมนี้จะมีพฤติกรรมเป็น โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยที่สามารถปรับค่าแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ให้คงที่ได้ด้วยการปรับแรงดันจาก V_{o1}^* และ V_{o2}^* ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกันในรูปที่ 5.1 สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิฟและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยในส่วนแรกจะใช้วิธีดีคิฟสำหรับพิสูจน์หาแบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกันที่มีการพิจารณาการควบคุมซึ่งสามารถแปลงวงจรให้อยู่ในรูปบนแกนหมุนดีคิฟ โดยกำหนดมุมเฟสการหมุนของสัญญาณการสวิตช์ ($\phi_1 = \phi$) ดังนั้นจะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 5.2 ดังนี้

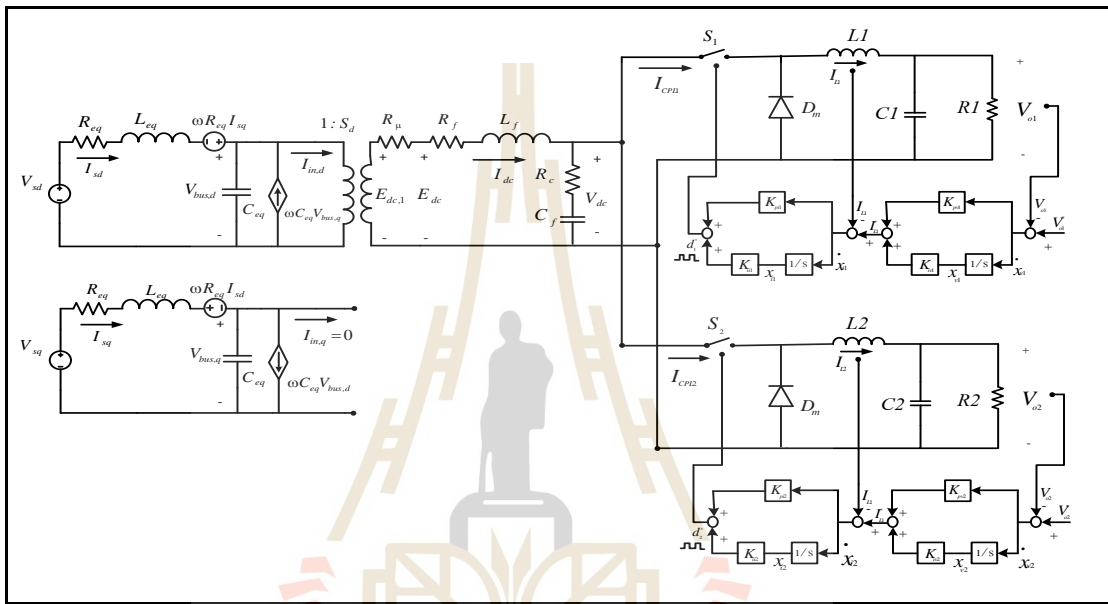


รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลบนแกนดีคิฟเมื่อ กำหนด $\phi_1 = \phi$

จากรูปที่ 5.2 พิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์รวมทั้งสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่ทางฝั่งเอซี จะถูกเปลี่ยนให้อยู่บนแกนหมุนคิกว โดยไดโอดเรียงกระแสสามเฟสได้ถูกเปลี่ยนให้ไปเป็นในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวล สำหรับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้สำหรับการกำจัดสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้งสองชุด โดยแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 5.2 สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยกฎแรงดัน และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ ซึ่งมีสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาดังสมการที่ (5-1) ดังนี้

$$\left. \begin{aligned}
 & \bullet I_{sd} = -\frac{R_{eq} I_{sq}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \frac{V_m \cos(\omega)}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \\
 & \bullet I_{sq} = -\frac{R_{eq} I_{sd}}{L_{eq}} - \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \frac{V_m \sin(\omega)}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \\
 & \bullet V_{bus,d} = \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_{dc}}{C_{eq}} \\
 & \bullet V_{bus,q} = \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\
 & \bullet I_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_{bus,d}}{L_f} - \frac{(R_\mu + R_f + R_c) I_{dc}}{L_f} - \frac{V_{dc}}{L_f} + \frac{R_c u(t)}{L_f} I_L \\
 & \bullet V_{dc} = \frac{I_{dc}}{C_f} - \frac{I_{L1} d_1}{C_f} - \frac{I_{L2} d_2}{C_f} \\
 & \bullet I_{L1} = -\frac{V_{o1}}{L_1} + \frac{V_{dc} d_1}{L_1} \\
 & \bullet V_{o1} = \frac{I_{L1}}{C_1} - \frac{V_{o1}}{R_1 C_1} \\
 & \bullet I_{L2} = -\frac{V_{o2}}{L_2} + \frac{V_{dc} d_2}{L_2} \\
 & \bullet V_{o2} = \frac{I_{L2}}{C_2} - \frac{V_{o2}}{R_2 C_2}
 \end{aligned} \right\} \quad (5-1)$$

การพิสูจน์หาแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังรวมถึงพิจารณาการควบคุมของ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ในรูปที่ 5.1 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมที่พิจารณาเป็นตัว ควบคุมแบบพีไอ จะแบ่งออกเป็น 2 ลูป คือ ลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า และลูปการควบคุม แรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีพารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้ง 2 ชุด คือ K_{pv1} , K_{iv1} , K_{pi1} , K_{ii1} , K_{pv2} , K_{iv2} , K_{pi2} และ K_{ii2} ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.3 ดังนี้



รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิวรวมถึงตัวควบคุมของ วงจรแปลงผันแบบบัก์

การวิเคราะห์โครงสร้างระบบควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้ง 2 ชุด ในรูปที่ 5.3 สามารถเขียนสมการของตัวควบคุมพีไอให้อยู่ในรูป d_1^* และ d_2^* แสดงได้ดังสมการที่ (5-2)

$$\begin{cases} d_1^* = -K_{pi1} I_{L1} - K_{pv1} K_{pi1} V_{o1} + K_{iv1} K_{pi1} X_{v1} + K_{ii1} X_{i1} + K_{pv1} K_{pi1} V_{o1}^* \\ d_2^* = -K_{pi2} I_{L2} - K_{pv2} K_{pi2} V_{o2} + K_{iv2} K_{pi2} X_{v2} + K_{ii2} X_{i2} + K_{pv2} K_{pi2} V_{o2}^* \end{cases} \quad (5-2)$$

พิจารณาจากตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้ง 2 ชุด จะกำหนดให้ X_{v1} , X_{v2} ของลูปแรงดัน และ X_{i1} , X_{i2} ของลูปกระแส เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โดยในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำได้โดยการแทนค่า d_1 และ d_2 ในสมการที่ (5-1) ด้วย d_1^* และ d_1^* จากสมการที่ (5-2) ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ (5-3) ดังนี้

$$\begin{aligned}
 & \bullet \quad I_{sd} = -\frac{R_{eq} I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \frac{V_m \cos(\omega)}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \\
 & \bullet \quad I_{sq} = -\frac{R_{eq} I_{sq}}{L_{eq}} + \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \frac{V_m \sin(\omega)}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \\
 & \bullet \quad V_{bus,d} = \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_{dc}}{C_{eq}} \\
 & \bullet \quad V_{bus,q} = \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\
 & \bullet \quad I_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_{bus,d}}{L_f} - \frac{(R_\mu + R_f + R_c) I_{dc}}{L_f} - \frac{V_{dc}}{L_f} - \frac{R_c K_{pi1} I_{L1}^2}{L_f} - \frac{I_{L1} R_c K_{pv1} K_{pi1} V_{o1}}{L_f} \\
 & \quad + \frac{R_c I_{L1} K_{pv1} K_{pi1} V_{o1}^*}{L_f} + \frac{R_c I_{L1} K_{pv1} K_{pi1} X_{v1}}{L_f} + \frac{R_c I_{L1} K_{ii1} X_{i1}}{L_f} - \frac{R_c K_{pi2} I_{L2}^2}{L_f} - \frac{I_{L2} R_c K_{pv2} K_{pi2} V_{o2}}{L_f} \\
 & \quad + \frac{R_c I_{L2} K_{pv2} K_{pi2} V_{o2}^*}{L_f} + \frac{R_c I_{L2} K_{pv2} K_{pi2} X_{v2}}{L_f} + \frac{R_c I_{L2} K_{ii2} X_{i2}}{L_f} \\
 & \bullet \quad V_{dc} = \frac{I_{dc}}{C_f} + \frac{K_{pi1} I_{L1}^2}{C_f} + \frac{K_{pv1} K_{pi1} I_{L1} V_{o1}}{C_f} - \frac{K_{pv1} K_{pi1} I_{L1} V_{o1}^*}{C_f} - \frac{K_{pv1} K_{pi1} I_{L1} X_{v1}}{C_f} - \frac{K_{ii1} I_{L1} X_{i1}}{C_f} \\
 & \quad + \frac{K_{pi2} I_{L2}^2}{C_f} + \frac{K_{pv2} K_{pi2} I_{L2} V_{o2}}{C_f} - \frac{K_{pv2} K_{pi2} I_{L2} V_{o2}^*}{C_f} - \frac{K_{pv2} K_{pi2} I_{L2} X_{v2}}{C_f} - \frac{K_{ii2} I_{L2} X_{i2}}{C_f} \\
 & \bullet \quad I_{L1} = -\frac{V_{o1}}{L_1} - \frac{V_{dc} K_{pi1} I_{L1}}{L_1} - \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{dc} V_{o1}}{L_1} + \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{dc} V_{o1}^*}{L_1} + \frac{K_{iv1} K_{pi1} V_{dc} X_{v1}}{L_1} - \frac{K_{ii1} V_{dc} X_{i1}}{L_1} \\
 & \bullet \quad V_{o1} = \frac{I_{L1}}{C_1} - \frac{V_{o1}}{R_1 C_1} \\
 & \bullet \quad X_{v1} = -V_{o1} + V_{o1}^* \\
 & \bullet \quad X_{i1} = -I_{L1} - K_{pv1} V_{o1} + K_{pv1} V_{o1}^* + K_{iv1} X_{v1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{L2} = -\frac{V_{o2}}{L_2} - \frac{V_{dc} K_{pi2} I_{L2}}{L_2} - \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{dc} V_{o2}}{L_2} + \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{dc} V_{o2}^*}{L_2} + \frac{K_{iv2} K_{pi2} V_{dc} X_{v2}}{L_2} - \frac{K_{ii2} V_{dc} X_{i2}}{L_2} \\ \dot{V}_{o2} = \frac{I_{L2}}{C_2} - \frac{V_{o2}}{R_2 C_2} \\ \dot{X}_{v2} = -V_{o2} + V_{o2}^* \\ \dot{X}_{i2} = -I_{L2} - K_{pv2} V_{o2} + K_{pv2} V_{o2}^* + K_{iv2} X_{v2} \end{cases} \quad (5-3)$$

จากสมการที่ (5-3) จะเห็นว่าระบบสมการยังเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นสามารถทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.2.1

5.2.1 การทำให้เป็นเชิงเส้น

จากสมการที่ (5-3) สามารถทำแบบจำลองให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้นได้ โดยอาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นได้โดยมีรูปแบบดังสมการที่ (5-4) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{\delta \mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (5-4)$$

เมื่อ

$$\delta \mathbf{x} = \left[\delta I_{sd} \quad \delta I_{sq} \quad \delta V_{bus,d} \quad \delta V_{bus,q} \quad \delta I_{dc} \quad \delta V_{dc} \quad \delta I_{L1} \quad \delta V_{o1} \quad \delta X_{v1} \quad \delta X_{i1} \quad \delta I_{L2} \quad \delta V_{o2} \quad \delta X_{v2} \quad \delta X_{i2} \right]^T$$

$$\delta \mathbf{u} = \left[\delta V_s \quad \delta V_{o1}^* \quad \delta V_{o2}^* \right]^T$$

$$\delta \mathbf{y} = \left[\delta V_{dc} \quad \delta V_{o1} \quad \delta V_{o2} \right]^T$$

และรายละเอียดของ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ในสมการที่ (5-4) แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix}
 \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_f} & 0 & -\frac{(R_\mu + R_f + R_c)}{L_f} & -\frac{1}{L_f} & a(5,7) & -\frac{R_c K_{pv1} K_{pi1} I_{L1,o}}{L_f} & \frac{R_c K_{iv1} K_{pi1} I_{L1,o}}{L_f} & \frac{R_c K_{ii1} I_{L1,o}}{L_f} & a(5,11) & -\frac{R_c K_{pv2} K_{pi2} I_{L2,o}}{L_f} & \frac{R_c K_{iv2} K_{pi2} I_{L2,o}}{L_f} & \frac{R_c K_{ii2} I_{L2,o}}{L_f} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & a(6,7) & \frac{K_{pv1} K_{pi1} I_{L1,o}}{C_f} & -\frac{K_{iv1} K_{pi1} I_{L1,o}}{C_f} & \frac{K_{ii1} I_{L1,o}}{C_f} & a(6,11) & \frac{K_{pv2} K_{pi2} I_{L2,o}}{C_f} & -\frac{K_{iv2} K_{pi2} I_{L2,o}}{C_f} & \frac{K_{ii2} I_{L2,o}}{C_f} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & -\frac{K_{pi1} V_{dc,o}}{L_1} & \frac{K_{pi1} K_{pv1} V_{dc,o}}{L_1} & \frac{K_{iv1} K_{pv1} V_{dc,o}}{L_1} & \frac{K_{ii1} V_{dc,o}}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{C_1 R_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv1} & K_{iv1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(11,6) & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{pi2} V_{dc,o}}{L_2} & -\frac{K_{pi2} K_{pv2} V_{dc,o}}{L_2} & \frac{K_{iv2} K_{pv2} V_{dc,o}}{L_2} & -\frac{K_{ii2} V_{dc,o}}{L_2} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{C_2 R_2} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv2} & K_{iv2} & 0
 \end{bmatrix}$$

14x14

$$a(5,7) = -\frac{2R_c K_{pi1} I_{L1,o}}{L_f} - \frac{R_c K_{pv1} K_{pi1} V_{o1,o}}{L_f} + \frac{R_c K_{iv1} K_{pi1} X_{v1,o}}{L_f} + \frac{R_c K_{ii1} X_{i1,o}}{L_f} + \frac{R_c K_{pv1} K_{pi1} V_{o1,o}^*}{L_f}$$

$$a(5,11) = -\frac{2R_c K_{pi2} I_{L2,o}}{L_f} - \frac{R_c K_{pv2} K_{pi2} V_{o2,o}}{L_f} + \frac{R_c K_{iv2} K_{pi2} X_{v2,o}}{L_f} + \frac{R_c K_{ii2} X_{i2,o}}{L_f} + \frac{R_c K_{pv2} K_{pi2} V_{o2,o}^*}{L_f}$$

$$a(6,7) = \frac{2K_{pi1} I_{L1,o}}{C_f} + \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{o1,o}}{C_f} - \frac{K_{iv1} K_{pi1} X_{v1,o}}{C_f} - \frac{K_{ii1} X_{i1,o}}{C_f} - \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{o1,o}^*}{C_f}$$

$$a(6,11) = \frac{2K_{pi2} I_{L2,o}}{C_f} + \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{o2,o}}{C_f} - \frac{K_{iv2} K_{pi2} X_{v2,o}}{C_f} - \frac{K_{ii2} X_{i2,o}}{C_f} - \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{o2,o}^*}{C_f}$$

$$a(7,6) = -\frac{K_{pi1} I_{L1,o}}{L_1} - \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{o1,o}}{L_1} + \frac{K_{iv1} K_{pi1} X_{v1,o}}{L_1} + \frac{K_{ii1} X_{i1,o}}{L_1} + \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{o1,o}^*}{L_1}$$

$$a(11,6) = -\frac{K_{pi2} I_{L2,o}}{L_2} - \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{o2,o}}{L_2} + \frac{K_{iv2} K_{pi2} X_{v2,o}}{L_2} + \frac{K_{ii2} X_{i2,o}}{L_2} + \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{o2,o}^*}{L_2}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix}
 \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\cos(\lambda)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\
 \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sin(\lambda)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{R_c K_{pv1} K_{pi1} I_{L1,o}}{L_f} & \frac{R_c K_{pv2} K_{pi2} I_{L2,o}}{L_f} \\
 0 & \frac{K_{pv1} K_{pi1} I_{L1,o}}{C_f} & \frac{K_{pv2} K_{pi2} I_{L2,o}}{C_f} \\
 0 & \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{dc,o}}{L_1} & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 \\
 0 & K_{pv1} & 0 \\
 0 & 0 & \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{dc,o}}{L_2} \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & K_{pv2}
 \end{bmatrix}_{14 \times 3}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0
 \end{bmatrix}_{3 \times 14}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

5.2.2 การคำนวณค่าในสถานะคงตัว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-4) มีความสอดคล้องสำหรับการคำนวณค่า $V_{dc,o}$, λ_o , $V_{o1,o}$, $V_{o2,o}$, $I_{L1,o}$, $I_{L2,o}$, $X_{v1,o}$, $X_{v2,o}$, $X_{i1,o}$ และ $X_{i2,o}$ โดยในส่วนแรกสามารถประยุกต์สมการการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับการคำนวณค่าในสถานะคงตัวทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ในที่นี้คือ $V_{bus,o}$ และ λ_o ซึ่งได้มีการพิสูจน์ไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2 ดังนั้นค่าในสถานะคงตัวที่สอดคล้องกับแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-4) สามารถคำนวณได้จากค่า $V_{bus,o}$ และ λ_o โดยอาศัยสมการที่ (5-5) ดังนี้

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dc,o} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{bus,o}) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,o} - r_L I_{dc,o} \\ V_{o1,o} = V_{o1}^*, \quad V_{o2,o} = V_{o2}^* \\ I_{L1,o} = \frac{V_{o1,o}}{R_1}, \quad I_{L2,o} = \frac{V_{o2,o}}{R_2} \\ X_{v1,o} = \frac{I_{L1,o}}{K_{iv1}}, \quad X_{v2,o} = \frac{I_{L2,o}}{K_{iv2}} \\ X_{i1,o} = \frac{V_{o1}}{K_{ii1} V_{dc,o}}, \quad X_{i2,o} = \frac{V_{o2}}{K_{ii2} V_{dc,o}} \end{array} \right. \quad (5-5)$$

โดยที่

$$I_{dc,o} = \frac{\sqrt{3} \left| \frac{V_s e^{j0} - V_{bus,o} e^{-j\lambda}}{Z e^{j\gamma}} \right|}{\sqrt{\frac{3}{2}} \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right)}$$

$$Z = \sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}, \quad \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \right)$$

5.2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

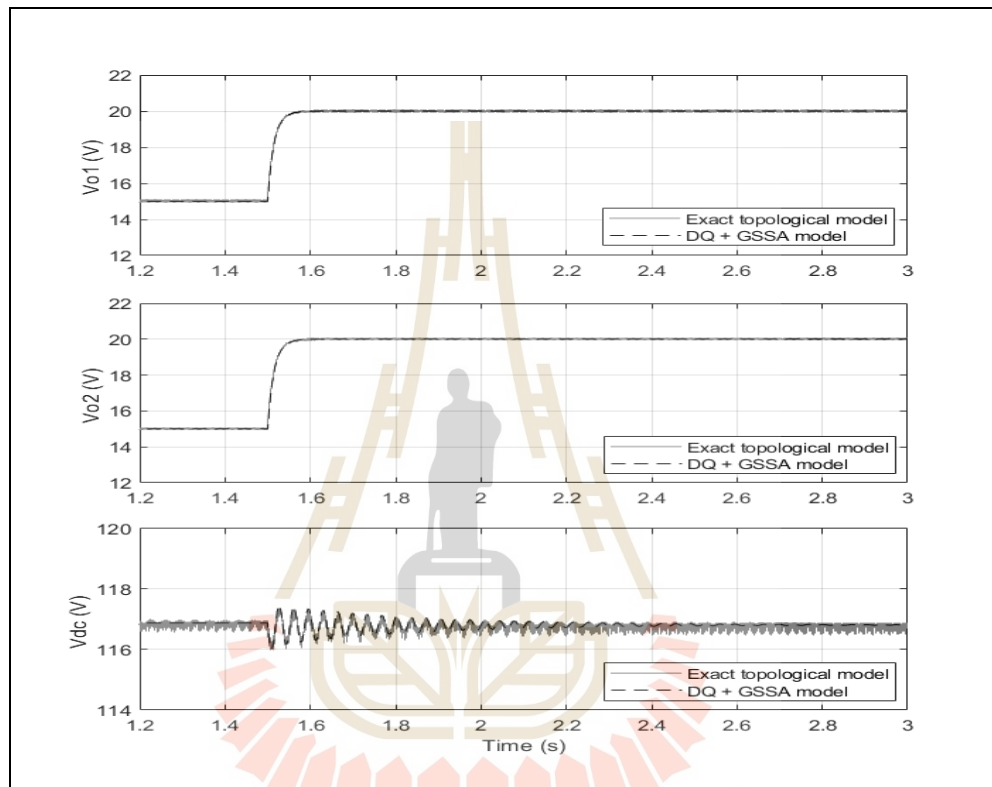
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมขนานกัน ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทเลอร์อันดับหนึ่ง แสดงได้ดังสมการที่ (5-4) โดยจะมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นและการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 5.1 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นสำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 5.1 พร้อมด้วยพารามิเตอร์ของรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์ แสดงได้ดังนี้ $K_{pv1} = K_{pv2} = 0.07$, $K_{iv1} = K_{iv2} = 4.44$, $K_{pi1} = K_{pi2} = 1.538$ และ $K_{ii1} = K_{ii2} = 7211$ ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1

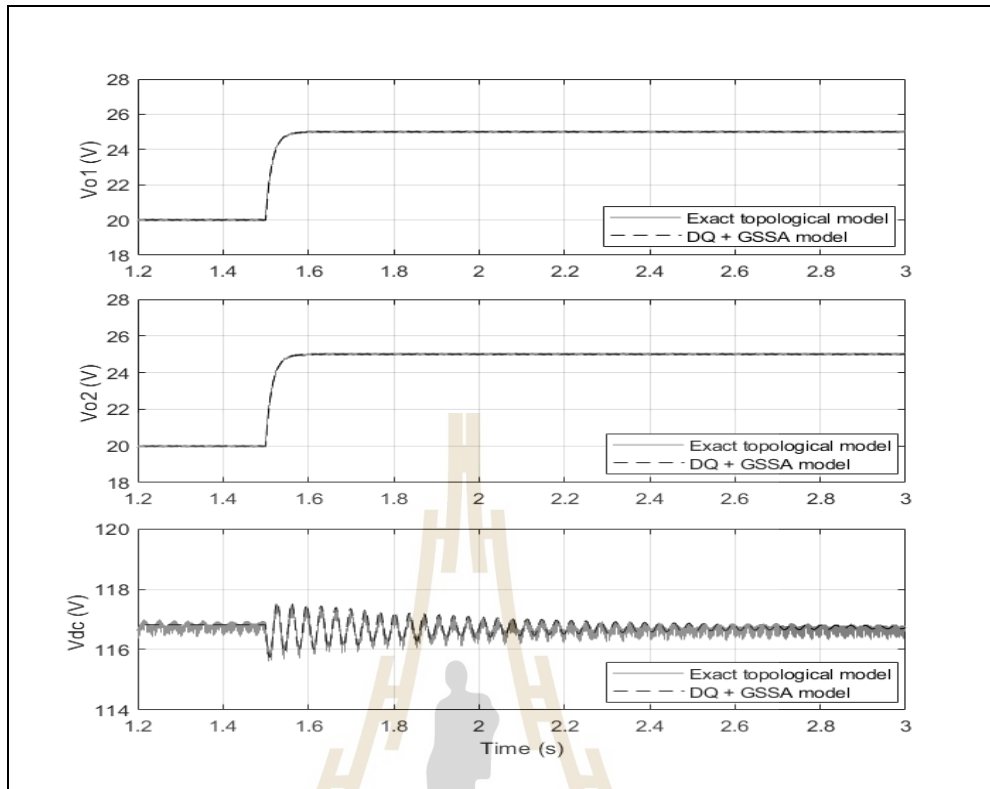
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	50 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	24 μ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
R_f	0.1 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_f	30 mH	ความเหนี่ยวนำวงจรกรอง
R_c	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_f	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าวงจรกรอง
$L_1 = L_2 (\Delta I_L \leq 0.2A)$	15 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์
$C_1 = C_2 (\Delta V_o \leq 2.8mV)$	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์
$R_1 = R_2$	15 Ω	ความต้านทานของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์

รูปที่ 5.4 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) แรงดันเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 (V_{o1}) และแรงดันเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 2 (V_{o2}) โดยมีการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดของวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุด

ที่ 1 (V_{o1}^*) และแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชูดที่ 2 (V_{o2}^*) จาก 15 V ไปเป็น 20 V ที่เวลา 1.5 วินาที และรูปที่ 5.5 แสดงผลการตอบสนองเช่นเดียวกับรูปที่ 5.4 โดยมีการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดของวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชูดที่ 1 (V_{o1}^*) และแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชูดที่ 2 (V_{o2}^*) จาก 20 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 1.5 วินาที



รูปที่ 5.4 ผลการตอบสนอง V_{o1} , V_{o2} และ V_{dc} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_{o1}^* และ V_{o2}^* จาก 15 V ไปเป็น 20 V



รูปที่ 5.5 ผลการตอบสนอง V_{o1} , V_{o2} และ V_{dc} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1
ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_{o1}^* และ V_{o2}^* จาก 20 V ไปเป็น 25 V

จากผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณในรูปที่ 5.4 และ 5.5 พบว่า ผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว ดังนั้นการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ขนานกันด้วยวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ถือเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้

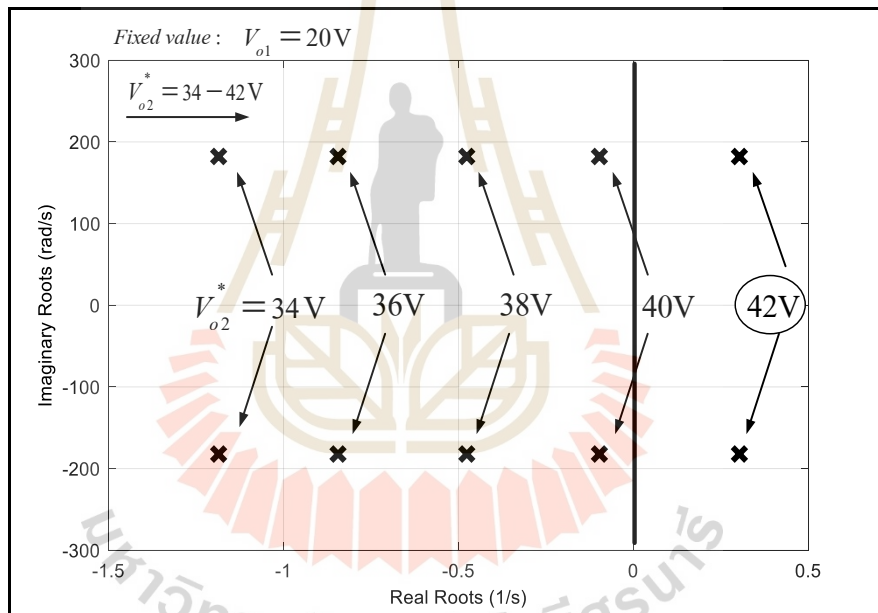
5.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุมขนานกัน

แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุมขนานกันที่ได้จากสมการที่ (5-4) มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการศึกษาและตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่จ่ายโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยจะมีการ

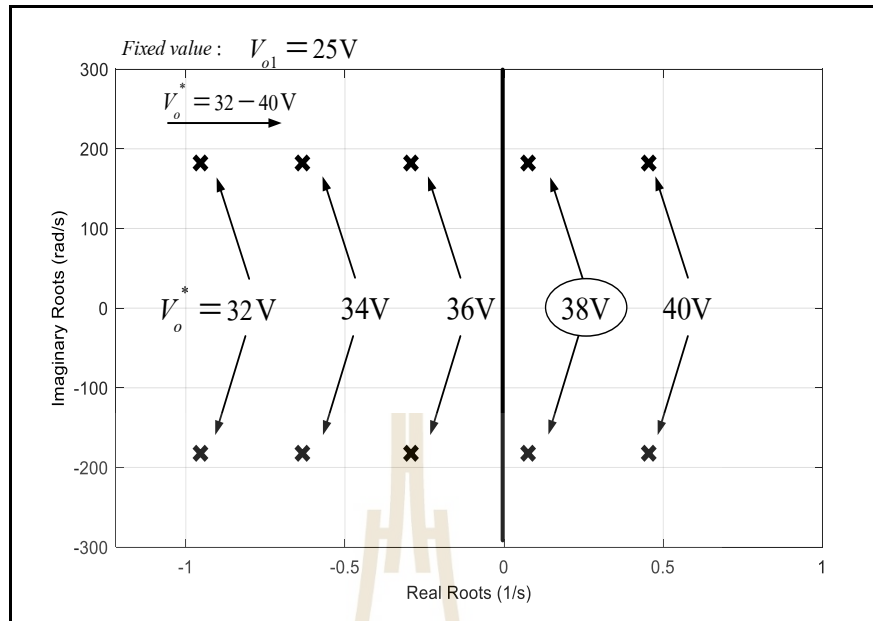
วิเคราะห์ 2 วิธี คือ ใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงและเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก ซึ่งจะมีการนำเสนอในหัวข้อถัดไป

5.3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงจะดำเนินการเช่นเดียวกันกับกรณีของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมหนึ่งตัว โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 2 (V_{o2}^*) และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 (V_{o1}^*) เท่ากับ 20 V และ 25 V เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งค่าเจาะจงของระบบ ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ



รูปที่ 5.6 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง เมื่อกำหนด $V_{o1}^* = 20\text{V}$



รูปที่ 5.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง เมื่อกำหนด $V_{o1}^* = 25 \text{ V}$

จากรูปที่ 5.6 เมื่อทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชูดที่ 2 จาก 34 V จนถึง 42 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชูดที่ 1 เท่ากับ 20 V พบว่าที่แรงดันแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชูดที่ 2 เท่ากับ 42 V จะทำให้ส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่ามากกว่าศูนย์ หรือมีตำแหน่งอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอส ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบขาดเสถียรภาพ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชูดที่ 2 มีค่ามากกว่า 42 V

จากรูปที่ 5.7 เมื่อทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชูดที่ 2 จาก 32 V จนถึง 40 V โดยทำการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชูดที่ 1 เท่ากับ 25 V พบว่าที่แรงดันแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชูดที่ 2 เท่ากับ 38 V จะทำให้ส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่ามากกว่าศูนย์ หรือมีตำแหน่งอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอส ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบขาดเสถียรภาพ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชูดที่ 2 มีค่ามากกว่า 38 V

5.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูก

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูกเมื่อโหลดขนานกัน 2 ชุด ซึ่งจากหลักเกณฑ์การวิเคราะห์เสถียรภาพ คือ พิจารณาที่จากเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) และอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) ซึ่งเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม แต่อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) หรืออิมพีแดนซ์ของวงจรทางฝั่งโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน ทำให้โดยการขนานกันระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่หนึ่ง ($Z_{in,1}$) และอินพุตอิมพีแดนซ์ของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่สอง ($Z_{in,2}$) นั่นคือ $Z_{in,1} // Z_{in,2}$ ดังสมการที่ (5-6) จะได้อินพุตอิมพีแดนซ์ ($Z_{in,total}$) ของระบบที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) และอินพุตอิมพีแดนซ์ ($Z_{in,total}$) เมื่อมีโหลดขนานกัน n ตัว ดังสมการที่ (5-7)

$$Z_{in,total} = Z_{in,1} // Z_{in,2} // Z_{in,3} \dots // Z_{in,n}$$

$$= \left(\frac{1}{Z_{in,1}} + \frac{1}{Z_{in,2}} + \frac{1}{Z_{in,3}} + \dots + \frac{1}{Z_{in,n}} \right)^{-1} \quad (5-6)$$

ดังนั้นจะได้

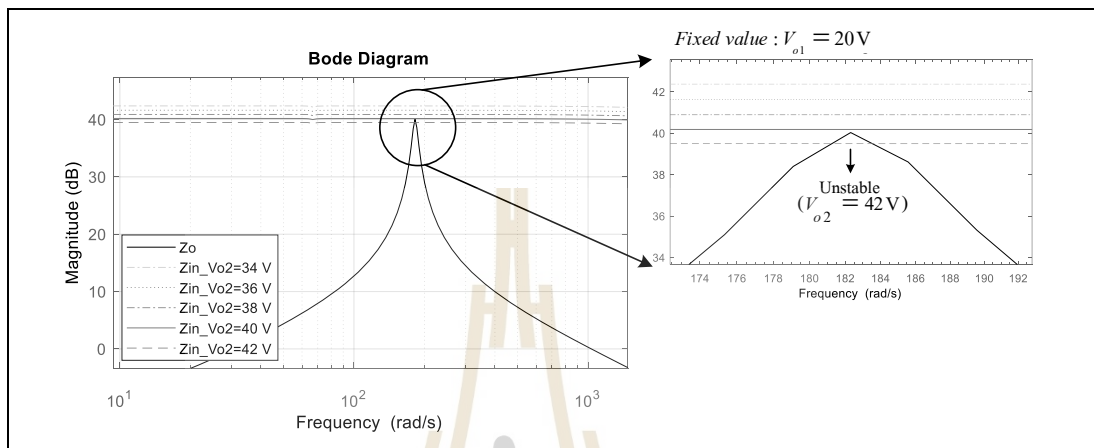
$$\frac{Z_o}{Z_{in,total}} = \frac{Z_o}{\left(\frac{1}{Z_{in,1}} + \frac{1}{Z_{in,2}} + \frac{1}{Z_{in,3}} + \dots + \frac{1}{Z_{in,n}} \right)^{-1}}$$

$$= \frac{Z_o}{Z_{in,1}} + \frac{Z_o}{Z_{in,2}} + \frac{Z_o}{Z_{in,3}} + \dots + \frac{Z_o}{Z_{in,n}} \quad (5-7)$$

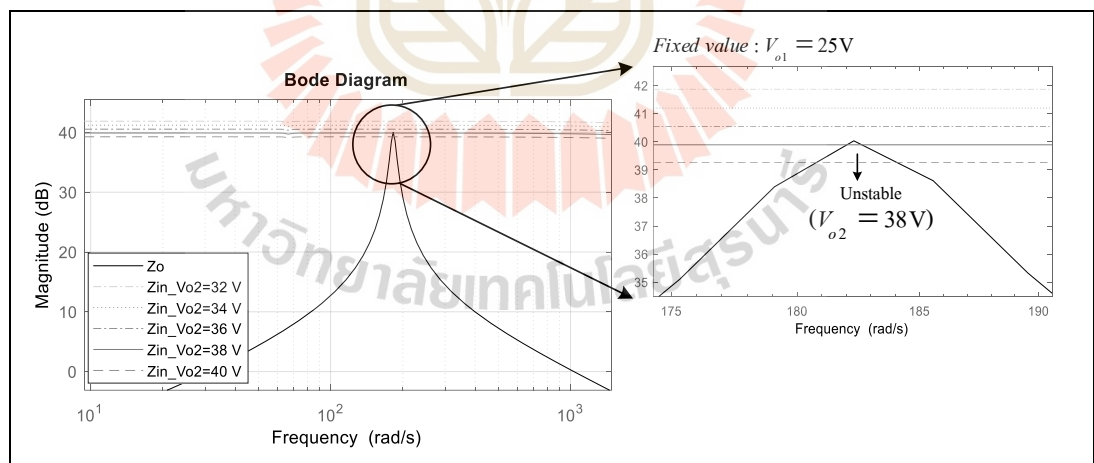
โดยที่ n คือ จำนวนของโหลดที่ขนานกัน

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 2 จาก 30 V จนถึง 40 V โดยทำการคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ โหลด

วงจรแปลงผันแบบบัคคั้งชุดที่ 1 เท่ากับ 20 V และ 25 V เพื่อสังเกตขนาดของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์และอินพุตอิมพีแดนซ์ในย่านความถี่ต่าง ๆ ของระบบ ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ



รูปที่ 5.8 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} เมื่อคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลด วงจรแปลงผันแบบบัคคั้งชุดที่ 1 เท่ากับ 20 V



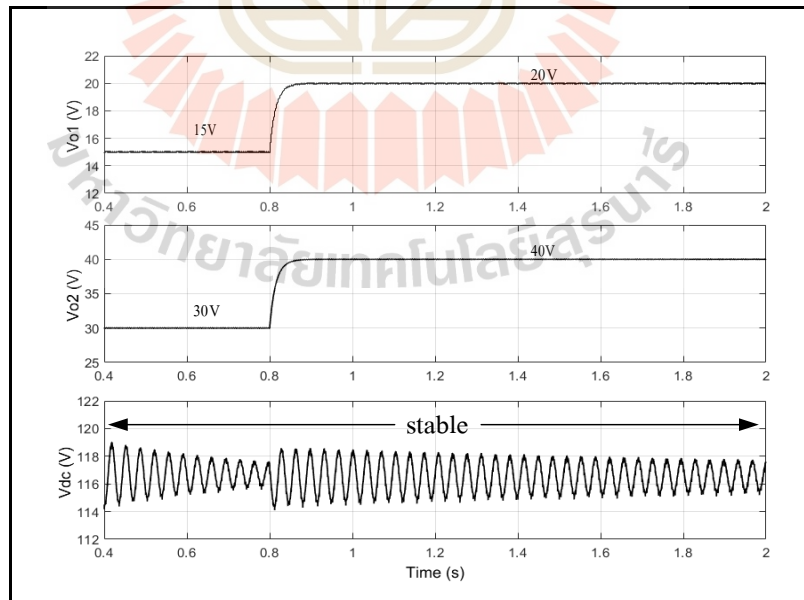
รูปที่ 5.9 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} เมื่อคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลด วงจรแปลงผันแบบบัคคั้งชุดที่ 1 เท่ากับ 25 V

จากรูปที่ 5.8 เมื่อคงค่าแรงดันเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคคั้งชุดที่ 1 เท่ากับ 20 V และปรับค่าแรงดันเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคคั้งชุดที่ 2 ให้สูงขึ้นจะทำให้

ขนาดของ Z_{in} ลดลงในทุก ๆ ย่านความถี่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 42 V ขนาดของ Z_o จะมากกว่าขนาดของ Z_{in} นั่นคือระบบเริ่มมีการขาดเสถียรภาพ ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงดังแสดงในรูปที่ 5.6 และจากรูปที่ 5.9 เมื่อคงค่าแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 1 เท่ากับ 25 V และปรับค่าแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 2 ให้เพิ่มขึ้นจนถึง 38 V ขนาดของ Z_o จะมากกว่าขนาดของ Z_{in} นั่นคือระบบเริ่มมีการขาดเสถียรภาพ ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงดังแสดงในรูปที่ 5.7

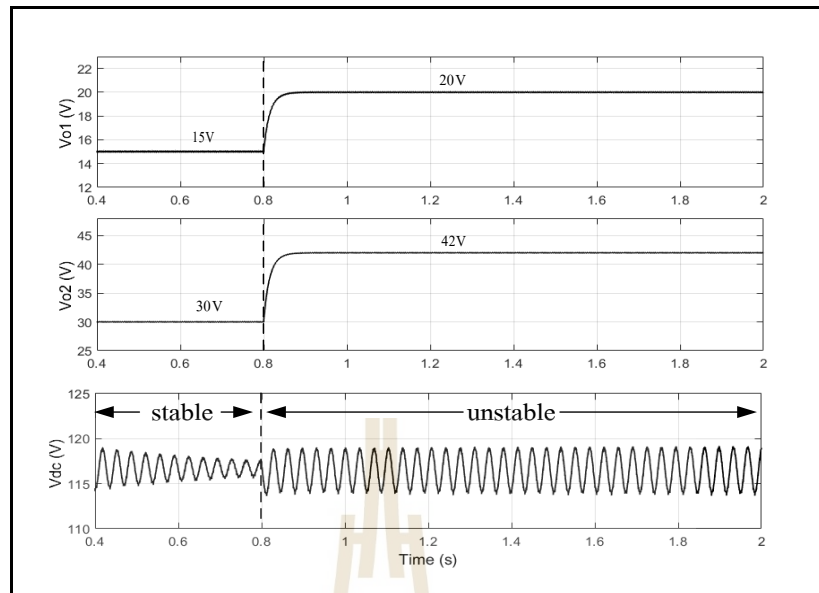
5.3.3 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโพลเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์ของมิดเดิลบรูก สามารถยืนยันผลการวิเคราะห์ได้โดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากทั้งสองวิธีด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์เช่นเดียวกับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.10 ถึง รูปที่ 5.12 ดังนี้

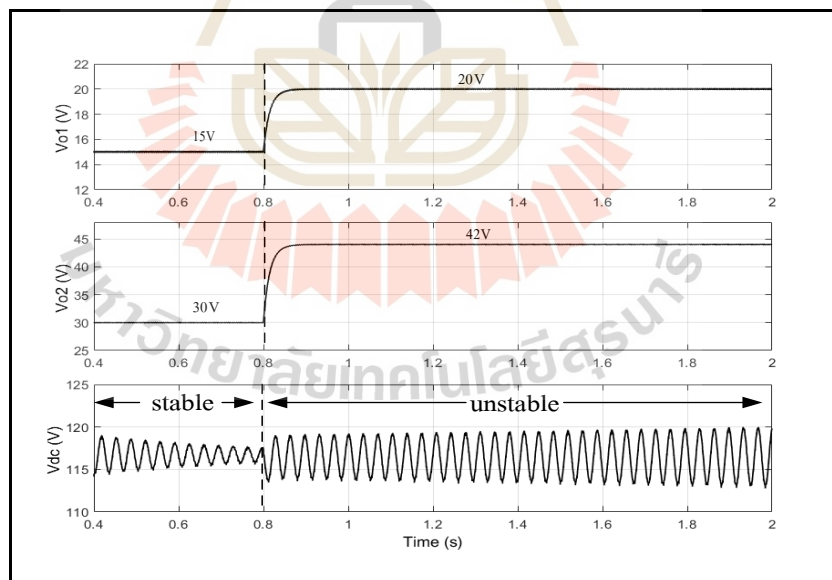


รูปที่ 5.10 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

เมื่อกำหนด $V_{o1}^* = 20 \text{ V}$ และ $V_{o2}^* = 40 \text{ V}$



รูปที่ 5.11 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
เมื่อกำหนด $V_{o1}^* = 20 \text{ V}$ และ $V_{o2}^* = 42 \text{ V}$



รูปที่ 5.12 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
เมื่อกำหนด $V_{o1}^* = 20 \text{ V}$ และ $V_{o2}^* = 44 \text{ V}$

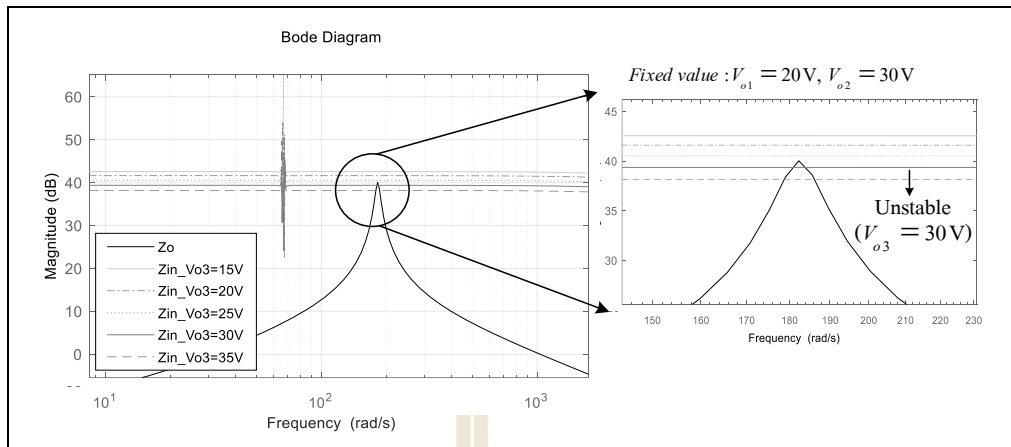
จากรูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.12 สังเกตได้ว่า เมื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 1 เท่ากับ 20 V และปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 2 เพิ่มขึ้นจนถึง 42 V จะทำให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) เกิดการ กระเพื่อมของแรงดันที่มากขึ้น หรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ ดังนั้น แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นที่ได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก มาใช้การพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

5.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกันมากกว่า 2 ชุดด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก

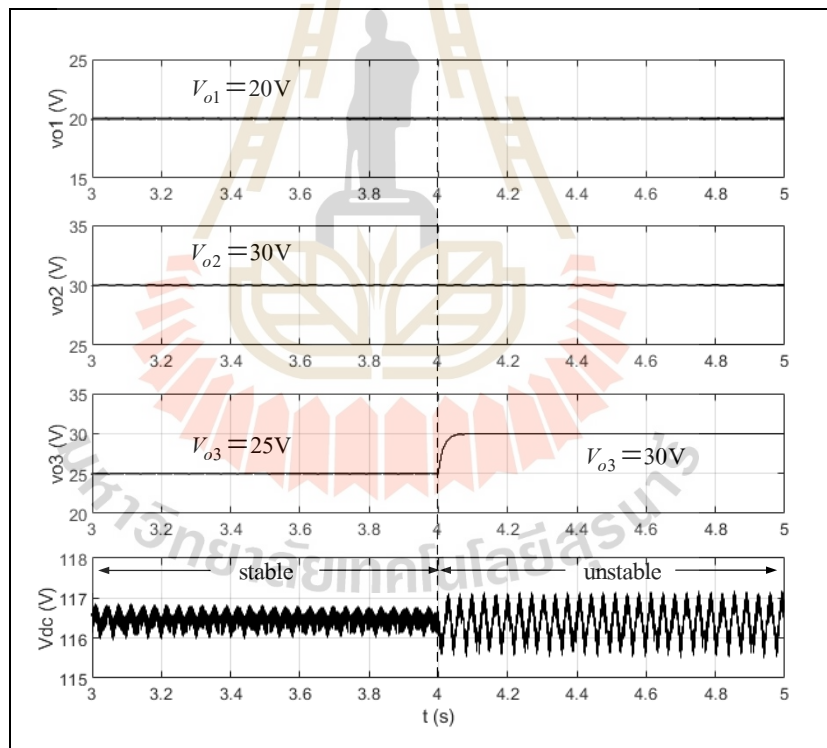
จากที่กล่าวมาข้างต้นการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูกจะพิจารณาจากเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) หรืออิมพีแดนซ์ทางฝั่งแหล่งจ่ายในที่นี่คือวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) หรืออิมพีแดนซ์ทางฝั่งแหล่งโหลดในที่นี่คือวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน เมื่อมี โหลดของวงจรทางฝั่งโหลดขนานกันเพิ่มขึ้น อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรทางฝั่งโหลดก็จะเปลี่ยนไปซึ่งสามารถหาได้โดยการนำอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรทางฝั่งโหลดแต่ละชุดมาขนานกันแสดงได้ดังสมการที่ (5-6) จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูกกรณีที่มี โหลดขนานกันนี้ไม่จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ จึงไม่มีความยุ่งยากและซับซ้อนเท่ากับการใช้วิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจงในการวิเคราะห์ เพื่อยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการดังกล่าวจึงได้มีการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกรณีที่มี โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน 3 ชุด และขนานกัน 4 ชุด โดยอาศัยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก และมีการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพกับการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์

5.4.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกรณีที่มีโหลดขนานกัน 3 ชุด

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีที่มี โหลดขนานกัน 3 ชุดจะทำการคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 1 และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 2 เท่ากับ 20 V และ 30 V ตามลำดับ จากนั้นทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 3 ให้เพิ่มขึ้นทีละ 5 V จาก 15 V จนถึง 30 V เพื่อสังเกตขนาดของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์และอินพุตอิมพีแดนซ์ในย่านความถี่ต่าง ๆ ของระบบ ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 5.13 และมีการยืนยันผลการวิเคราะห์จากการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 5.14 ตามลำดับ



รูปที่ 5.13 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} กรณีโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งขนานกัน 3 ชุด



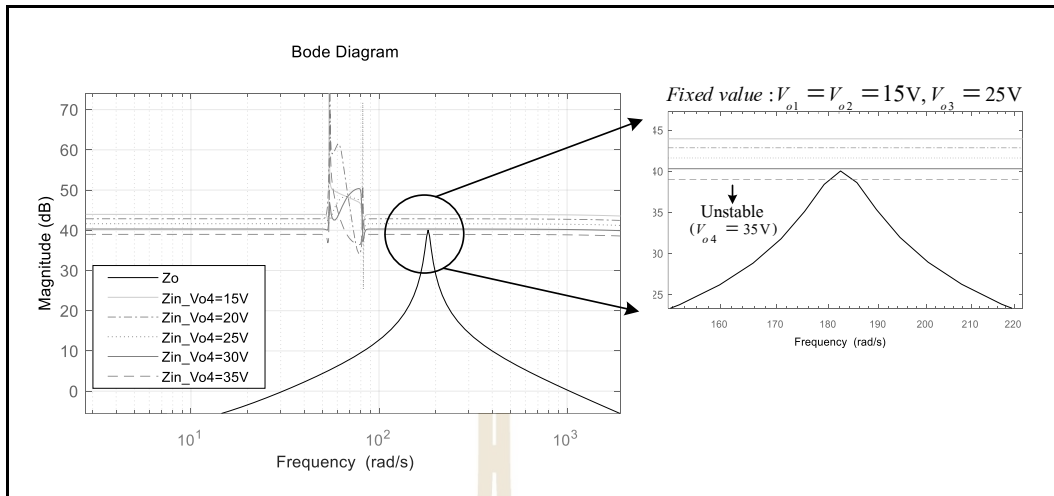
รูปที่ 5.14 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 5.13 เมื่อคงค่าแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งชุดที่ 1 และชุดที่ 2 จากนั้นทำการปรับเพิ่มค่าแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งชุดที่ 3 ให้เพิ่มขึ้นทีละ 5 V จาก 15 V จนถึง 30 V จะทำให้ขนาดของ Z_{in} ลดลงในทุก ๆ ย่านความถี่ ซึ่งจะเห็น

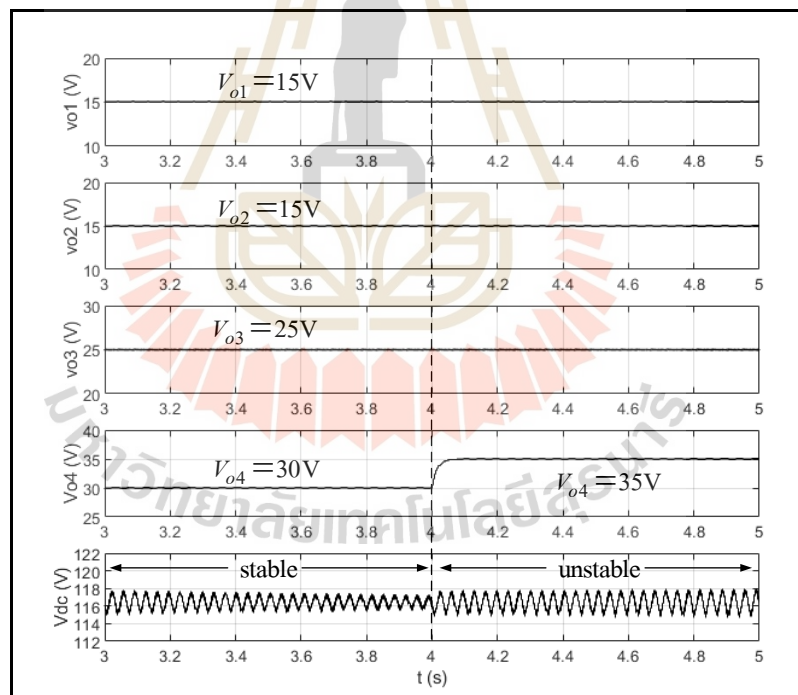
ได้ว่าเมื่อแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 3 มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 30 V จะทำให้ขนาดของ Z_o มากกว่าขนาดของ Z_{in} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบเริ่มมีการขาดเสถียรภาพ และจากการยืนยันผลการวิเคราะห์โดยใช้การจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 5.14 พบว่าเมื่อคงค่าแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 1 และซูดที่ 2 จากนั้นทำการปรับแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 3 ให้เพิ่มขึ้นจาก 25 V ไปเป็น 30 V จะเห็นได้ว่าในช่วงที่แรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 3 มีค่าเท่ากับ 25 V ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่ลดลงเรื่อย ๆ นั่นคือระบบยังไม่ขาดเสถียรภาพ และเมื่อปรับแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 3 ให้เพิ่มขึ้นเป็น 30 V พบว่าขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่มากขึ้น หรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวและผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูกมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกรณีที่มีโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน 3 ซูด ด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก โดยอาศัยขนานกันของอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรทางฝั่งโพลทั้ง 3 ซูด สามารถคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

5.4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกรณีที่มีโพลขนานกัน 4 ซูด

การวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีที่มีโพลขนานกัน 4 ซูด จะทำการคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 1 และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 2 เท่ากับ 15 V คงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 3 เท่ากับ 25 V จากนั้นทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 4 ให้เพิ่มขึ้นทีละ 5 V จาก 15 V จนถึง 35 V เพื่อสังเกตขนาดของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์และอินพุตอิมพีแดนซ์ในย่านความถี่ต่าง ๆ ของระบบ ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 5.15 และมีการยืนยันผลการวิเคราะห์จากการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 5.16 ตามลำดับ



รูปที่ 5.15 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} กรณีโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งขนานกัน 4 ชุด



รูปที่ 5.16 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 5.15 เมื่อคงค่าแรงดันเอาต์พุตของ โพลดวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งชุดที่ 1 ชุดที่ 2 และชุดที่ 3 จากนั้นทำการปรับเพิ่มค่าแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งชุดที่ 4 ให้เพิ่มขึ้นทีละ 5 V จาก 15 V จนถึง 35 V จะทำให้ขนาดของ Z_{in} ลดลงในทุก ๆ ย่านความถี่ ซึ่ง

จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 4 มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 35 V จะทำให้ขนาดของ Z_o มากกว่าขนาดของ Z_{in} ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบเริ่มมีการขาดเสถียรภาพ และจากการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 5.16 พบว่าเมื่อคงค่าแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 1 ซูดที่ 2 และซูดที่ 3 จากนั้นทำการปรับแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 4 ให้เพิ่มขึ้นจาก 30 V ไปเป็น 35 V จะเห็นได้ว่าในช่วงที่แรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 4 มีค่าเท่ากับ 30 V ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่ลดลงเรื่อย ๆ นั่นคือระบบยังไม่ขาดเสถียรภาพ และเมื่อปรับแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 4 ให้เพิ่มขึ้นเป็น 35 V พบว่าขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่มากขึ้น หรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ ซึ่งจะเห็นได้จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวและผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูกมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกรณีที่มีโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่มีการควบคุมขนานกัน 4 ซูด ด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก โดยการอาศัยการขนานกันของอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรทางฝั่งโพลทั้ง 4 ซูด สามารถคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

5.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชซีเป็นดีซีที่มีโพลเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่มีการควบคุมขนานกันสองซูด โดยอาศัยวิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยมีการพัฒนาต่อยอดเนื้อหาจากการพิสูจน์ในบทที่ 3 และมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากการตรวจสอบความถูกต้องพบว่าผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นมีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งในสถานะชั่วคราว และในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นถึงสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้องแม่นยำสามารถนำไปใช้ในการคาดเดาเสถียรภาพของระบบได้ จากนั้นจึงมีการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก โดยทั้งสองวิธีสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพได้ตรงกัน อีกทั้งยังมีการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้มากยิ่งขึ้น และยังมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกรณีที่มีโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดขนานกันมากกว่าสองซูด โดยใช้เกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูกที่ได้อาศัยเอาต์พุตอิมพีแดนซ์และอินพุตอิมพีแดนซ์

ของระบบ ซึ่งจากการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์พบว่าเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิล
บรอดที่ใช้อินพุตอิมพีแดนซ์ของระบบขนานกันตามจำนวนของโหลด สามารถคาดเดาจุดขาด
เสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้อง



บทที่ 6

การสร้างชุดทดสอบ

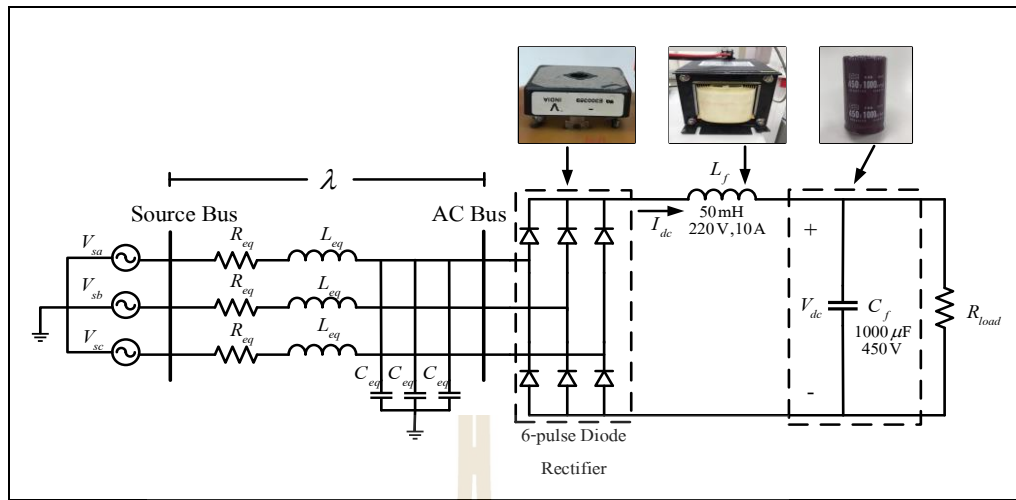
6.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์มีวัตถุประสงค์หลักคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เอชซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมขนานกัน ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้น เพื่อคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจากการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้ทำการพิสูจน์แล้วในบทที่ 5 พบว่าสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยมีการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งอาจยังไม่เพียงพอต่อความน่าเชื่อถือเท่าที่ควร ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงได้กล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพให้มีความน่าเชื่อถือและมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยการสร้างชุดทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ทางฝั่งแหล่งจ่าย และทางฝั่งโหลด โดยทางฝั่งแหล่งจ่ายจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดความต้านทานเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และทางฝั่งโหลดจะเป็น วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ATmega 2560 เป็นตัวควบคุมสัญญาณพัลส์หรือค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ จากนั้นจึงได้นำวงจรทั้งสองฝั่งมาเชื่อมต่อกันซึ่งเรียกว่าวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุม โดยจะมีการทดสอบการทำงานของวงจรและการควบคุม เปรียบเทียบผลกับทางทฤษฎี เมื่อชุดทดสอบทำงานได้อย่างถูกต้อง จะสามารถนำไปใช้ในการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไปได้

6.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

6.2.1 ภาพรวมของระบบ

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานแสดงดังรูปที่ 6.1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่สามารถปรับค่าได้ โมดูลไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์วงจรกรองทางฝั่งไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ และสุดท้ายโหลดของวงจรซึ่งก็คือตัวต้านทาน

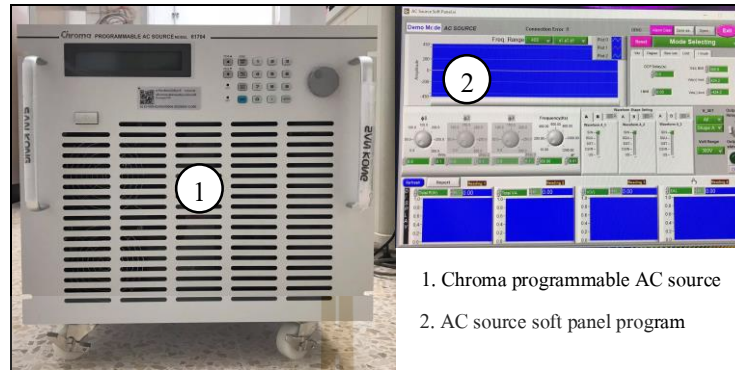


รูปที่ 6.1 วงจรสำหรับทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

จากรูปที่ 6.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่จ่ายให้กับวงจรเรียงกระแสคือ Chroma Programmable 3-Phase AC Source MODEL 61704 Series ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายที่สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้ เนื่องจากในการทดสอบนี้ต้องการหาผลการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงขึ้นบันไดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่จะนำเสนอไว้ในบทที่ 7 และแหล่งจ่ายดังกล่าวยังสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูลให้มีค่าคงเพื่อลดปัญหาที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าตกเมื่อมีการเพิ่มโหลดมากขึ้น ซึ่งชุดแหล่งจ่าย Chroma Programmable 3-Phase AC Source แสดงได้ดังรูปที่ 6.2 และในส่วนต่อมาก็คือ โมดูลของวงจรเรียงกระแส สำหรับการเลือกพิกัดของโมดูลวงจรเรียงกระแสสามเฟส ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาจากโหลดของวงจร ซึ่งก็คือ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัตก์ 2 ชุดขนานกัน มีค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของแต่ละชุดคือ 500 W และเมื่อกำหนดค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25 เปอร์เซนต์ ดังนั้นโมดูลวงจรเรียงกระแสสามเฟสจะต้องรองรับกำลังไฟฟ้าได้เป็น 1250 W ดังนั้นจึงเลือกพิกัดของโมดูลวงจรเรียงกระแสที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 500 V พิกัดกระแส 10 A โดยการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ (N. Mohan, T.M. Underland, and W.P. Robbins, 2003) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6-1)

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad (6-1)$$

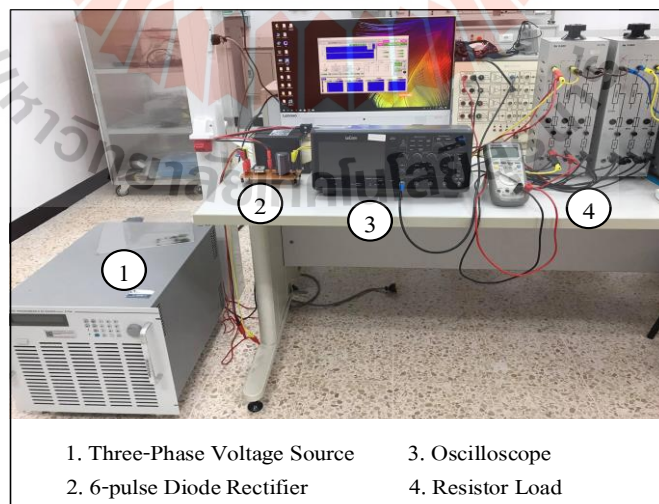
เมื่อ V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และ V_m คือ แรงดันค่ายอดของไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 6.2 ชุดแหล่งจ่าย Chroma Programmable 3-Phase AC Source

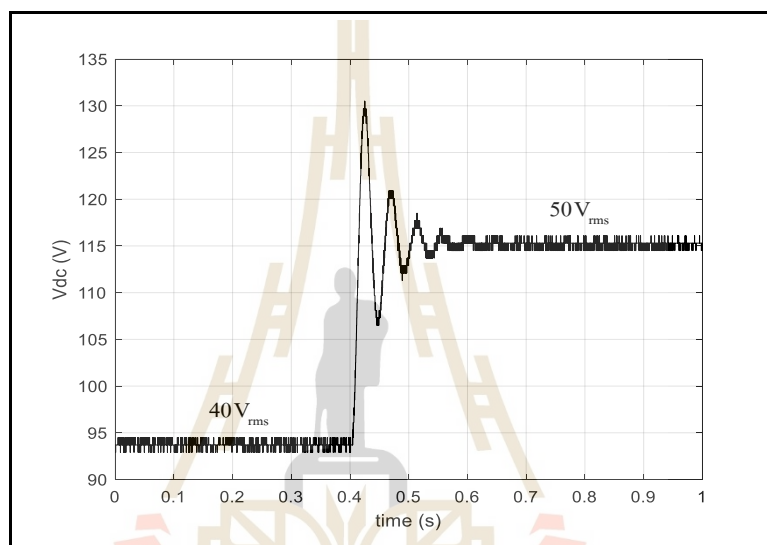
6.2.2 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

การทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ด้วยชุดทดสอบที่สร้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6.3 จะดำเนินการ โดยเปลี่ยนระดับแรงดันอินพุตเพื่อดูผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากชุดทดสอบเทียบกับการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ตามสมการที่ (6-1)



รูปที่ 6.3 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

ในการทดสอบจะกำหนดให้แรงดันอินพุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีค่าแรงดันเฟสเท่ากับ 40 V_{rms} และ 50 V_{rms} และเมื่อคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากสมการที่ (6-1) จะได้ค่าเท่ากับ $\frac{3\sqrt{3} \times \sqrt{2} \times 40}{\pi} = 93.56\text{ V}$ และ $\frac{3\sqrt{3} \times \sqrt{2} \times 50}{\pi} = 116.95\text{ V}$ ตามลำดับ เมื่อโหลดตัวต้านทานของวงจรมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม ($R_{\text{Load}} = 50\Omega$) ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

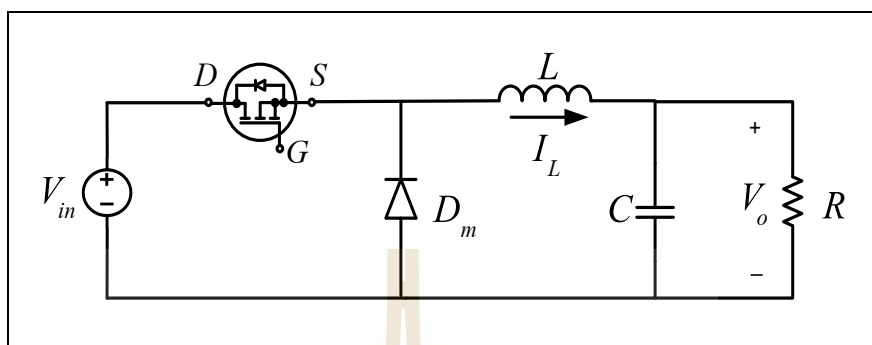
จากรูปที่ 6.4 จะสังเกตได้ว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าประมาณ 93.56 V เมื่อแรงดันอินพุตต่อเฟสมีค่าเท่ากับ 40 V_{rms} และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าประมาณ 116.95 V เมื่อแรงดันอินพุตต่อเฟสมีค่าเท่ากับ 50 V_{rms} ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับการคำนวณทางทฤษฎี ดังนั้นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานที่สร้างขึ้น สามารถนำไปสร้างชุดทดสอบสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์โดยการปลดโหลดตัวต้านทานออกเพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักค์

6.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

6.2.1 ภาพรวมของระบบ

การสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบักค์แสดงดังรูปที่ 6.5 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ชุดสร้างสัญญาณพัลส์หรือคำวัญจักรหน้าที่ของสวิตช์ด้วยบอร์ด

ไมโครคอนโทรลเลอร์ MEGA2560 ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ชุดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และ โหลดความต้านทาน ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้มอสเฟสเป็นอุปกรณ์สวิตช์



รูปที่ 6.5 วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

วงจรแปลงผันแบบบัคค์หรือวงจรลดระดับแรงดัน เป็นวงจรที่ให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันอินพุต จากรูปที่ 6.5 สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรแปลงผันแบบบัคค์ (V_o) (N. Mohan, T.M. Underland, and W.P. Robbins, 2003) ได้ดังสมการที่ (6-2) ดังนี้

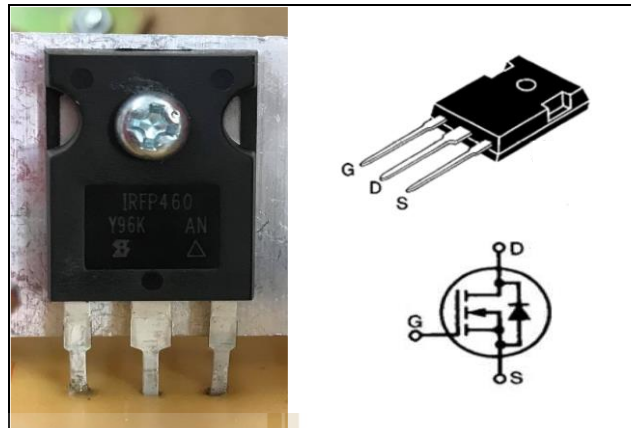
$$V_o = kV_{in} \quad (6-2)$$

โดยที่ V_{in} คือ แรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์

k คือ วัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

6.3.2 การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ส่วนแรกที่จะทำการออกแบบคืออุปกรณ์การสวิตช์ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ใช้สวิตช์เป็นมอสเฟสเบอร์ IRFP460 โดยการออกแบบจะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแสเป็นสำคัญ ซึ่งค่าพิกัดกระแสของโหลดเท่ากับ 7 A และค่าพิกัดแรงดันของโหลดเท่ากับ 70 V เมื่อคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25 เปอร์เซ็นต์ จะได้สวิตช์ที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์จะมีพิกัดกระแสมากกว่า 7.75 A และมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่า 88 V เพราะฉะนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้สวิตช์ที่มีพิกัดแรงดัน 500 V พิกัดกระแส 20 A ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.6 ดังนี้



รูปที่ 6.6 อุปกรณ์สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

ในส่วนต่อมาเป็นการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุ ซึ่งในการออกแบบต้องคำนึงถึงค่าแรงดันพลิว (ΔV_c : ripple voltage) ของแรงดันตกคร่อมโหลด และค่ากระแสพลิว (ΔI_L : ripple current) ของกระแสที่ไหลผ่านโหลด โดยสมการที่ใช้ในการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าของตัวเก็บประจุ (N. Mohan, T.M. Underland, and W.P. Robbins, 2003) แสดงได้ดังสมการที่ (6-3) และ (6-4) ดังนี้

$$\Delta I_L = \frac{V_o(V_{in} - V_o)}{fLV_{in}} \quad (6-3)$$

$$\Delta V_c = \frac{\Delta I_L}{8fC} \quad (6-4)$$

โดยที่ V_{in} คือ ค่าความถี่ตัดข้างล่าง

f คือ ค่าความถี่ตัดข้างบน

L คือ ค่าความถี่ศูนย์กลาง

C คือ ค่าเบนคัวิตซ์

ค่าแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ในงานวิทยานิพนธ์ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 116.95 V สามารถดูการคำนวณได้จาก

สมการที่ (6-1) ซึ่งค่าดังกล่าวคือค่า V_{in} ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงได้ประมาณค่า V_{in} ให้มีค่าเท่ากับ 117 V โดยมีเงื่อนไขสำหรับการออกแบบเป็นดังนี้

$$V_{in} = 117 \text{ V}, V_o = 5\text{-}100 \text{ V}$$

$$\Delta V_c < 2.8 \text{ mV}, \Delta I_L < 0.2 \text{ A}$$

$$f = 10 \text{ kHz}$$

จากเงื่อนไขดังกล่าวการออกแบบจะแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรงดันเอาต์พุตน้อยที่สุด และช่วงแรงดันเอาต์พุตมากที่สุดดังนี้

$$\text{ช่วงที่ 1 } (V_o = 5 \text{ V})$$

การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุจะพิจารณาจากสมการที่ (6-3) และ (6-4) เป็นสำคัญ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้กระแสลี้มีค่าไม่เกิน 0.2 A เพราะฉะนั้นเมื่อแทนค่าดังกล่าวในสมการที่ (6-3) จะได้

$$L = \frac{5(117 - 5)}{10 \times 10^3 \times 117 \times 0.2} = 2.393 \text{ mH}$$

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสมการที่ (6-4) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้แรงดันลี้มีค่าไม่เกิน 2.8 mV เพราะฉะนั้นเมื่อแทนค่าดังกล่าวในสมการที่ (6-4) จะได้

$$C = \frac{0.2}{8 \times 10 \times 10^3 \times 2.8 \times 10^{-3}} = 892.86 \text{ } \mu\text{F}$$

$$\text{ช่วงที่ 2 } (V_o = 100 \text{ V})$$

หลักการออกแบบจะเหมือนกับช่วงที่ 1 ทุกประการ เพียงแต่เปลี่ยนค่า V_o จาก 5 V เป็น 100 V เพราะฉะนั้นการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุสำหรับช่วงนี้จะได้

$$L = \frac{100(117 - 100)}{10 \times 10^3 \times 117 \times 0.2} = 7.26 \text{ mH}$$

$$C = \frac{0.2}{8 \times 10 \times 10^3 \times 2.8 \times 10^{-3}} = 892.86 \text{ } \mu\text{F}$$

จากการออกแบบข้างต้น การเลือกใช้ความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุต้องครอบคลุมการทำงานทั้งหมดของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยมีเงื่อนไขว่าค่ากระแสพลีมีค่าไม่เกิน 0.2 A และแรงดันพลีมีค่าไม่เกิน 2.8 mV นอกจากนี้ค่าพิกัดกระแสของขดลวดจะพิจารณาจากค่ากระแสพิกัดของโหลดความต้านทาน (R) ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยถ้าคำนึงถึงตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ ค่าพิกัดกระแสของขดลวดจะมีค่ามากกว่า 7.75 A และในส่วนของค่าพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุจะมีค่ามากกว่า 88 โวลต์ เพราะฉะนั้นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุ ที่ใช้ในวงจรแปลงผันกำลังแบบบักก์สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีค่าดังต่อไปนี้

- $L = 15 \text{ mH}$ พิกัดกระแส 10 A แรงดัน 400 V แสดงดังรูปที่ 6.7 ดังนี้



รูปที่ 6.7 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์

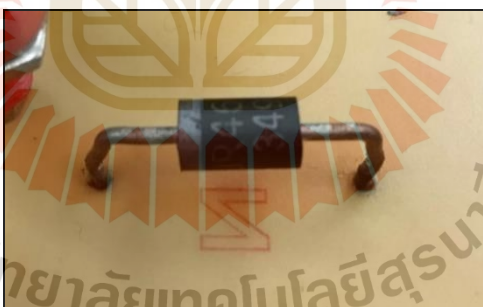
- $C = 1000 \text{ } \mu\text{F}$ พิกัดแรงดัน 200 V แสดงดังรูปที่ 6.8 ดังนี้



รูปที่ 6.8 ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

วิธีการออกแบบไดโอด (D_m)

พิจารณาจากวงจรแปลงผันแบบบัคค์ในรูปที่ 6.4 ไดโอด D_m ต้องมีพิกัดแรงดันมากกว่าค่าแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 116.9 V เมื่อคำนึงถึงตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ ค่าพิกัดแรงดันของไดโอด D_m จะมีค่ามากกว่า 146.13 V ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้ไดโอด D_m ที่มีพิกัดแรงดัน 400 V ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.9 ดังนี้

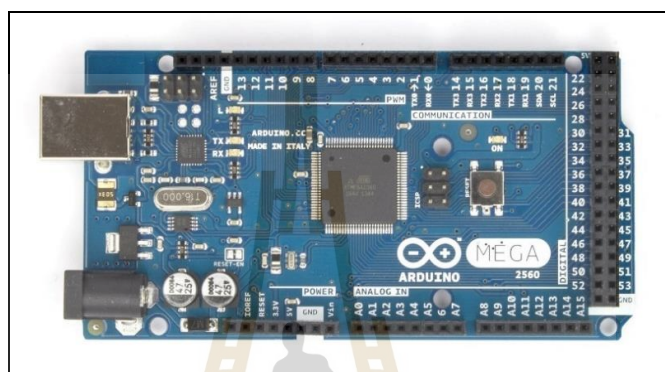


รูปที่ 6.9 ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการออกแบบอุปกรณ์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซึ่งประกอบไปด้วย สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด โดยในการควบคุมการทำงานของสวิตช์นั้นจะอาศัยสัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อที่ 6.3.3

6.3.3 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์

ตัวควบคุมที่จะใช้สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีโหลดตัวต้านทาน ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ โดยจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATMEGA2560 แสดงได้ดังรูปที่ 6.10 สำหรับสร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้สำหรับควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต



รูปที่ 6.10 ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATMEGA2560

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Mega 2560 ใช้ชิปไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATMEGA2560 การโปรแกรมทำผ่านโปรโตคอล UART รองรับการเขียนโปรแกรมภาษาซีของ Arduino ทำให้ง่ายต่อการเขียนโปรแกรม ภายในบอร์ดประกอบด้วยขาอินพุต/เอาต์พุตดิจิทัลจำนวน 54 ขา สามารถใช้เป็นเอาต์พุต PWM 15 ขา อินพุตแบบอนาล็อก 16 ขา และ 4 พอร์ต UART เครื่องกำเนิดสัญญาณคริสตัล 16 เมกะเฮิร์ต, พอร์ตเชื่อมต่อ USB, แจ็คไฟ, หัว ICSV และปุ่มรีเซ็ต สามารถเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB บนบอร์ดได้โดยตรง

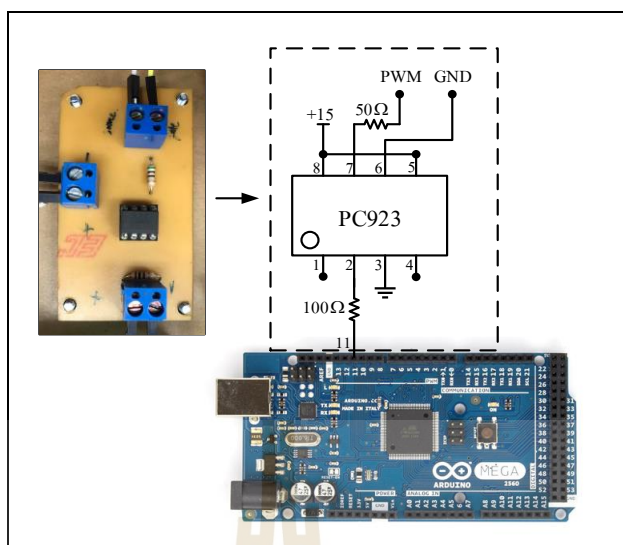
คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับชุดบอร์ด MEGA2560

1. เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ประสิทธิภาพสูงแต่ใช้พลังงานต่ำ
2. หน่วยความจำ
 - หน่วยความจำแฟลชสำหรับโหลดโปรแกรมขนาด 256 กิโลไบต์ (8 กิโลไบต์ ใช้สำหรับ Boot Loader)
 - หน่วยความจำ EEROM ขนาด 4 กิโลไบต์
 - หน่วยความจำแรมชนิด SRAM ขนาด 8 กิโลไบต์
3. ระบบโปรแกรมตัวเองที่ถูกฝังอยู่ในตัวชิพ
4. คุณสมบัติเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก

- มีตัวตั้งเวลาและตัวนับขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงานกันได้ 2 โหมด คือ Prescaler และ Capture
 - มีตัวตั้งเวลาและตัวนับขนาด 16 บิต จำนวน 4 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงานกันได้ 3 โหมดคือ Prescaler, Compare และ Capture
 - มีตัวนับเวลาจริง (Real Time Count) ที่แยกวงจรถูกกำหนดความถี่ได้
 - มี PWM จำนวน 12 ช่องสัญญาณ ที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 16 บิต
 - มีตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ
 - มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับ/ส่งได้ 4 พอร์ต
 - มีตัวตั้งเวลาแบบวอชต์ด็อกที่สามารถกำหนดการทำงานได้โดยสามารถแยกสัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ
 - มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณอนาล็อกอยู่ในตัว
5. อินพุต/เอาต์พุต
- พอร์ตดิจิทัลอินพุต/เอาต์พุต 54 พอร์ต
 - พอร์ตอนาล็อกอินพุต 16 พอร์ต แต่ละพอร์ตให้ความละเอียด 10 bits
6. สถาปัตยกรรมแบบ RISC
- มีชุดคำสั่ง 135 คำสั่ง และส่วนใหญ่คำสั่งเหล่านี้จะได้เพียง 1 สัญญาณนาฬิกาในการประมวลผลคำสั่ง
 - มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัว
 - ทำงานสูงสุดที่ 16 ล้านคำสั่งต่อวินาที (MIPS) เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz
7. แรงดันอินพุตของบอร์ดใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 5 โวลต์จากภายนอก
8. ช่วงอุณหภูมิที่ชิพทำงานได้ -40°C ถึง 100°C

6.3.4 วงจรขยายสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์

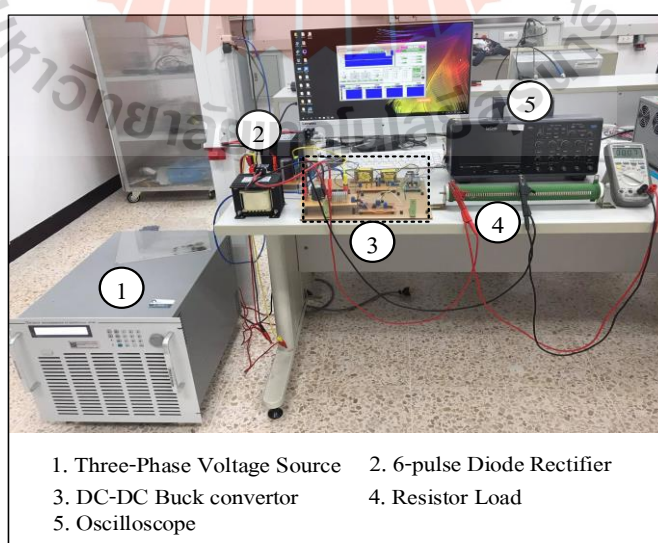
การสร้างวงจรจุดชนวนสวิทช์เพื่อทำการควบคุมการทำงานของสวิทช์วงจรแปลงผันแบบบักก์ และทำการแยกกราวด์ในส่วนของวงจรไฟฟ้าแรงต่ำคือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ออกจากวงจรไฟฟ้าแรงสูงคือวงจรแปลงผันแบบบักก์ เพื่อไม่ให้กราวด์ของวงจรทางฝั่งแรงต่ำเชื่อมกับกราวด์ของวงจรทางฝั่งแรงสูง เพราะถ้าหากมีการใช้กราวด์ร่วมกันอาจทำให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ของวงจรทางฝั่งแรงต่ำได้ ชุดทดสอบวงจรขยายแบบแยกโคคสัญญาณใช้ไอซีเบอร์ PC923 ซึ่งมีโครงสร้างการต่อวงจรร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 วงจรร่วมระหว่างวงจรจุดชนวนเกทกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

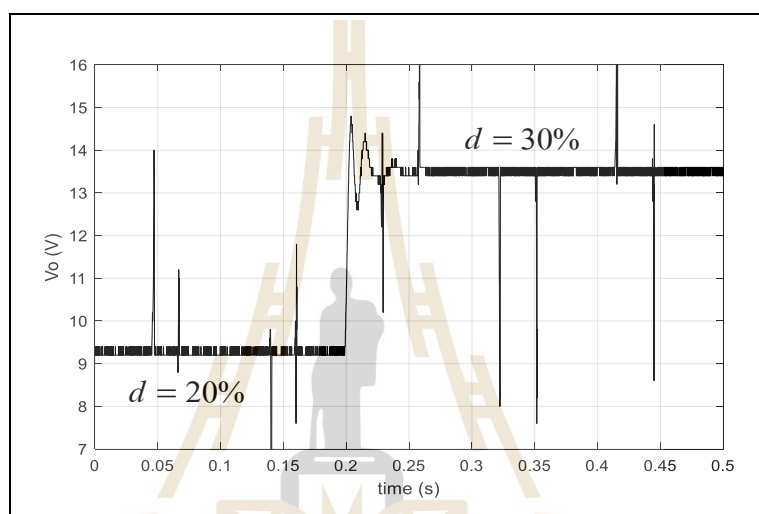
6.3.5 ผลการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

ในหัวข้อที่ 6.3 เป็นการสร้างชุดทดสอบสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดตัวต้านทาน เพื่อให้เห็นถึงผลการตอบสนองของวงจรแปลงผันแบบบัคค์จึงได้ทำการทดสอบการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่การทำงานของสวิตช์เพื่อดูผลการทดสอบ โดยชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคค์แสดงได้ดังรูปที่ 6.12

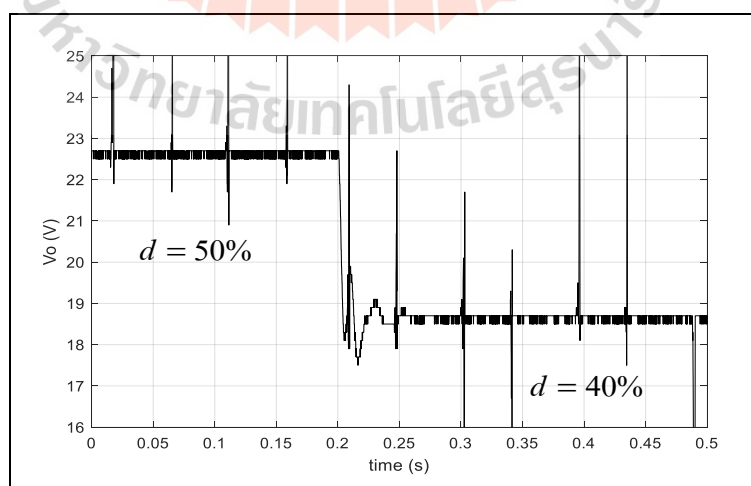


รูปที่ 6.12 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

จากรูปที่ 6.12 หมายเลข 1 คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่จ่ายให้กับ วงจรเรียงกระแส หมายเลข 2 คือ วงจรเรียงกระแสซึ่งแรงดันเอาต์พุตคือค่าจากวงจรเรียงกระแสเป็น แรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัค หมายเลข 3 คือ วงจรแปลงผันแบบบัค หมายเลข 4 คือ โหลดตัวต้านทาน และหมายเลข 5 คือ ออสซิลโลสโคปสำหรับตรวจจับสัญญาณแรงดันเพื่อคุณลักษณะของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลได้ด้วยอุปกรณ์เก็บข้อมูล มีผลการ ทดสอบแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 6.13 ผลการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่การทำงานของสวิตซ์จาก 20% เป็น 30%



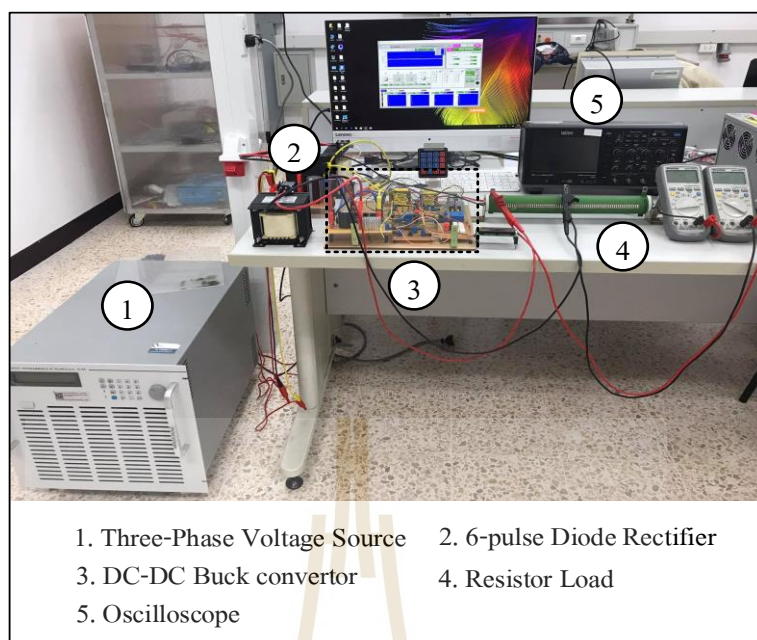
รูปที่ 6.14 ผลการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่การทำงานของสวิตซ์จาก 50% เป็น 40%

จากผลการทดสอบการตอบสนองของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุม ในรูปที่ 6.13 และ 6.14 จะเห็นว่าชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ตามค่า วัฏจักรหน้าที่ที่กำหนดได้ โดยรูปที่ 6.12 เป็นการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 20% เป็น 30% เมื่อมีแรงดันอินพุตเท่ากับ 46.78 V เมื่อคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตตามสมการที่ (6-2) จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 9.35 V และ 14.03 V ตามลำดับ และรูปที่ 6.13 เป็นการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 50% เป็น 40% เมื่อคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตจะได้เท่ากับ 23.39 V และ 18.71 V ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตจากชุดทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี ดังนั้นวงจรแปลงผันแบบบัคค์จึงสามารถนำไปสร้างชุดทดสอบในกรณีที่มีการควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ต่อไปได้ ซึ่งจะมีการนำเสนอในหัวข้อที่ 6.4

6.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม

6.4.1 ภาพรวมของระบบ

ภาพรวมของชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแสดงดังรูปที่ 6.15 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับค่าได้ ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA2560 และชุดทดสอบวงจรตรวจจับ



รูปที่ 6.15 ชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น
วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม

โดยการสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดตัวต้านทานกรณีที่มีตัวควบคุมพีไอ เป็นการพัฒนางจรมาจากหัวข้อที่ 6.3 โดยการเพิ่มชุดทดสอบวงจรตรวจจับซึ่งก็คือมีการเพิ่มเติมอุปกรณ์ตรวจวัดกระแส (current sensor) และอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน (voltage sensor) ลงในชุดทดสอบ และใช้ตัวควบคุมพีไอในการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยในส่วนของตัวควบคุมพีไอได้ถูกโปรแกรมไว้ในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

6.4.2 ชุดทดสอบวงจรแหล่งจ่ายสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ชุดทดสอบวงจรแหล่งจ่ายสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าร่วมกันบอร์ดวงจรเรียงกระแส โดยหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าจะทำหน้าที่แปลงแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 220 V เป็น 15 V เพื่อเป็นอินพุตให้กับบอร์ดเรียงกระแสสำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด $\pm 15V$ ซึ่งเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสนี้จะมีค่าคงตัวเนื่องจากมีไอซี 7815 และ 7915 ที่ทำหน้าที่ควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตไว้เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ คือ วงจรตรวจจับแรงดัน วงจรตรวจจับกระแส และวงจรจุดชนวนเกท ซึ่งชุดทดสอบวงจรแหล่งจ่ายสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสดงได้ดังรูปที่ 6.16

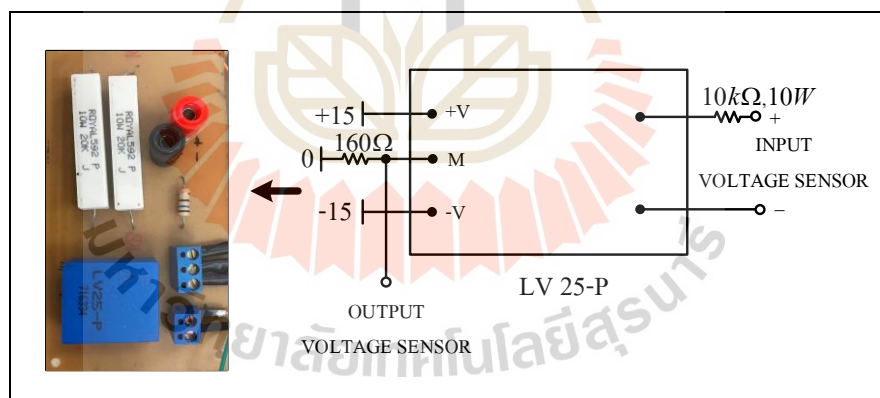


รูปที่ 6.16 ชุดทดสอบวงจรแหล่งจ่ายสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

6.4.3 ชุดทดสอบวงจรตรวจจับ

ชุดทดสอบของวงจรตรวจจับแรงดัน

ชุดทดสอบของวงจรตรวจจับแรงดัน ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันเอาต์พุตที่ใช้ไอซีเบอร์ LV 25-P พิกัด 500 V ที่ทำหน้าที่วัดแรงดันตกคร่อมโหลดตัวต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ซึ่งมีโครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 6.17

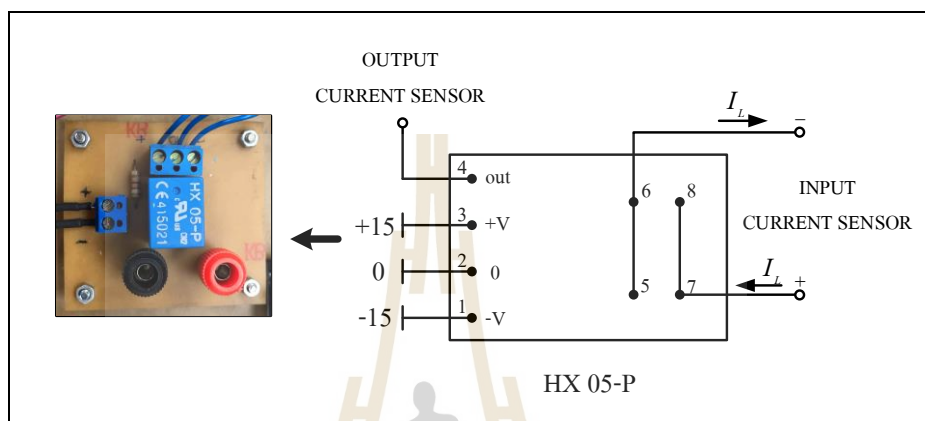


รูปที่ 6.17 โครงสร้างวงจรตรวจจับแรงดัน

จากโครงสร้างวงจรตรวจวัดแรงดันในรูปที่ 6.17 อินพุตของวงจรดังกล่าวคือแรงดันไฟฟ้า ณ จุดที่ต้องการวัด และเอาต์พุตของวงจรดังกล่าวขึ้นอยู่กับกรอกแบบตัวต้านทานของวงจรซึ่งจะทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตสามารถนำไปใช้ในการประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

ชุดทดสอบของวงจรตรวจจับกระแส

ชุดทดสอบของวงจรตรวจจับกระแส ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์โดยใช้ไอซี เบอร์ HX 10-NP พิกัดกระแส 5A มีโครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 โครงสร้างวงจรตรวจจับกระแส

6.6.4 การเขียนโปรแกรมตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ใช้ตัวคุมพีไอในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยการสร้างตัวควบคุมแบบพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA2560 นี้จะอาศัยพื้นฐานการนำตัวควบคุม 2 แบบมารวมกันคือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional controller) และตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral controller) ซึ่งข้อดีของตัวควบคุมแบบพีไอคือสามารถปรับปรุ่ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวให้ลดน้อยลงไปได้ และไม่ทำให้เสถียรภาพของระบบลดลง โดยตัวควบคุมพีไอสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (6-5)

$$V_{out} = K_p V_{error} + K_i \int V_{error} dt \quad (6-5)$$

โดยที่ V_{out} คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ

K_p คือ ค่าความถี่ตัดข้างล่าง (rad/s)

K_i คือ ค่าความถี่ตัดข้างล่าง (rad/s)

V_{error} คือ ค่าความถี่ตัดข้างล่าง (rad/s)

จากสมการที่ (6-5) เป็นสมการที่ต่อเนื่องทางเวลาซึ่งไม่สามารถเขียนในบอร์คไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เนื่องจากบอร์คไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีลักษณะการทำงานเป็นแบบสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time) ดังนั้นจึงต้องสร้างสมการขึ้นมาใหม่ให้อยู่ในรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาเพื่อให้สามารถเขียนโปรแกรมลงในบอร์คไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ซึ่งการสร้างสมการขึ้นมาใหม่มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 พิจารณาสมการตัวควบคุมพีไอในช่วงเวลาต่อเนื่อง (continuous time) ที่แสดงในสมการที่ (6-5)

ขั้นที่ 2 หาอนุพันธ์ทั้งสองข้างของสมการที่ (6-5) แสดงได้ดังสมการที่ (6-6)

$$\frac{dV_{out}}{dt} = K_p \frac{dV_{error}}{dt} + K_i V_{error} \quad (6-6)$$

ขั้นที่ 3 กำหนดให้ $dt = T_i$ เมื่อ T_i คือ ค่าสุ่มตัวอย่างเวลา (sampling time) และอนุพันธ์ของแรงดันและอนุพันธ์ของแรงดันผิดพลาดเพื่อประมาณค่าให้อยู่ในรูปผลต่างแสดงได้ดังสมการที่ (6-7)

$$\frac{\Delta V_{out}}{T_i} = K_p \frac{\Delta V_{error}}{T_i} + K_i V_{error} \quad (6-7)$$

ขั้นที่ 4 กำหนดให้ผลต่างของแรงดันเอาต์พุต (ΔV_{out}) มีค่าเท่ากับ $V_{out(i)} - V_{out(i-1)}$ และผลต่างของแรงดันผิดพลาด (ΔV_{error}) มีค่าเท่ากับ $V_{error(i)} - V_{error(i-1)}$ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6-8)

$$\frac{V_{out(i)} - V_{out(i-1)}}{T_i} = K_p \frac{V_{error(i)} - V_{error(i-1)}}{T_i} + K_i V_{error(i)} \quad (6-8)$$

โดยที่ $V_{out(i)}$ คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตในรอบปัจจุบัน

$V_{out(i-1)}$ คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตในรอบก่อนหน้า (อดีต)

$V_{error(i)}$ คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตผิดพลาดในรอบปัจจุบัน

$V_{error(i-1)}$ คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตผิดพลาดในรอบก่อนหน้า (อดีต)

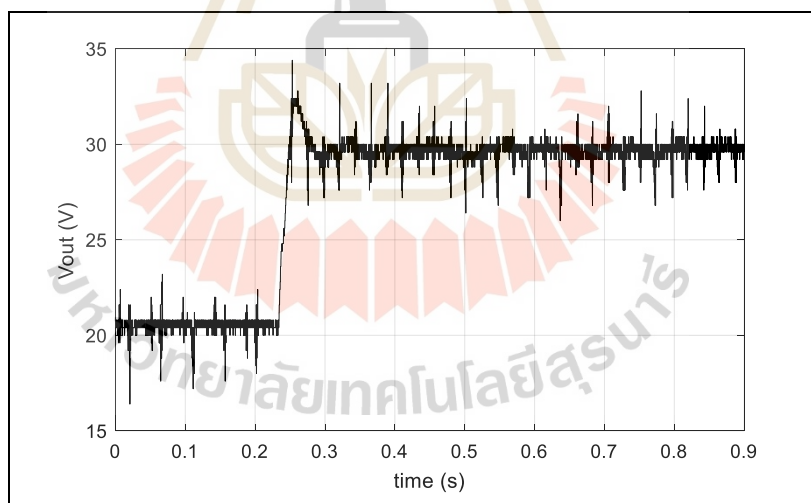
ขั้นที่ 5 จากสมการที่ (6-8) คูณทั้งสองข้างของสมการด้วย T_i ซึ่งจะทำให้ได้สมการตัวควบคุมพีไอที่เวลาไม่ต่อเนื่องดังสมการที่ (6-9)

$$V_{out(i)} = V_{out(i-1)} + K_p V_{error(i)} + K_i T_i V_{error(i)} - K_p V_{error(i-1)} \quad (6-7)$$

จากสมการที่ (6-9) สามารถนำไปเขียนโปรแกรมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ซึ่งรายละเอียดของการเขียนโปรแกรมสามารถดูได้ในภาคผนวก ก.

6.4.5 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม

การทดสอบการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในการทดสอบจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ (V_o^*) ไปตามค่าที่กำหนด ซึ่งมีผลการทดสอบดังในรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 ผลการตอบสนองของ V_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o^* จาก 20 V เป็น 30 V

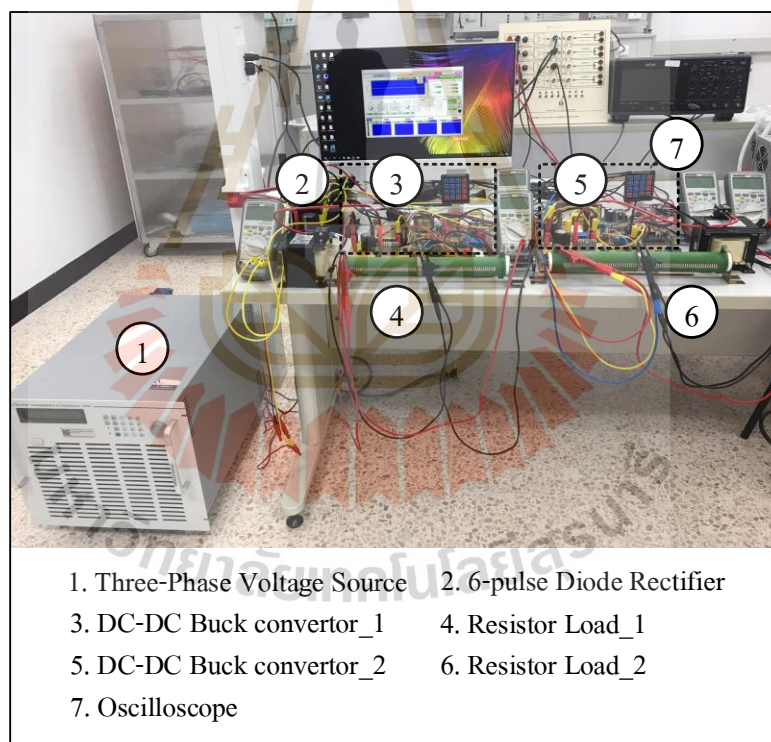
จากรูปที่ 6.19 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์กรณีมีตัวควบคุม (V_o) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_o^* จาก 20 V เป็น 30 V พบว่าชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้

คงที่ได้ถูกต้องตามที่กำหนด สามารถนำไปใช้พิจารณาระบบกรณีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน ที่จะแสดงในหัวข้อที่ 6.5 ได้

6.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน

6.5.1 ภาพรวมของระบบ

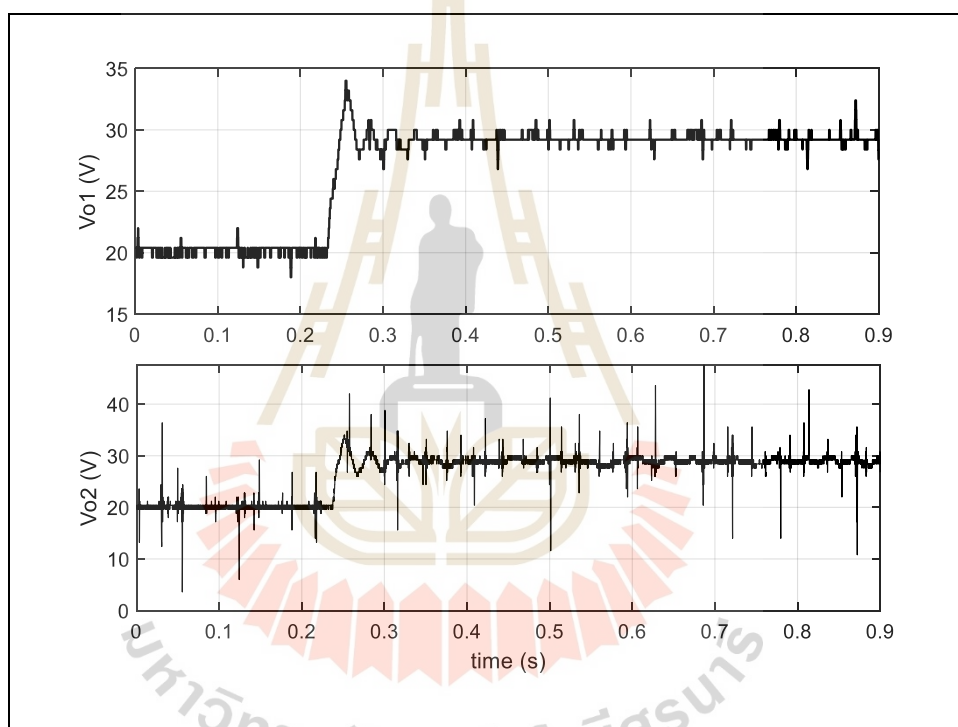
ภาพรวมของชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกันแสดงได้ดังรูปที่ 6.20 โดยมีการเพิ่มชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ และชุดทดสอบวงจรตรวจจับของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่สองเข้ามา



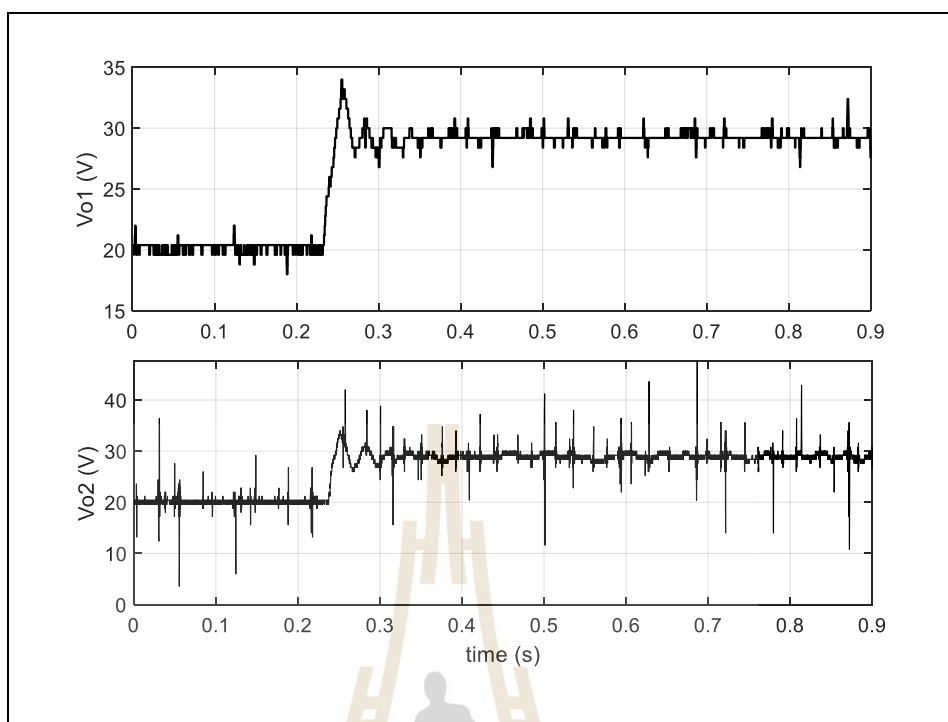
รูปที่ 6.20 ชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน

6.5.2 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนาดกัน

การทดสอบการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์โดยใช้ตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในการทดสอบจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่หนึ่ง (V_{o1}^*) และค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่สอง (V_{o2}^*) ไปตามค่าที่กำหนด ซึ่งมีผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6.21 และรูปที่ 6.22



รูปที่ 6.21 ผลการตอบสนองของ V_{o1} และ V_{o2} เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{o1}^* จาก 20 V เป็น 30 V และ V_{o2}^* จาก 20 V เป็น 30 V



รูปที่ 6.22 ผลการตอบสนองของ V_{o1} และ V_{o2} เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{o1}^* จาก 15 V เป็น 25 V และ V_{o2}^* จาก 30 V เป็น 40 V

จากรูปที่ 6.21 แสดงผลการตอบสนองของ V_{o1} และ V_{o2} เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{o1}^* จาก 20 V เป็น 30 V และ V_{o2}^* จาก 20 V เป็น 30 V และรูปที่ 6.22 แสดงผลการตอบสนองของ V_{o1} และ V_{o2} เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{o1}^* จาก 15 V เป็น 25 V และ V_{o2}^* จาก 30 V เป็น 40 V ตามลำดับ พบว่าชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมทั้ง 2 ชุด สามารถควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่และถูกต้องตามที่กำหนดได้ ดังนั้นชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ในการทดสอบหาจุดขาดเสถียรภาพของระบบในบทที่ 8 ได้

6.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 6 ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน โดยการควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์จะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยในการสร้างชุดทดสอบได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ชุดทดสอบของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานที่ได้นำเสนอ

ไว้ในหัวข้อที่ 6.2 และชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ โดยได้แบ่งเป็นชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุมได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.3 ชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.4 และสุดท้ายในส่วนของหัวข้อที่ 6.5 เป็นการนำชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมทั้งสองชุดมาต่อขนานกัน และทั้งนี้ยังได้ทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์ ต่าง ๆ ของระบบเพื่อให้มีความเหมาะสมรวมทั้งเลือกใช้อุปกรณ์ให้มีความปลอดภัย ซึ่งการควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์จะเป็นการควบคุมการทำงานของสวิตช์ จึงได้เลือกใช้ มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์และใช้บอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA2560 ในการควบคุม และในการสร้างวงจรจุดชนวนเกิดสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ได้เลือกใช้อิซีเบอร์ PC923 เป็นตัวขยายสัญญาณที่ได้จากบอร์ด ที่มีข้อดีคือ มีวงจรแยกกราวด์ในตัวที่ทำหน้าที่แยกกราวด์แรงสูงและกราวด์แรงต่ำออกจากกัน เพื่อไม่ให้กราวด์ของวงจรทางฝั่งแรงต่ำเชื่อมกับกราวด์ของวงจรทางฝั่งแรงสูง เพราะถ้าหากมีการใช้กราวด์ร่วมกันอาจทำให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ของวงจรทางฝั่งแรงต่ำได้ จากการทดสอบวงจรดังกล่าวพบว่าผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากชุดทดสอบมีความถูกต้องและสามารถนำชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นนี้ไปใช้ต่อในลำดับถัดไปได้ นั่นก็คือนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในบทที่ 8 แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพจากชุดทดสอบจะต้องมีค่าพารามิเตอร์ที่สอดคล้องในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องและแม่นยำ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบจะต้องเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง ซึ่งจะสามารถค้นหาได้ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่จะนำเสนอไว้ในบทที่ 7

บทที่ 7

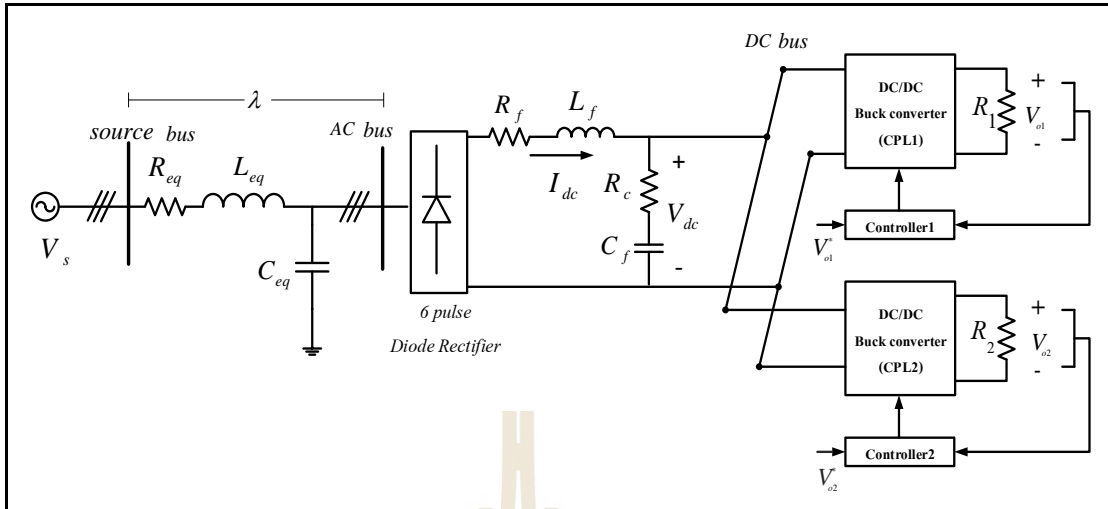
การระบุเอกลักษณ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

7.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์จุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งกัน และการยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์จึงมีการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์จากการจำลองลงสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบจริงที่ได้สร้างขึ้นในบทที่ 6 ซึ่งการยืนยันผลจากชุดทดสอบจริงนั้นเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบจริงจะแบ่งจากค้นหาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัด ซึ่งได้แก่การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง และค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ และส่วนที่สองคือการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search) (K-N Areerak, S. Sujijorn, 2002) ซึ่งจะพิจารณาค่าพารามิเตอร์ในส่วนของค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรอง และค่าความต้านทานภายในค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรอง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้นนี้ไม่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือวัด จึงต้องนำวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมาประยุกต์ใช้ โดยจะพิจารณาการค้นหาเพียงส่วนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพมากนัก

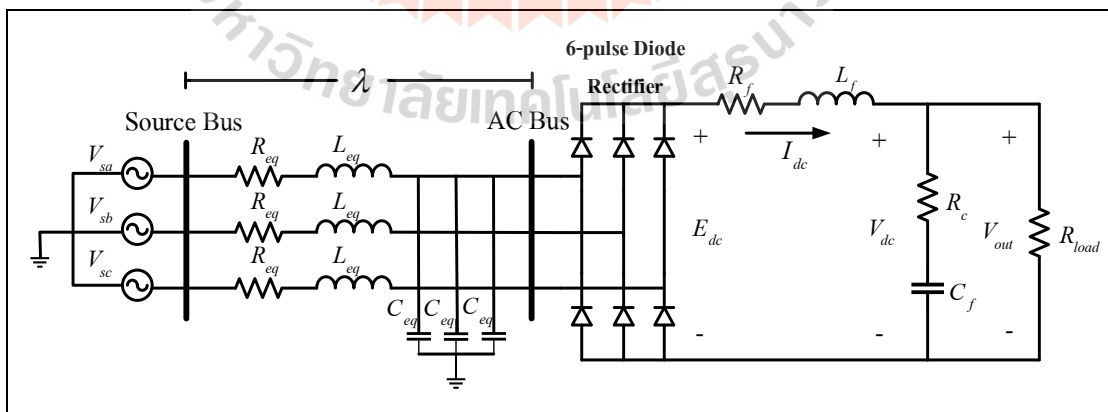
7.2 ระบบที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์คือวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งกันแสดงดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ขนานกัน

จากระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 7.1 ค่าพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพคือค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์และพารามิเตอร์ของวงจรกรอง โดยพารามิเตอร์เหล่านี้อยู่ทางฝั่งแหล่งจ่ายของระบบ ดังนั้นการพิจารณาระบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์สามารถพิจารณาเพียงวงจรทางฝั่งแหล่งจ่ายได้เพื่อช่วยให้การค้นหาค่าดังกล่าวมีความซับซ้อนน้อยลง และลดเวลาในการค้นหาค่าตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว ดังนั้นในการค้นหาพารามิเตอร์จะกำหนดวงจรทางฝั่งโหลดเป็นโหลดตัวต้านทาน (R) แทนโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ แสดงได้ดังรูปที่ 7.2

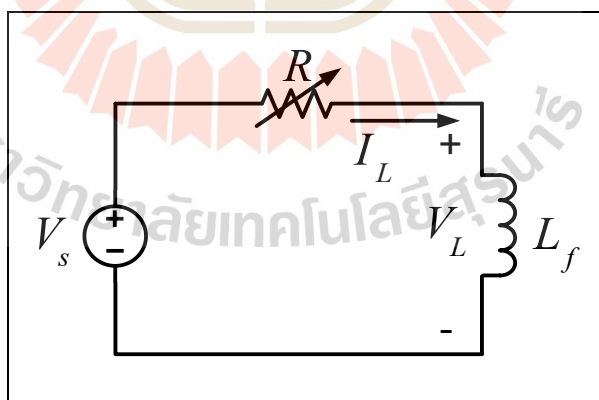


รูปที่ 7.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

จากรูปที่ 7.2 คือวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานที่ใช้สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบ โดยจะแบ่งการค้นหาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัด จะใช้สำหรับค้นหาค่าพารามิเตอร์ของความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง (L_f) และค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ (R_f) และส่วนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบอดเชิงปรับตัวสำหรับค้นหาค่าพารามิเตอร์ของค่าความต้านทานของสายส่ง (R_{eq}) ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง (L_{eq}) ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (C_f) และค่าความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (R_c) โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาในบทนี้จะนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริง

7.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ด้วยเครื่องมือวัด

การทดสอบหาพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ด้วยเครื่องมือวัด ใช้ค้นหาพารามิเตอร์ของค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำและค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายสำหรับการทดสอบและให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำ โดยการค้นหาเริ่มจากการหาค่าตัวต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีการต่อวงจรทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 7.3 ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (V_s) ตัวต้านทาน (R) ตัวเหนี่ยวนำ (L_f) ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ (R_f) เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า และเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 7.3 วงจรทดสอบการหาค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ

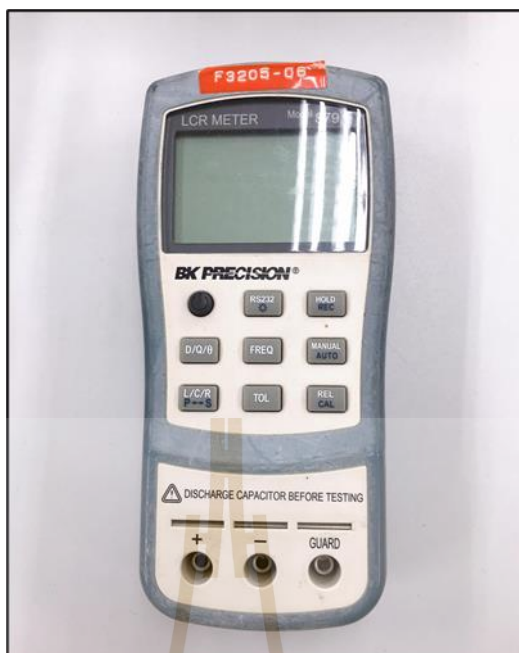
ทดสอบการหาค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำจะอาศัยกฎของโอห์ม โดยการทดสอบจะเริ่มจากการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_s) ไปที่ 220 V จากนั้นปรับค่าความต้านทานเพื่อให้ได้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 A โดยเริ่มจาก 0.5 A ถึง 5 A พร้อมทั้งวัด

ค่าแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ เพื่อสามารถนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งผลการคำนวณแสดงได้ดังตารางที่ 7.1 ดังนี้

ตารางที่ 7.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ

I_L (A)	V_L (V)	r_L (Ω)
0.5	0.162	0.318
1.0	0.329	0.329
1.5	0.466	0.306
2.0	0.606	0.302
2.5	0.750	0.298
3.0	0.843	0.279
3.5	0.983	0.275
4.0	1.125	0.275
4.5	1.240	0.275
5.0	1.401	0.277
เฉลี่ย		0.2756

ในลำดับถัดมาเป็นการหาค่าความเหนี่ยวนำของวงจรรอง (L_r) โดยจะอาศัยเครื่องมือวัด LCR METER ในห้องปฏิบัติการรุ่น 897 จากบริษัท BK PRECISION แสดงดังรูปที่ 7.4 โดยวิธีการวัดค่าจะวัดด้วยกัน 5 ครั้ง เพื่อนำค่าที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำของวงจรรองที่ได้จากการวัด แสดงดังตารางที่ 7.2 ดังนี้



รูปที่ 7.4 เครื่องมือวัด LCR METER รุ่น 897 จากบริษัท BK PRECISION

ตารางที่ 7.2 ผลการวัดค่าความเหนี่ยวนำ

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
38.87 mH	39.12 mH	38.91 mH	39.28 mH	38.75 mH	39.002 mH

จากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำและค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองด้วยเครื่องมือวัด จะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดสอบ จะมีค่าที่ไม่สอดคล้องกับพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้บทที่ 4 บทที่ 5 ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่ได้จากการทดสอบ จึงเป็นพารามิเตอร์ที่มีความถูกต้องที่สุดสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ และในหัวข้อถัดไปเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ในส่วนที่เหลือ คือ ค่าความจุของวงจรกรอง ค่าความต้านทานภายในของตัวเก็บประจุ ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง และค่าความต้านทานภายในของตัวเหนี่ยวนำของสายส่ง ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวไม่สามารถวัดค่าได้อย่างถูกต้องจากเครื่องมือวัด ดังนั้นในการวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ดังกล่าวด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่มีชื่อเรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งเป็นแนวทางใหม่ในการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยวิธีนี้ต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ โดยจะอาศัยผลตอบแทน

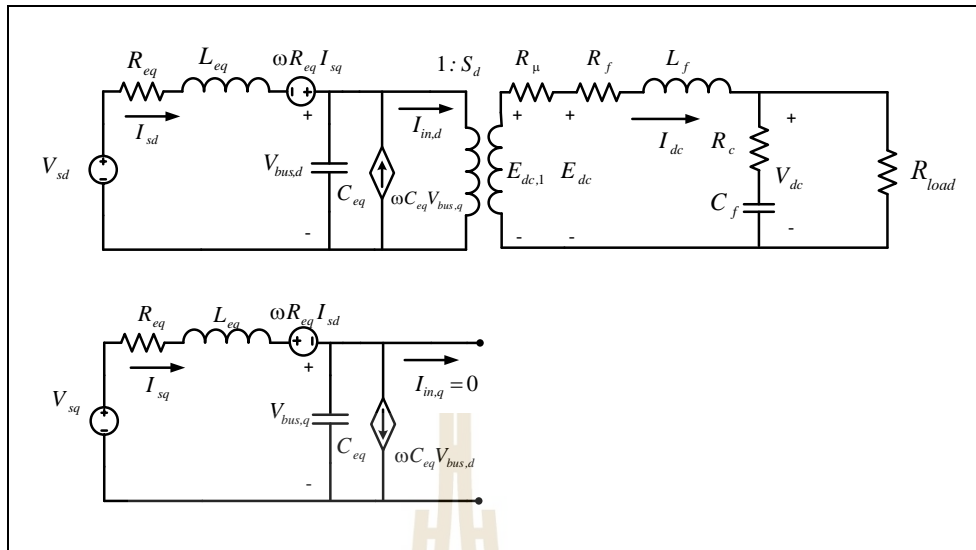
ของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) มาใช้สำหรับการเปรียบเทียบ เพื่อให้ผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะของรูปสัญญาณสอดคล้องกับผลการตอบสนองของการทดสอบวงจร ทั้งในสถานะชั่วคราว และในสถานะอยู่ตัว โดยวงจรที่พิจารณาจะเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดความต้านทาน ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 7.4

7.4 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ในส่วนของค่าพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือวัด ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความต้านทานของสายส่ง (R_{eq}) ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง (L_{eq}) ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (C_f) และค่าความต้านทานภายในในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (R_c) ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search: ATS) เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการค้นหาค่าตอบสูงและได้รับการพิสูจน์แล้วในงานวิจัยในอดีต โดยเนื้อหาในหัวข้อนี้จะประกอบไปด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานด้วยวิธีคิว การทดสอบวงจร และการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

7.4.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังรูปที่ 7.2 ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสสมดุล โดยที่ V_s คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล, R_{eq} , L_{eq} และ C_{eq} คือความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ของสายส่งกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ ส่วนที่ 2 ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 คือ วงจรกรองสัญญาณดีซี โดยที่ L_f , R_f , C_f และ R_c คือความเหนี่ยวนำ ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า และความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ตามลำดับ และส่วนสุดท้ายคือ โหลดตัวต้านทาน โดยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะใช้วิธีคิวซึ่งจะพิจารณาเงื่อนไขการพิสูจน์เช่นเดียวกับเงื่อนไขที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 ดังนั้นจะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายโดยกำหนดให้ $\theta = \phi - \phi_1$ ดังรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนดกีวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์
ที่มีโหลดตัวต้านทาน

จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 7.5 สามารถวิเคราะห์ห้วงจรด้วยกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) ทำให้ได้สมการเชิงอนุพันธ์แสดงดังสมการที่ (7-1) ดังนี้

$$\left. \begin{aligned}
 & \bullet \quad I_{sd} = -\frac{R_{eq} I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \frac{V_m \cos(\lambda)}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \\
 & \bullet \quad I_{sq} = -\frac{R_{eq} I_{sq}}{L_{eq}} - \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \frac{V_m \sin(\lambda)}{L_{eq}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \\
 & \bullet \quad V_{bus,d} = \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_{dc}}{C_{eq}} \\
 & \bullet \quad V_{bus,q} = \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\
 & \bullet \quad I_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{V_{bus,d}}{L_f} - \frac{(R_\mu + R_f + R_c) I_{dc}}{L_f} - \frac{(R - R_c)}{RL_f} V_{dc} \\
 & \bullet \quad V_{dc} = \frac{I_{dc}}{C_f} - \frac{V_{dc}}{R_{load} C_f}
 \end{aligned} \right\} \quad (7-1)$$

สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีคิวดังแสดงในสมการที่ (7-1) ในรูปของแบบจำลองตัวแปรสถานะดังสมการที่ (7-2) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (7-2)$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ คือ $\mathbf{x}(t) = [I_{sd} \quad I_{sq} \quad V_{bus,d} \quad V_{bus,q} \quad I_{dc} \quad V_{dc}]^T$
 อินพุต คือ $\mathbf{u}(t) = [V_m]$, เอาต์พุต คือ $\mathbf{y}(t) = [V_{dc}]^T$

โดยรายละเอียดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปของเมทริกซ์ **A**, **B**, **C** และ **D** แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_f} & 0 & -\left(\frac{R_\mu + R_f + R_c}{L_f}\right) & \frac{(R_c - R)}{RL_f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{RC_f} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\cos(\lambda)}{L_{eq}} \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sin(\lambda)}{L_{eq}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{6 \times 1}$$

$$\mathbf{C} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]_{1 \times 6} \quad \mathbf{D} = [0]_{1 \times 1}$$

จากสมการที่ (7-2) อินพุตของแบบจำลองคือ V_m และเอาต์พุตคือ V_{dc} และยังมีพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าได้แก่ R_{eq} , L_{eq} , R_c และ C_f

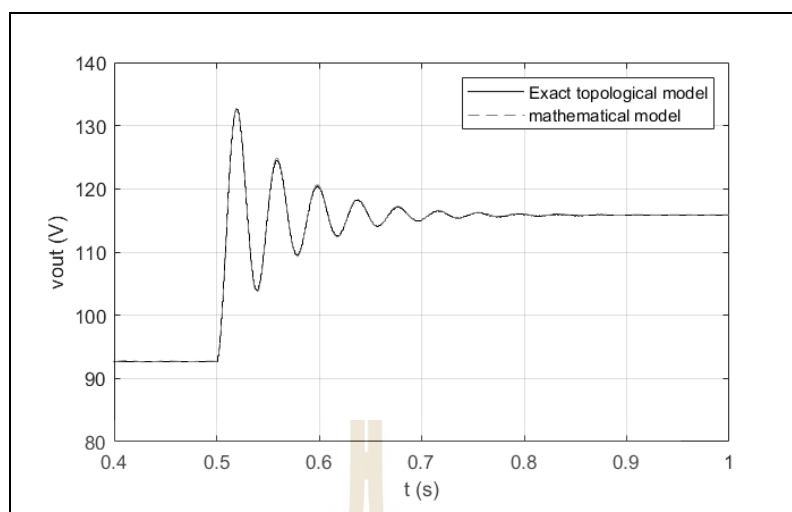
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นนี้มี ความถูกต้องทำได้โดยการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้

ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ในโปรแกรม MATLAB โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่แสดงดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 7.2

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	40 - 50 $V_{\text{rms/phase}}$	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	24 μH	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
R_f	0.2756 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_f	39.002 mH	ความเหนี่ยวนำวงจรกรอง
R_c	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_f	1000 μF	ความจุไฟฟ้าวงจรกรอง
R_{load}	50 Ω	โหลดความต้านทาน

จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.3 สามารถนำมาใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 40 $V_{\text{rms/phase}}$ ไปเป็น 50 $V_{\text{rms/phase}}$ ที่เวลา 0.5 วินาที ดังนั้นได้ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 7.6

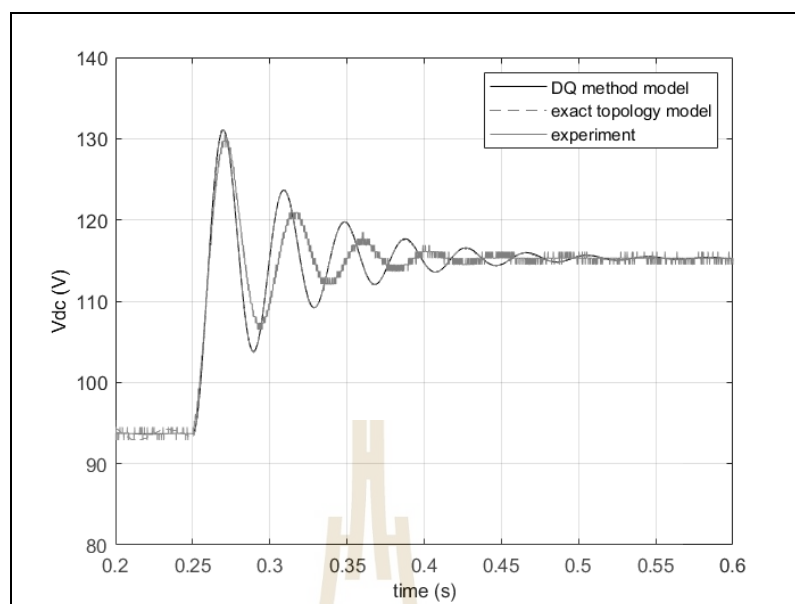


รูปที่ 7.6 ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต

จากรูปที่ 7.6 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีดีความีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้อง สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์เพื่อหาพารามิเตอร์ชุดทดสอบจริงด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ได้

7.4.2 การทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานด้วยชุดทดสอบจริง

การทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานจะดำเนินการเช่นเดียวกับการต่อวงจรชุดทดสอบในบทที่ 6 รูปที่ 6.3 เพื่อแสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตของชุดทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก $40 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$ ไปเป็น $50 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$ ที่เวลา 0.25 วินาที ซึ่งได้ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 ผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตจากชุดทดสอบ

จากรูปที่ 7.7 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ และผลตอบสนองจากชุดทดสอบจริง ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับผลตอบสนองจากชุดทดสอบจริงในสถานะอยู่ตัว แต่รูปสัญญาณในสถานะชั่วคราวยังไม่สอดคล้องเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของระบบในแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีค่าแตกต่างกับพารามิเตอร์ของชุดทดสอบ ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวอาจทำให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาพารามิเตอร์ของชุดทดสอบโดยการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นไปประยุกต์ใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์เพื่อหาพารามิเตอร์ชุดทดสอบจริงด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 7.4.3

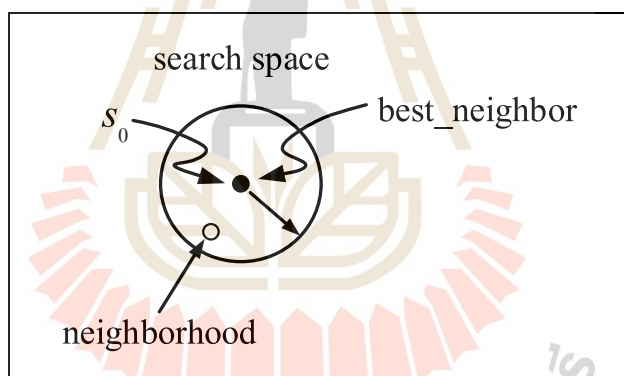
7.4.3 การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การระบุเอกลักษณ์ทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (Adaptive tabu search: ATS) เป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามู (Tabu Search: TS) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากการค้นหาแบบตามูประสบปัญหาเรื่องของการล็อกโดยคำตอบเฉพาะถิ่น ทำให้ไม่สามารถเข้าสู่หาคำตอบวงกว้าง (global solution) ได้อย่างแท้จริง จึงได้มีการพัฒนาเป็นการค้นหา

แบบตามูเชิงปรับตัวขึ้น ซึ่งอัลกอริทึมนี้ได้ถูกพัฒนาโดย กองพัน อารีรักษ์ และสราวุฒิ สุกิจจร ใน พ.ศ. 2545 โดยได้ทำการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตามูธรรมชาติ คือ การเดินย้อนรอย (back tracking) และการปรับรัศมีการค้นหา (adaptive radius) โดยกลไกการเดินย้อนรอยนั้นใช้แก้ปัญหาสำหรับการติดอยู่ในคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum) คืออนุญาตให้ระบบค้นหาทำการกลับไปค้นหาพื้นที่คำตอบเก่าที่เคยถูกค้นหามาแล้ว และกลไกการปรับรัศมีการค้นหา จะทำการปรับลดรัศมีการค้นหาในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด (D. Puangdownreong, K-N. Areerak, A. Srikaew, S. Sujitjorn and P. Totarong, 2002) ซึ่ง อัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสามารถพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

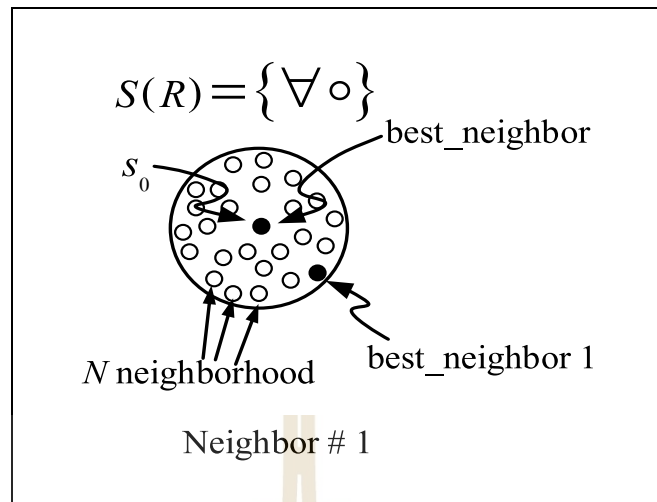
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น s_0 ภายในพื้นที่การค้นหา และให้ s_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกลมเฉพาะถิ่น (local solution) แสดงดังรูปที่ 7.8 ดังนี้



รูปที่ 7.8 สุ่มค่า s_0 ในพื้นที่การค้นหา

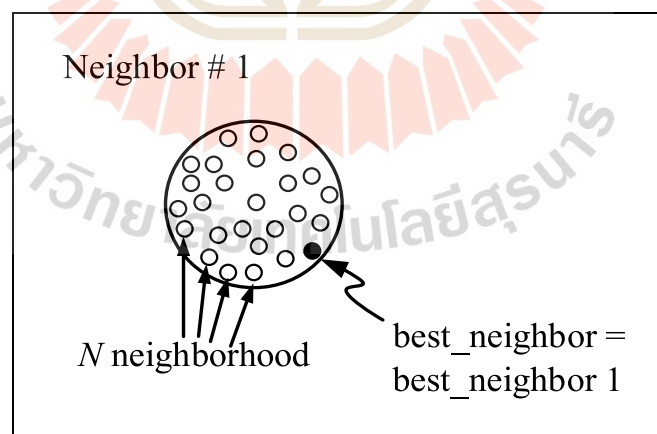
ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบ รอบๆ s_0 ภายในพื้นที่การค้นหารัศมี R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง แสดงดังรูปที่ 7.9 ดังนี้



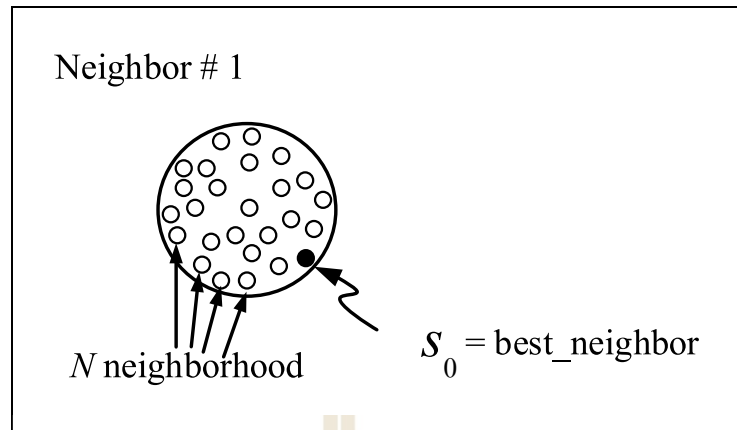
รูปที่ 7.9 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ s_0

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินคำตอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ โดยกำหนดให้ s_1 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดใ $S(R)$

ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $s_1 < s_0$ ดังนั้นกำหนดให้ $s_0 = s_1$ และเก็บค่า s_0 ในรายการตามแสดงดังรูปที่ 7.10 ดังนี้

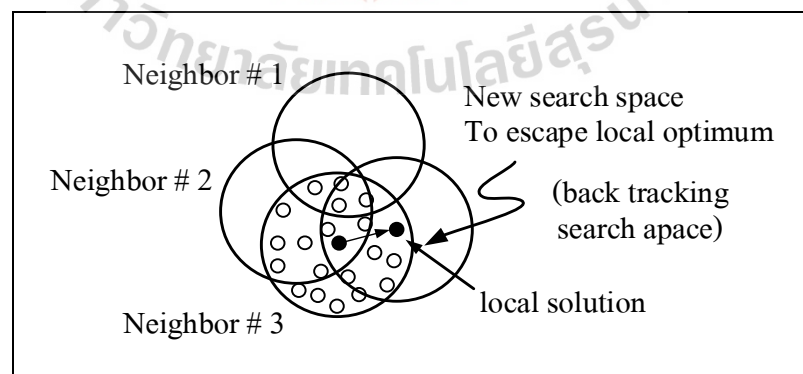


รูปที่ 7.10 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่

รูปที่ 7.11 กำหนดค่า S_0 ใหม่

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า $count \geq count_{max}$ การหยุดกระบวนการการค้นหา โดยที่ค่า S_0 คือคำตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 และเริ่มกระบวนการใหม่อีกครั้งจนกระทั่งได้คำตอบที่พอดี

ขั้นตอนที่ 7 จะเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตามเพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น แสดงได้ดังรูปที่ 7.12



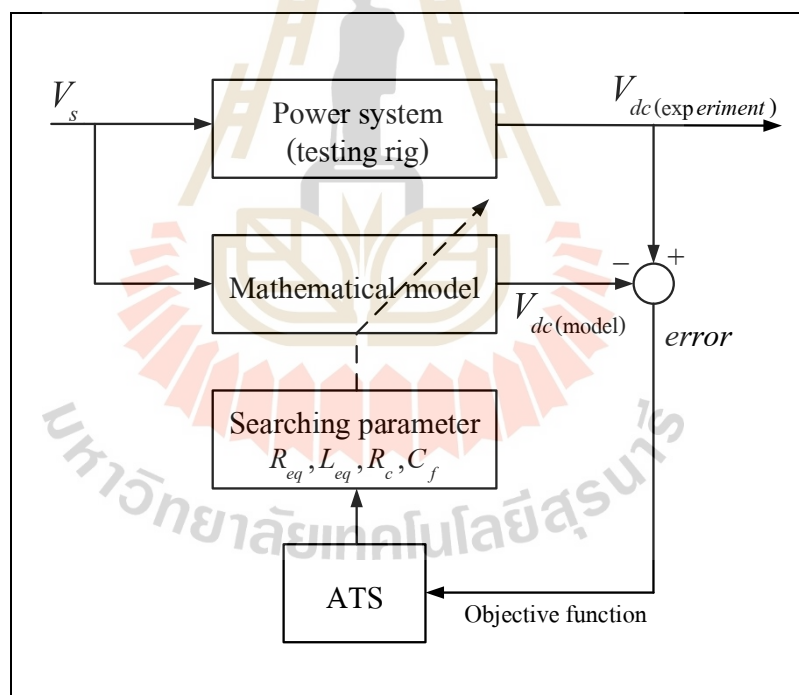
รูปที่ 7.12 กลไกการเดินย้อนรอย

ขั้นตอนที่ 8 จะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7-3)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (7-3)$$

โดยที่ DF คือ ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมี (Decreasing Factor)

การค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว มีโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการค้นหาแสดงได้ดังรูปที่ 7.13



รูปที่ 7.13 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

จากรูปที่ 7.13 แสดงการค้นหาพารามิเตอร์ของชุดทดสอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้ทำการค้นหาประกอบด้วย R_{eq} , L_{eq} , R_c และ C_f ในการค้นหา

จะทำการปรับเปลี่ยนค่า R_{eq} , L_{eq} , R_c และ C_f ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุต (V_s) จาก $40 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$ ไปเป็น $50 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$ เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีของชุดทดสอบ จนกระทั่งผลตอบสนองดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกันหรือมีความคลาดเคลื่อน (*error*) เท่ากับศูนย์ ก็จะได้พารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบ โดยอัลกอริทึมการค้นหานี้จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าต่าง ๆ สำหรับการค้นหา ซึ่งได้แก่ ขอบเขตการค้นหา ค่าปรับลดครีสมิ ค่ารัศมี ค่าคำตอบเริ่มต้น ค่าคำตอบรอบข้าง เป็นต้น

ขอบเขตการค้นหา

การกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์ดังกล่าวจะอาศัยการปรับขอบเขตด้วยการอ้างอิงจากพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.3 เมื่อคำตอบจากการค้นหาพารามิเตอร์มีค่าเท่ากับขอบล่างหรือขอบบน จะให้มีการขยายขอบเขตดังกล่าวออกไปอีก ดังนั้นจากการค้นหาขอบเขตพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด แสดงดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 ขอบเขตพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

พารามิเตอร์ของระบบ	ขอบล่าง	ขอบบน
R_{eq}	0.01 Ω	0.15 Ω
L_{eq}	0.1 mH	0.4 mH
R_c	0.01 Ω	1 Ω
C_f	100 μF	1500 μF

จากตารางที่ 7.4 การกำหนดขอบเขตพารามิเตอร์ในแต่ละรอบนั้นจะถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness Function) ในที่นี้ใช้ค่า W เป็นค่าความผิดพลาดอาร์เอ็มเอส (root mean square error) ที่เกิดจากผลของความคลาดเคลื่อนระหว่างผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีของชุดทดสอบแบบจุดต่อจุด ซึ่งสามารถแสดงการคำนวณหาค่าความผิดพลาดได้ดังสมการที่ (7-4) ดังนี้

$$W = \sqrt{\frac{\sum error^2}{n}} \quad (7-4)$$

โดยที่ $error$ คำนวณได้จาก $|V_{dc(experiment)} - V_{dc(computation)}|$ และ n คือ จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด

จากสมการที่ (7-4) แสดงให้เห็นว่าวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวจะพยายามค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบจนได้ค่า W น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งหมายถึงพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาจะมีค่าใกล้เคียงกับพารามิเตอร์ของชุดทดสอบจริง

การทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

อัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอยู่หลายตัว ดังนั้น เพื่อให้การค้นหาแบบตามูมีประสิทธิภาพมากที่สุด จำเป็นต้องมีการทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวก่อนการนำไปใช้งานจริง ซึ่งการทดสอบจะเริ่มจาก การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี โดยผลการทดสอบจะแสดงดังตารางที่ 7.5 – 7.8 ดังนี้

ตารางที่ 7.5 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า W	0.3748	0.7739	0.3708	0.4395	0.3618	0.4641
จำนวนรอบ	10	2	15	2	4	6.6
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า W	0.5149	0.3659	0.6462	0.6177	0.6558	0.5601
จำนวนรอบ	2	9	1	2	1	3
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ						
ค่า W	0.6067	0.6927	0.6942	0.5363	0.7578	0.6575
จำนวนรอบ	1	1	1	1	1	1
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 40 คำตอบ						
ค่า W	0.6202	0.5154	0.4676	0.4199	0.6494	0.5345
จำนวนรอบ	1	1	1	1	1	1

ตารางที่ 7.5 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น (ต่อ)

ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ						
ค่า W	0.4085	0.4167	0.3618	0.4019	0.5701	0.4318
จำนวนรอบ	1	7	1	1	1	2.2

ตารางที่ 7.6 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่					ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า W	0.8271	0.5239	0.6462	0.4956	0.8058	0.5606
จำนวนรอบ	1	3	1	1	1	1.4
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า W	0.8255	0.4642	0.4555	0.7001	0.5873	0.4891
จำนวนรอบ	1	1	1	1	3	1.4
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ						
ค่า W	0.3672	0.6997	0.5366	0.6699	0.4718	0.5490
จำนวนรอบ	1	2	1	1	1	1.2
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบ						
ค่า W	0.4909	0.5819	0.4912	0.5379	0.6732	0.5550
จำนวนรอบ	1	2	2	3	1	1.8
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ						
ค่า W	0.4781	0.3641	0.5636	0.4710	0.4819	0.4717
จำนวนรอบ	1	1	1	4	1	1.6

ตารางที่ 7.7 การทดสอบค่าร้อยละเริ่มต้น

ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 1						
ค่า W	0.3629	0.5782	0.5136	0.4268	0.3983	0.4559
จำนวนรอบ	4	1	2	1	1	1.8
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 2						
ค่า W	0.4989	0.5839	0.5045	0.4043	0.4032	0.4789
จำนวนรอบ	1	1	1	2	7	2.4
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 3						
ค่า W	0.5418	0.5948	0.5682	0.4537	0.4065	0.5130
จำนวนรอบ	1	1	1	1	1	1
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 4						
ค่า W	0.9371	0.4234	0.3732	0.5891	0.6185	0.5882
จำนวนรอบ	1	1	1	1	1	1
ค่าร้อยละเริ่มต้นเท่ากับ 5						
ค่า W	0.5561	0.4984	0.5685	0.4060	0.4697	0.4997
จำนวนรอบ	1	1	4	8	1	3

ตารางที่ 7.8 การทดสอบค่าปรับลดร้อยละ

ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าตัวปรับลดร้อยละเท่ากับ 1.1						
ค่า W	0.3637	0.6919	0.4447	0.3554	0.3737	0.4458
จำนวนรอบ	9	1	6	16	1	6.6

ตารางที่ 7.8 การทดสอบค่าปรับลดรัศมี (ต่อ)

ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2						
0.5912	0.4757	0.5503	0.4431	0.5692	0.5259	0.5912
1	3	1	2	1	1.6	1
ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3						
ค่า W	0.5512	0.4968	0.5159	0.5365	0.5087	0.5218
จำนวนรอบ	1	1	1	3	3	1.8
ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4						
ค่า W	0.6944	0.5835	0.3507	0.5660	0.5324	0.5454
จำนวนรอบ	1	1	1	1	1	1
ค่าตัวปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.5						
ค่า W	0.3887	0.4170	0.3507	0.4524	0.3533	0.3924
จำนวนรอบ	1	1	10	4	6	4.4

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวตามตารางที่ 7.5 – 7.8 จะพิจารณาเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยดูจากค่า W ควบคู่ไปกับจำนวนรอบได้ดังนี้

- จากตารางที่ 7.5 สังเกตได้ว่าค่า W ในกรณีจำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบมีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ
- จากตารางที่ 7.6 สังเกตได้ว่าค่า W ในกรณีจำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบมีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 50 คำตอบ
- จากตารางที่ 7.7 สังเกตได้ว่าค่า W ในกรณีค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1 คำตอบมีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1
- จากตารางที่ 7.8 สังเกตได้ว่าค่า W ในกรณีค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.5 คำตอบมีค่าน้อยที่สุด จึงเลือกใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.5

ดังนั้นสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้ จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 50 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 50 คำตอบ ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 1 และค่าปรับลดรัศมี

เท่ากับ 1.5 จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้ไปทำการทดสอบการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบ จำนวน 100 รอบ ทั้งหมด 5 ครั้ง เพื่อให้การค้นหาพารามิเตอร์มีความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งมีผลการค้นหาตามตารางที่ 7.9 ดังนี้

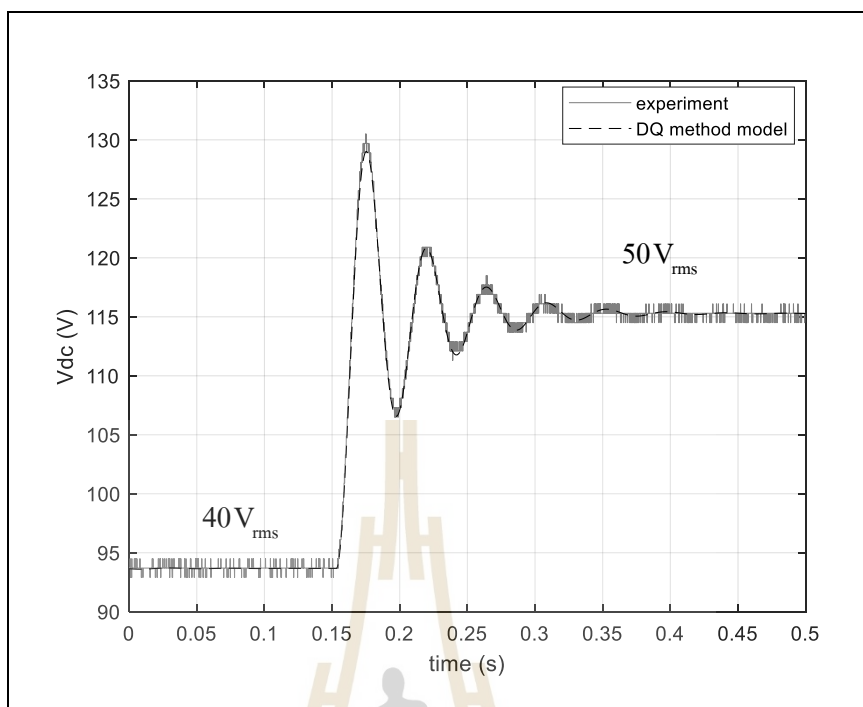
ตารางที่ 7.9 ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบจำนวน 100 รอบ ทั้งหมด 5 ครั้ง

จำนวนครั้ง	R_{eq} (Ω)	L_{eq} (mH)	C_f (F)	R_c (Ω)	W
1	0.0429	0.2189	0.0012	0.5656	0.3514
2	0.0663	0.1509	0.0013	0.5403	0.3465
5	0.0462	0.2087	0.0013	0.5643	0.3505
4	0.0458	0.1645	0.0013	0.5786	0.3563
5	0.0790	0.1005	0.0013	0.5312	0.3463

จากตารางที่ 7.9 จะสังเกตได้ว่า การทดสอบการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบ ในจำนวนการค้นหา 100 รอบ จะทำให้ค่าความผิดพลาดอาร์เอ็มเอสมีค่าน้อยกว่าการทดสอบพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.5 – 7.8 แต่ในทางตรงกันข้าม การค้นหาพารามิเตอร์ในจำนวนรอบที่เพิ่มมากขึ้นจะใช้เวลาในการค้นหาพอสมควร และการทดสอบในแต่ละครั้ง พารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหามีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมไปมากนัก ซึ่งบ่งบอกได้ว่า การกำหนดขอบเขตพารามิเตอร์ในตารางที่ 7.4 ถือเป็นขอบเขตพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้น การค้นหาพารามิเตอร์ของระบบด้วยจำนวนรอบการค้นหา 100 รอบ ทั้งหมด 5 ครั้ง จึงเพียงพอต่องานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบการค้นหาพารามิเตอร์ครั้งที่ 5 เนื่องจากค่าความผิดพลาดอาร์เอ็มเอสมีค่าน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่ได้ ซึ่งจะมีการนำเสนอในลำดับถัดไป

การตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบจากการระบุเอกลักษณ์

จากพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาตามตารางที่ 7.9 สามารถนำไปทดสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ที่ได้ โดยการนำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปใช้เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีจากชุดทดสอบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตจาก 40 V_{rms} ไปเป็น 50 V_{rms} ที่เวลา 0.15 วินาที แสดงได้ดังรูปที่ 7.14



รูปที่ 7.14 ผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี

จากรูปที่ 7.14 สังเกตได้ว่าผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีจากชุดทดสอบจริง มีลักษณะรูปสัญญาณที่สอดคล้องกันทั้งในสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นพารามิเตอร์ของระบบที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จึงเป็นพารามิเตอร์ถูกต้อง

7.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 7 ได้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน โดยพารามิเตอร์ที่ได้ทำการค้นหาประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ของความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง (L_f), ค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ (R_f), ค่าความต้านทานของสายส่ง (R_{eq}), ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง (L_{eq}), ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (C_f) และค่าความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (R_c) ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอวิธีการค้นหาพารามิเตอร์ดังกล่าวได้ 2 วิธี วิธีแรกคือการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัด ใช้สำหรับการค้นหาค่า L_f และ R_f เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวหาค่าได้ง่ายด้วยเครื่องมือวัด และวิธีที่สองคือการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่าวิธีการค้นหาแบบ

ตามูเชิงปรับตัวใช้สำหรับการค้นหาค่า R_{eq} , L_{eq} , R_c และ C_f เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดได้ยากและมีความซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในการค้นหา โดยวิธีการนี้ได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานร่วมกับอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งอัลกอริทึมจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าต่าง ๆ สำหรับการค้นหา ซึ่งได้แก่ ขอบเขตการค้นหา ค่าปรับลดรศมี ค่ารัศมี ค่าคำตอบเริ่มต้น ค่าคำตอบรอบข้าง เพื่อให้ผลการค้นหาพารามิเตอร์มีความแม่นยำมากที่สุด และยังมีการตรวจสอบความถูกต้องของผลการค้นหา โดยการนำพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาไปใช้เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีจากชุดทดสอบ ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบพบว่าผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีจากชุดทดสอบจริง มีลักษณะรูปสัญญาณที่สอดคล้องกันทั้งในสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นพารามิเตอร์ของระบบที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จึงเป็นพารามิเตอร์ถูกต้อง และเหมาะสมที่จะนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริงที่จะมีการนำเสนอขึ้นในบทที่ 8 เป็นลำดับถัดไป



บทที่ 8

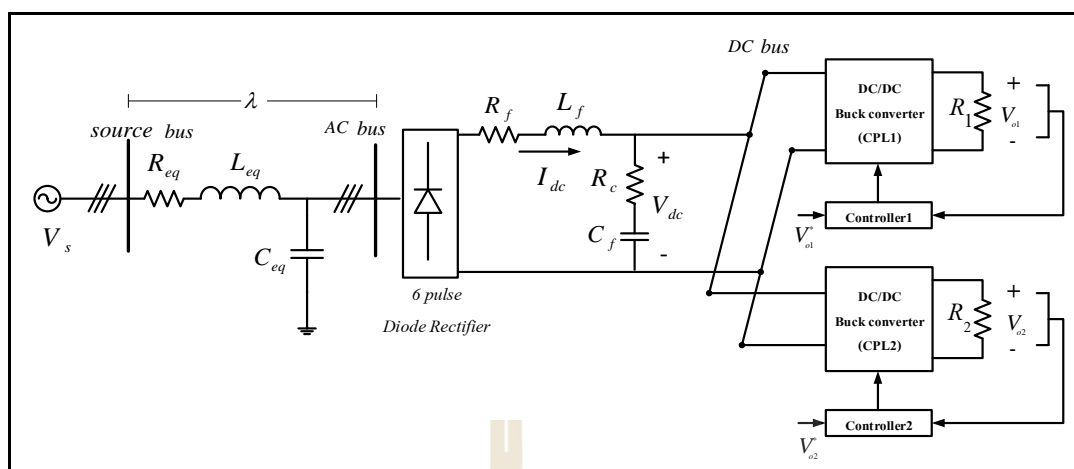
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์มีจุดประสงค์หลักคือการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน โดยในบทที่ 3 และบทที่ 5 ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงและเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก์ อีกทั้งยังมีการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์อาจจะยังไม่เพียงพอสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงเพื่อให้งานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากขึ้น และการยืนยันผลการวิเคราะห์ที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี โดยอาศัยองค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 5 และใช้ชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในบทที่ 6 ร่วมกับการระบุเอกลักษณ์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของระบบในบทที่ 7

8.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาคือระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกันที่แสดงดังรูปที่ 8.1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซีที่เชื่อมต่อกับโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมทั้ง 2 ชุด ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าเดียวกับที่นำเสนอไว้ในบทที่ 5 ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงนี้จะพิจารณาเช่นเดียวกันกับบทที่ 5 โดยการวิเคราะห์จะเริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโดยใช้วิธีคิดร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบออกมา จากนั้นทำการแปลงแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง และมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์



รูปที่ 8.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแล้ว จะสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงได้ ซึ่งในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์จะต้องมีค่าเท่ากับพารามิเตอร์ของชุดทดสอบ จึงมีการระบุเอกลักษณ์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 7 ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของชุดทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 8.1

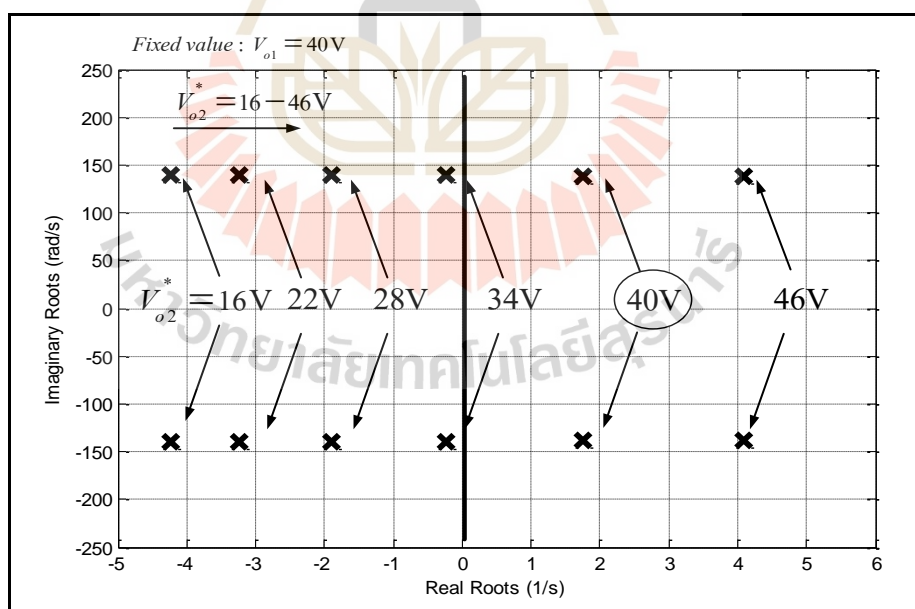
ตารางที่ 8.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 8.1

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	40 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
R_{eq}	0.0790 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	0.1005 mH	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
R_f	0.2756 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_f	39.0002 mH	ความเหนี่ยวนำวงจรกรอง
R_c	0.5312 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_f	0.0013 F	ความจุไฟฟ้าวงจรกรอง

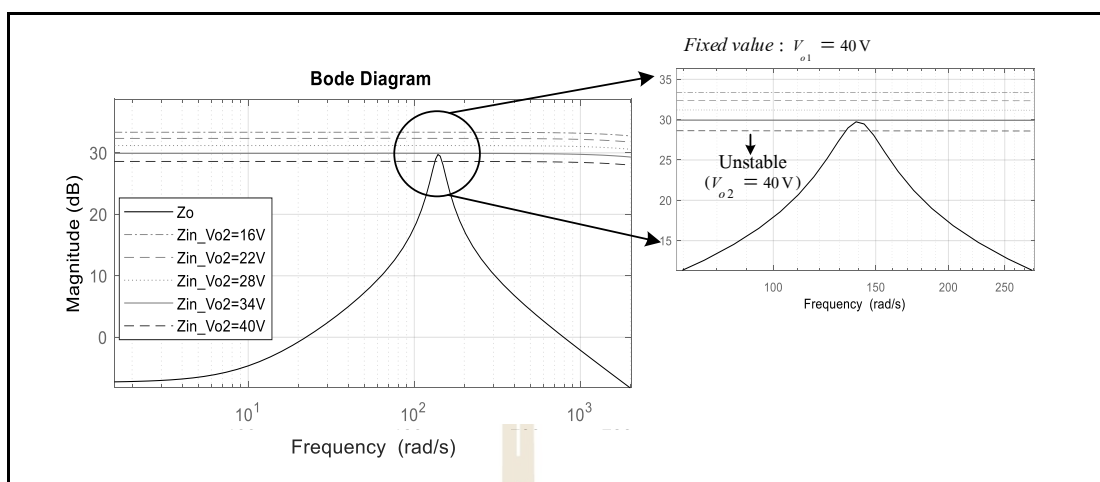
ตารางที่ 8.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 8.1 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$L_1 = L_2 (\Delta L_L \leq 0.2A)$	15 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคค์
$C_1 = C_2 (\Delta V_o \leq 2.8mV)$	1000 μF	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคค์
$R_1 = R_2$	10 Ω	ความต้านทานของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์

การวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริงจะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูกเช่นเดียวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในบทที่ 5 โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 2 (V_{o2}^*) และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 1 (V_{o1}^*) เท่ากับ 40 V เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งค่าเจาะจงของระบบ ซึ่งมีผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงด้วยวิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจงดังรูปที่ 8.2 และผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูกดังรูปที่ 8.3 ตามลำดับ



รูปที่ 8.2 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงด้วยวิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจง

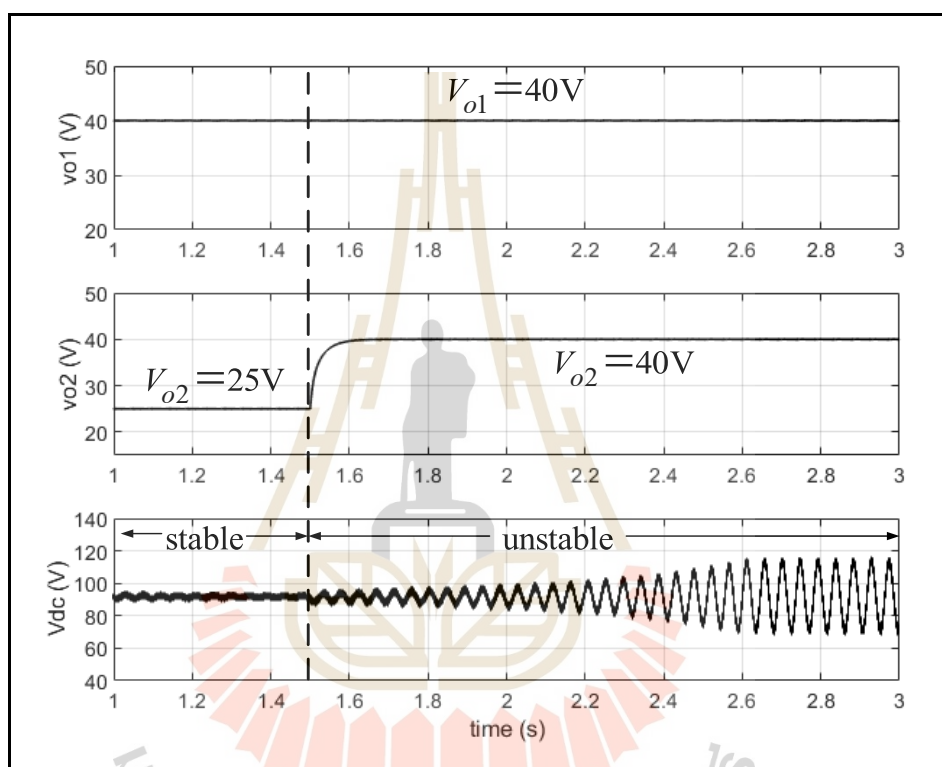


รูปที่ 8.3 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก

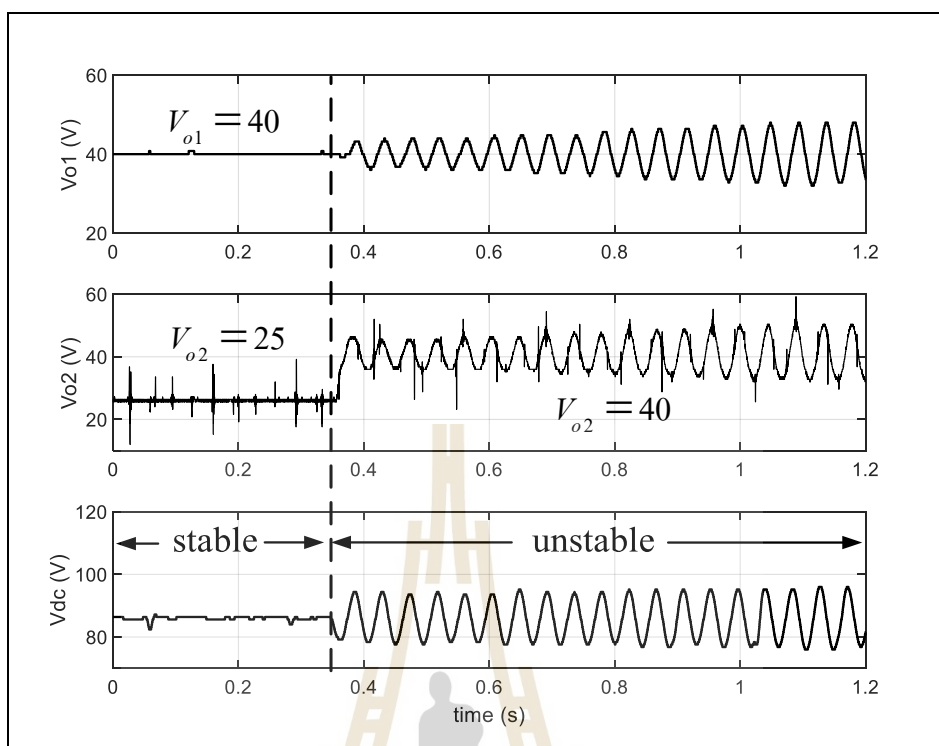
จากรูปที่ 8.2 เมื่อทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 จาก 16 V จนถึง 46 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 1 เท่ากับ 40 V พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 เท่ากับ 40 V ส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่ามากกว่าศูนย์ หรือมีตำแหน่งอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอส นั่นคือที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบขาดเสถียรภาพ และรูปที่ 8.3 แสดงแผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้สูงขึ้นจะทำให้ขนาดของ Z_{in} ลดลงในทุก ๆ ย่านความถี่ เมื่อคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 1 เท่ากับ 40 V และปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 เพิ่มขึ้นจนถึง 40 V ขนาดของ Z_o จะมีค่ามากกว่าขนาดของ Z_{in} นั่นคือระบบเริ่มมีการขาดเสถียรภาพ ซึ่งจากการวิเคราะห์ก็แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกันหรือสามารถคาดเดาขนาดเสถียรภาพได้ที่จุดเดียวกัน และเพื่อความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นจะมีการยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์และยืนยันผลจากชุดทดสอบ ที่จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 8.3 ต่อไป

8.3 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมขนานกันดังแสดงในรูปที่ 8.1 มีการยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากทั้งสองวิธีกับการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์และผลจากชุดทดสอบ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 8.4 ถึงรูปที่ 8.5 ดังนี้



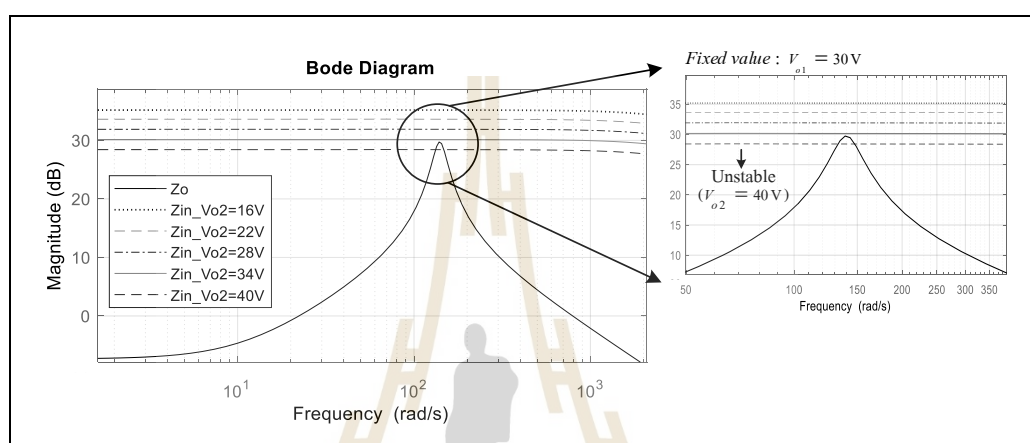
รูปที่ 8.4 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์



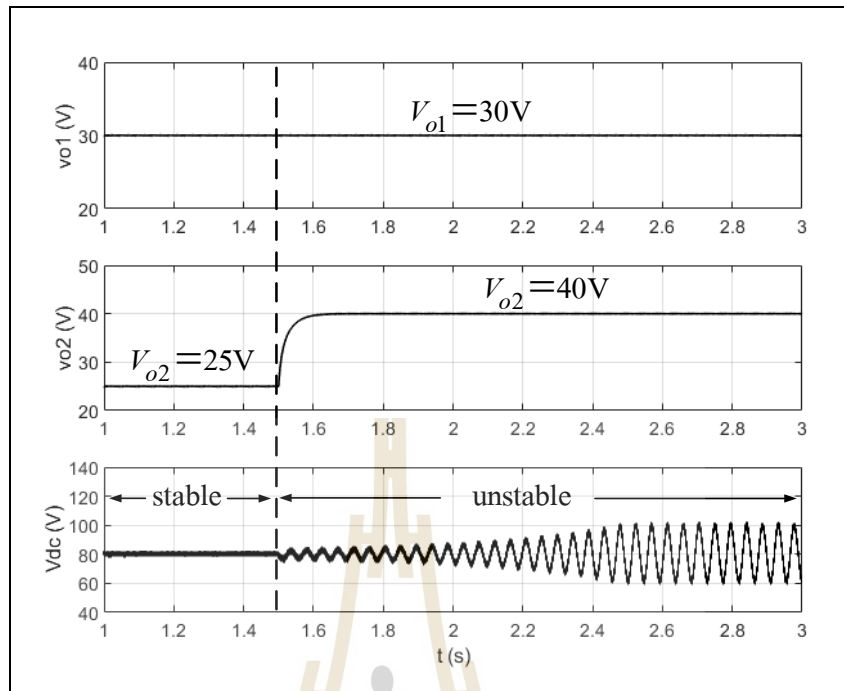
รูปที่ 8.5 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดทดสอบจริง

จากรูปที่ 8.4 และรูปที่ 8.5 มีการคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 1 เท่ากับ 40 V และปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 เพิ่มขึ้นจนถึง 40 V จะทำให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่มากขึ้น หรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูคินั้น ให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากชุดทดสอบจริง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ และจากการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดทดสอบจริงจะเห็นได้ว่าเมื่อระบบมีการขาดเสถียรภาพไม่เพียงแต่แรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) เท่านั้นที่มีการกระเพื่อมเกิดขึ้นแต่ยังส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้งสองชุดมีการกระเพื่อมเกิดขึ้นด้วยหรือโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ไม่สามารถควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่ได้ จากผลดังกล่าวทำให้เห็นว่าเมื่อนำระบบพิจารณานี้ไปประยุกต์ใช้กับโพลชนิดอื่น ๆ เมื่อระบบขาดเสถียรภาพอาจทำให้อุปกรณ์ชำรุดเสียหายหรือเป็น

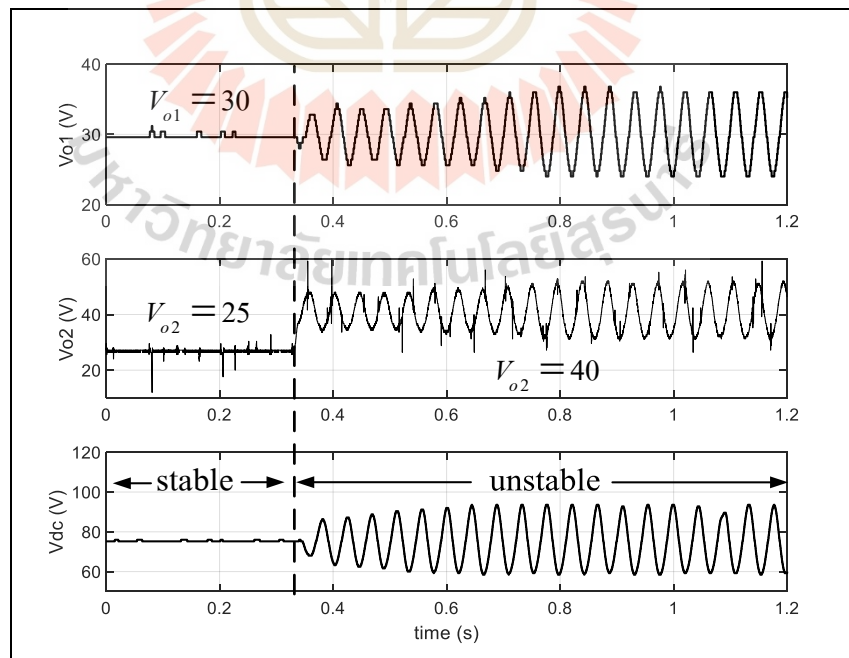
อันตรายนได้ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง และเพื่อยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูกให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น จึงทำการเปลี่ยนค่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก $V_s = 40 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$ เป็น $35 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$ และ $45 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$ เพื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ซึ่งมีผลการพิจารณาดังรูปที่ 8.6 ถึง 8.11 ดังนี้



รูปที่ 8.6 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก เมื่อ $V_s = 35 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$

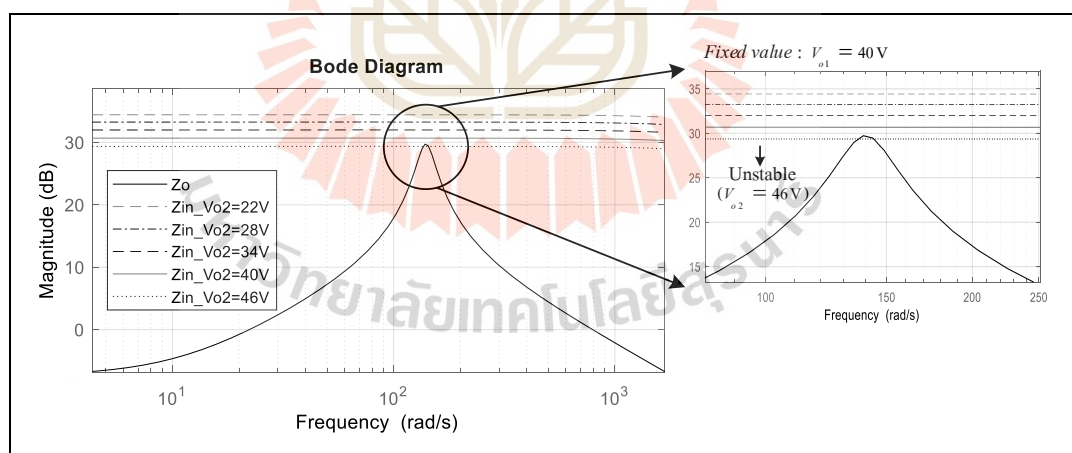


รูปที่ 8.7 การขึ้นชั้นผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
เมื่อ $V_s = 35 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$

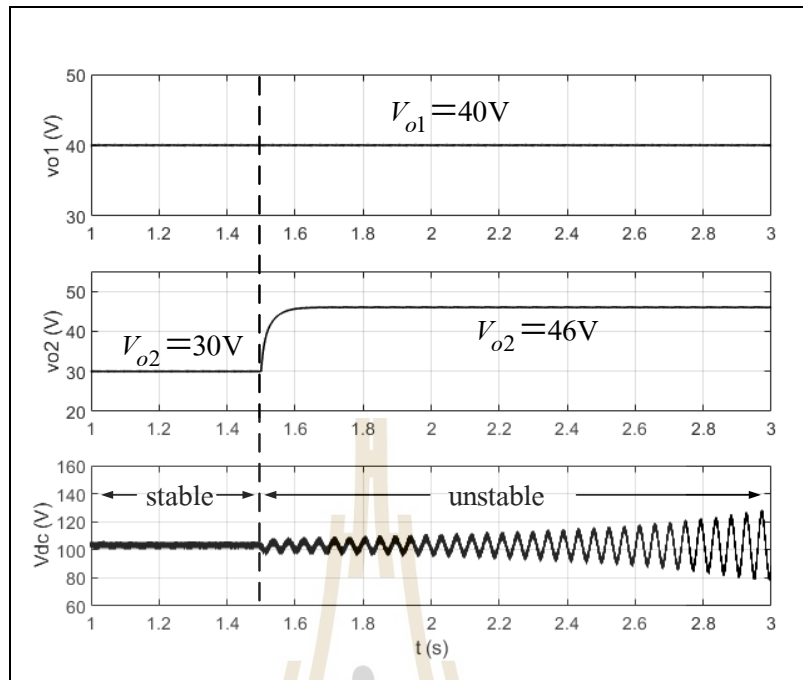


รูปที่ 8.8 การขึ้นชั้นผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดทดสอบจริง เมื่อ $V_s = 35 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$

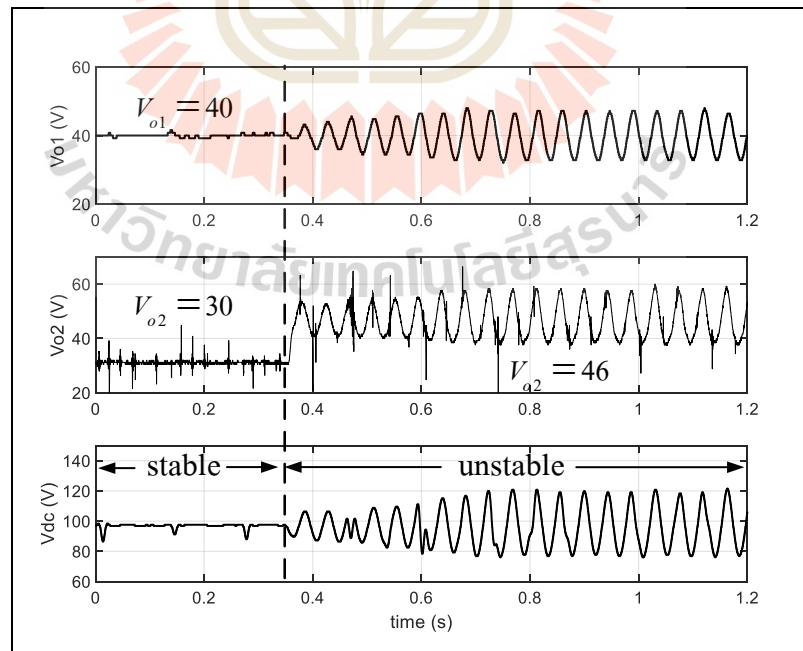
จากรูปที่ 8.6 แสดงแผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าเป็น $35 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$ เมื่อคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 1 เท่ากับ 30 V และปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 เพิ่มขึ้นจนถึง 40 V ขนาดของ Z_o จะมากกว่าขนาดของ Z_{in} นั่นคือระบบเริ่มมีการขาดเสถียรภาพ และเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์จะมีการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพกับการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์และผลจากชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 8.7 และรูปที่ 8.8 ตามลำดับ จากรูปเมื่อคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 1 เท่ากับ 30 V และปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 เพิ่มขึ้นจนถึง 40 V จะทำให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่มากขึ้น หรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูกนั้นให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากชุดทดสอบจริง



รูปที่ 8.9 แผนภาพโบเดของ Z_o และ Z_{in} สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก เมื่อ $V_s = 45 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$



รูปที่ 8.10 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
เมื่อ $V_s = 45$ V_{rms/phase}



รูปที่ 8.11 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดทดสอบจริง เมื่อ $V_s = 45$ V_{rms/phase}

จากรูปที่ 8.9 แสดงแผนภาพโพลของ Z_o และ Z_{in} ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าเป็น $45 \text{ V}_{\text{rms/phase}}$ เมื่อคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 1 เท่ากับ 40 V และปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 เพิ่มขึ้นจนถึง 46 V ขนาดของ Z_o จะมากกว่าขนาดของ Z_{in} นั่นคือระบบเริ่มมีการขาดเสถียรภาพ และเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์จะมีการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพกับการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์และผลจากชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 8.10 และรูปที่ 8.11 ตามลำดับ จากรูปเมื่อคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 1 เท่ากับ 40 V และปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 เพิ่มขึ้นจนถึง 46 V จะทำให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่มากขึ้น หรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรुकนั้นให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากชุดทดสอบจริง ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรुकสามารถคาดเดาขนาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

8.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริงที่ได้สร้างขึ้นในบทที่ 6 ซึ่งในที่นี้ก็คือระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่มีการควบคุมขนาดกัน โดยในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรुकที่ได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบซึ่งจะพิจารณาเช่นเดียวกับระบบไฟฟ้าที่นำเสนอไว้ในบทที่ 5 และเพื่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ที่แท้จริงของชุดทดสอบโดยการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของชุดทดสอบด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 7 และมีการยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์และผลจากชุดทดสอบ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งสองวิธีสามารถคาดเดาขนาดเสถียรภาพของระบบได้ตรงกันและผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากชุดทดสอบจริง และเพื่อยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรुकให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นจึงทำการเปลี่ยนค่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไปที่ค่าต่าง ๆ เพื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ จึงพบว่าเกณฑ์

เสถียรภาพของมิตเดิลบรुकสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้ถูกต้อง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ



บทที่ 9

สรุปและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซซีที่โหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน ซึ่งโหลดในลักษณะนี้จะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะเริ่มต้นจากการศึกษาค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมที่งานวิจัยตั้งอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ และวิธีการในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ซึ่งจากการศึกษาค้นคว้าก็พบว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจง เกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก และวิธีการแบบไม่เป็นเชิงเส้น เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจงเนื่องจากเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบพื้นฐานที่ใช้สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูกเนื่องจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการขนานกันของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ การใช้วิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจงอาจเกิดความยุ่งยากและซับซ้อน จากการศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งสองวิธีดังที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ดังนั้นจึงต้องศึกษาการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบซึ่งจากการค้นคว้าพบว่าการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีดีคิว วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป วิธีค่าเฉลี่ยไม่เป็นเชิงเส้น เป็นต้น โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีดีคิวร่วมกับวิธีวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่กล่าวมานี้ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกัน โดยเริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุมก่อน โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยจะใช้วิธีดีคิวในส่วนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เพราะเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและเหมาะสมกับระบบไฟฟ้าสามเฟส และใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในส่วนของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าดิซซีเป็นดิซซี โดยเริ่มจากการพิสูจน์หาแบบจำลองเชิงพลวัตการทำให้เชิงเส้น

การคำนวณค่าในสถานะคงตัว และมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ หลังจากที่ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกรณีที่ไม่มีการควบคุมแล้วจึงได้เพิ่มตัวควบคุมแบบพีไอเข้าไปในระบบ แล้วทำการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีการควบคุมเพิ่มเติม พร้อมทั้งมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กล่าวมาข้างต้นได้แสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 3 เมื่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากรณีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุมมีความถูกต้องจึงสามารถนำแบบจำลองไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ใช้วิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจงที่พิจารณาจากตำแหน่งค่าเจาะจงของระบบบนระนาบเอสในการวิเคราะห์ และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก์ที่พิจารณาจากเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรด้านฝั่งโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีตัวควบคุมผ่านแผนภาพ โปเดเพื่อแสดงขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองในย่านความถี่ต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ ซึ่งจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุมจากทั้ง 2 วิธี ได้ให้ผลที่สอดคล้องกัน และเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์จึงมีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากทั้งสองวิธีกับการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ จากการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพพบว่าการใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก์สามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้อง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุมขนานกันได้ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพที่กล่าวมาข้างต้นได้แสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 4

ในลำดับต่อมาเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุมขนานกัน โดยเริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบด้วยวิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปโดยได้อาศัยองค์ความรู้จากการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง ก็ได้นำแบบจำลองไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกรณีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุมขนานกัน 2 ชุด ด้วยวิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจง แต่เนื่องจากการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้เกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก์ได้พิจารณาจากเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ และอินพุตอิมพีแดนซ์ ซึ่งเมื่อมีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุมขนานกัน 2 ชุด จึงสามารถนำอินพุตอิมพีแดนซ์หรืออิมพีแดนซ์ของวงจรทางฝั่งโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์มาขนานกันระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันแบบบัก์ชุดที่หนึ่งและอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผันแบบบัก์ชุดที่สองทำให้ได้อินพุตอิมพีแดนซ์รวมของวงจรทางฝั่ง

โหลด และนำอินพุตอิมพีแดนซ์และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ไปพิจารณาผ่านแผนภาพโบลเดเพื่อใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไป ซึ่งจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูกครณีที่มีโหลดชนิดเดิมมาขนาดนี้ไม่จำเป็นต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่ทั้งระบบ จึงทำให้ลดความยุ่งยากและซับซ้อนเมื่อเทียบกับการนำวิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาใช้ในการวิเคราะห์ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูกจึงเหมาะสมกับระบบที่มีการนำโหลดมาขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และเพื่อยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการดังกล่าวจึงได้มีการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกรณีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีการควบคุมขนาดกัน 3 ชุด และขนาดกัน 4 ชุด โดยอาศัยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก และมีการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพกับการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ จากการยืนยันผลพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูกที่อาศัยการขนาดกันของอินพุตอิมพีแดนซ์สามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพได้ถูกต้อง ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคก์ขนาดกันตามที่กล่าวมาข้างต้นได้มีการแสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 5

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ไม่เพียงแต่มุ่งเน้นการวิเคราะห์เสถียรภาพทางทฤษฎีเท่านั้น แต่ยังมี การสร้างชุดทดสอบเพื่อใช้สำหรับยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีด้วยวิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก โดยรายละเอียดในการสร้างชุดทดสอบและส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มี โหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีการควบคุมขนาดกันที่สร้างขึ้น ได้มีการแสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 6 เมื่อชุดทดสอบสามารถควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ทั้ง 2 ชุด ได้อย่างถูกต้องแม่นยำแล้ว ก็สามารถนำชุดทดสอบไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ แต่เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์ต้องการผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำ จึงจำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ที่แท้จริงของชุดทดสอบ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการค้นหาพารามิเตอร์ 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีการค้นหาพารามิเตอร์ด้วย เครื่องมือวัด และการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์โดยอาศัยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งจะนำวิธีการดังกล่าวมาค้นหาพารามิเตอร์ในส่วนของคุณค่าความจุของวงจรกรอง (C_f), ค่าความต้านทานภายในของตัวเก็บประจุ (R_c), ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง (L_{eq}) และค่าความต้านทานภายในของตัวเหนี่ยวนำ (R_{eq}) เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นไม่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือวัด และวิธีการค้นหาพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัดจะนำมาค้นหาพารามิเตอร์ในส่วนของคุณค่าความเหนี่ยวนำ (L_f) และค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง (R_f) เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบจึงสามารถนำค่าพารามิเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์

เสถียรภาพของชุดทดสอบจริง ซึ่งการค้นหามอเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้นได้แสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 7 และสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริงก็ได้อาศัยองค์ความรู้ที่ได้รับการนำเสนอขึ้นไว้ในบทที่ 5 โดยใช้วิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากทั้งสองวิธีสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้ตรงกัน และผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกฟีกำลังบนคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากชุดทดสอบจริง ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริงที่กล่าวมาข้างต้นได้แสดงไว้อย่างละเอียดในบทที่ 8 ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชไอเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัลค์ที่มีการควบคุมขนานกัน โดยใช้วิธีทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูก ที่ได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการพิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้อง

9.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- งานวิจัยในอนาคตควรมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจากแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้มีแนวทางการวิเคราะห์ที่หลากหลาย และเพื่อศึกษาความแตกต่างของการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น
- การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ พิจารณาภายใต้เงื่อนไขการทำงานใน โหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (continuous conduction mode: CCM) ซึ่งยังไม่ครอบคลุมโหมดการทำงานทั้งหมดของระบบ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตจึงควรพิจารณาการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้เงื่อนไขการทำงานใน โหมดการนำกระแสที่ไม่ต่อเนื่อง (discontinuous conduction mode: DCM) เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายการทำงานของระบบในย่านการทำงานที่กว้างขึ้น
- ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาคือระบบไฟฟ้ากำลังเอชไอเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัลค์ที่มีการควบคุม ซึ่งโหลดวงจรแปลงผันดังกล่าวมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นเพื่อความหลากหลายของผลการวิเคราะห์งานวิจัยในอนาคตจึงควรมีการเปลี่ยน โหลดเป็น โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวประเภทอื่น ๆ เพื่อสังเกตผลการขาดเสถียรภาพของระบบ

รายการอ้างอิง

- Emadi, A. (2004). Modeling and Analysis of Multiconverter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. **IEEE Trans. on Indus. Elect.** 51(3): 661-668.
- Emadi, A. (2004). Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. **IEEE Trans. on Indus. Elect.** 51(5): 992-1000.
- Middlebrook, R. D. (1976). Input filter consideration in design and application of switching regulators. **Proc. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Meeting.** : 366-382.
- Feng, X., Liu, J. and Lee, F. C. (2002). Impedance specification for stable DC distributed power system. **IEEE Trans. Power Electron.** 17(2): 157-162.
- Riccobono, A. and Santi, S. (2014). Comprehensive review of stability criteria for DC power distributed system. **IEEE Trans. Ind Applicat.** 50(5): 3525-3535.
- Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D. and Ehsani, M. (1997). Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach. **IEEE Trans. on Circuit and Systems.** 44(8): 767-770.
- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M. and Thomas, D.W.P. (2008). Stability Analysis and Modelling of AC-DC System with Mixed Load Using DQ-Transformation Method. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08).** : 19-24.
- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M. and Thomas, D.W.P. (2008). DQ-transformation approach for modelling and stability analysis of AC-DC power system with controlled PWM rectifier and constant power loads. **Power Electronics and Motion Control Conference.** : 2049-2054.
- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., de Lillo, L., Asher, G.M., Thomas D.W.P., Watson A. and Wu T. (2009). The stability analysis of AC-DC systems including actuator dynamics for aircraft power systems. **13th European Conference on Power Electronics and Applications.** : 1-10.

- Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H. and Williamson, G.A. (2006). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives. **IEEE Trans. on Vehicular Tech.** 55(4): 1112- 1125.
- Chaijarunudomrung, K., Areerak, K-N. and Areerak, K-L. (2010). Modeling of Three-phase Controlled Rectifier using a DQ method. **2010 International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE 2010)**. : 56-59.
- Emadi, A., Fahimi, B., and Ehsani, M. (1999). On the Concept of Negative Impedance Instability in the More Electric Aircraft Power Systems with Constant Power Loads. **Soc. Automotive Eng. Joutnal.** : 689-699.
- Han, S.B., Choi, N.S., Rim, C.T., and Cho, G.H. (1998). Modeling and Analysis of Static and Dynamic Characteristics for Buck-Type Three-Phase PWM Rectifier by Circuit DQ Transformation. **IEEE Trans. on Power Electronics.** 13(2): 323-336.
- Tsang, K.M., and Chan, W.L. (2005). Cascade controller for DC/DC buck convertor. **IEEE Electric Power Applications.** 152(4): 827-831.
- Glover, S.F. (2003). Modeling and stability analysis of power electronics based systems. **Ph.D. dissertation.**
- Rivetta, C., Williamson, G. A. and Emadi, A. (2005). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Sea and Undersea Vehicles: Statement of the Problem and Comprehensive Large-Signal Solution. **Proc. IEEE Electric Ship Tech. Symposium.** : 313-320.
- กองพัน อารีรักษ์. (2560). ระบบควบคุม. พิมพ์ครั้งที่ 1. นครราชสีมา. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เทพพนม โสภานเพิ่ม (2554). การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อภิชัย สุขะพันธ์ (2558). การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชซีเป็นมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.



ภาคผนวก ก

โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – رافสัน
สำหรับคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและค่าในสถานะอยู่ตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

*****
ก.1 โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – رافสัน สำหรับคำนวณการไหลของ
กำลังไฟฟ้าและค่าในสถานะอยู่ตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
*****
%ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ
Vs=40; %แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส
f=50; %ความถี่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส
Req=0.05604; %ค่าความต้านทานสมมูลสายส่ง
Leq=1.6875e-6; %ค่าความเหนี่ยวนำสมมูลสายส่ง
Ceq=2e-9; %ค่าความจุไฟฟ้าสมมูลสายส่ง
rL=0.2756; %ค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง
Ldc=39.0002e-3; %ค่าความเหนี่ยวนำวงจรกรอง
Cdc=0.0013; %ค่าความจุไฟฟ้าวงจรกรอง
rc=0.556; %ค่าความต้านทานภายในตัวเก็บประจุวงจรกรอง
L=15e-3; %ค่าความเหนี่ยวนำวงจรแปลงผันแบบบัก์
C=1000e-6; %ค่าความจุไฟฟ้าวงจรแปลงผันแบบบัก์
R=10; %ค่าโหลดความต้านทานวงจรแปลงผันแบบบัก์
Kpv=0.07; %ตัวปรับคุณตัวควบคุมพีของลูปแรงดัน
Kiv=4.44; %ตัวปรับคุณตัวควบคุมไอของลูปแรงดัน
Kpi=1.538; %ตัวปรับคุณตัวควบคุมพีของลูปกระแส
Kii=7211; %ตัวปรับคุณตัวควบคุมไอของลูปกระแส %%%
ru=(3*Leq*2*pi*f)/pi;
% Set Initial Values
VoCommand=40; %กำหนดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัก์
Pload=(VoCommand^2)/R;
Ptotal=Pload;
Z=sqrt(Req^2+(2*pi*f*Leq)^2);
Gamma=atand((2*pi*f*Leq)/Req);
%%%กำหนดค่าคำตอบเริ่มต้นและค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้%%%
Vbus(1)=50;

```

```

Lambda(1)=0;
ea_Vbus=100;
ea_Lambda=100;
es=1e-6;
k=1;
%%% คำนวณมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันกระแสสลับด้วยการคำนวณ
เชิงตัวเลขของนิวตัน - ราวฟสัน %%%
while 1
f1=(Vbus(k)*Vs*cosd(Gamma-Lambda(k)))/Z-(((Vbus(k)^2)*cosd(Gamma))/Z)-Ptotal/3;
f2=(Vbus(k)*Vs*sind(Gamma-Lambda(k)))/Z-(((Vbus(k)^2)*sind(Gamma))/Z);
f1_Vbus=(Vs*cosd(Gamma-Lambda(k)))/Z-(((2*Vbus(k))*cosd(Gamma))/Z);
f1_Lambda=(Vbus(k)*Vs*sind(Gamma-Lambda(k)))/Z;
f2_Vbus=(Vs*sind(Gamma-Lambda(k)))/Z-(((2*Vbus(k))*sind(Gamma))/Z);
f2_Lambda=-(Vbus(k)*Vs*cosd(Gamma-Lambda(k)))/Z;
Vbus(k+1)=Vbus(k)-(((f2_Lambda*f1)-(f1_Lambda*f2))/((f1_Vbus*f2_Lambda)-
(f1_Lambda*f2_Vbus)));
Lambda(k+1)=Lambda(k)-(((f1_Vbus*f2)-(f2_Vbus*f1))/((f1_Vbus*f2_Lambda)-
(f1_Lambda*f2_Vbus)));
%%% คำนวณค่าในสถานะคงตัวต่าง ๆ %%%
Idc=(Vs-Vbus(k+1)*cosd(Lambda(k+1))+i*Vbus(k+1)*sind(Lambda(k+1)))/(Z*cosd(Gamma)
+i*(Z*sind(Gamma)));
Idc=(abs(Idc)*sqrt(3))/(sqrt(3/2)*2*sqrt(3)/pi);
Edc1=(3*sqrt(3)*sqrt(2)*Vbus(k+1))/pi;
Vdc=Edc1-(ru+rL)*Idc;
Vo=VoCommand;
IL=Vo/R;
Xv=IL/Kiv;
Xi=Vo/(Kii*Vdc);
Pload=(VoCommand^2)/R;
Ploss=(ru+rL)*(Idc^2);

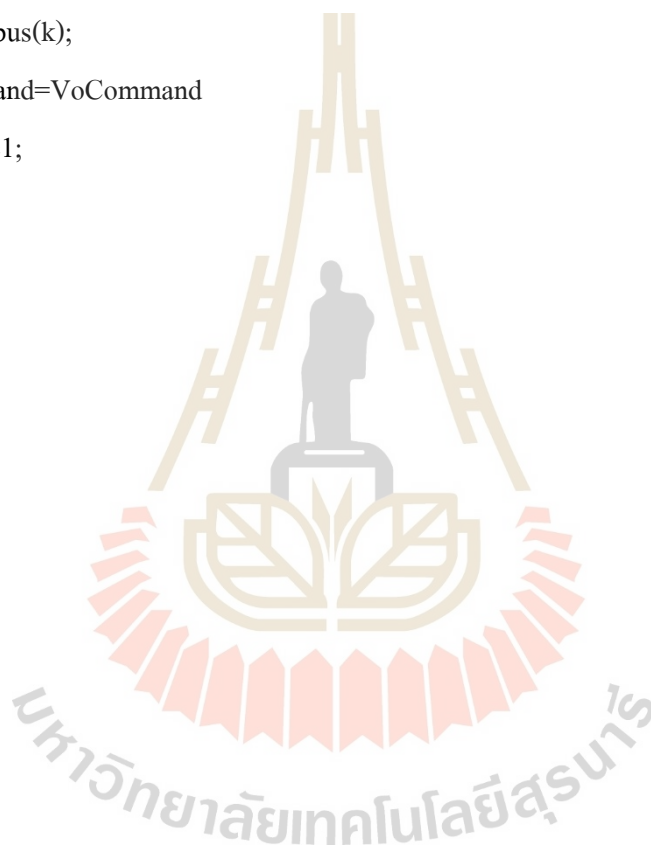
```



```

Ploss=(ru+rL)*(Idc^2);
Ptotal=Pload+Ploss;
ea_Vbus=abs((Vbus(k+1)-Vbus(k))/Vbus(k+1))*100;
ea_Lambda=abs((Lambda(k+1)-Lambda(k))/Lambda(k+1))*100;
if ea_Vbus<=es&&ea_Lambda<=es
Lambda_degree=Lambda(k)
    Lambda_radius=Lambda(k)*(pi/180)
    Vbusd=Vbus(k);
    VoCommand=VoCommand
    Edc1=Edc1;
    Idc=Idc
    Vdc=Vdc
    IL=IL
    Vo=Vo
    Xv=Xv
    Xi=Xi
    break
end
k=k+1;
end

```

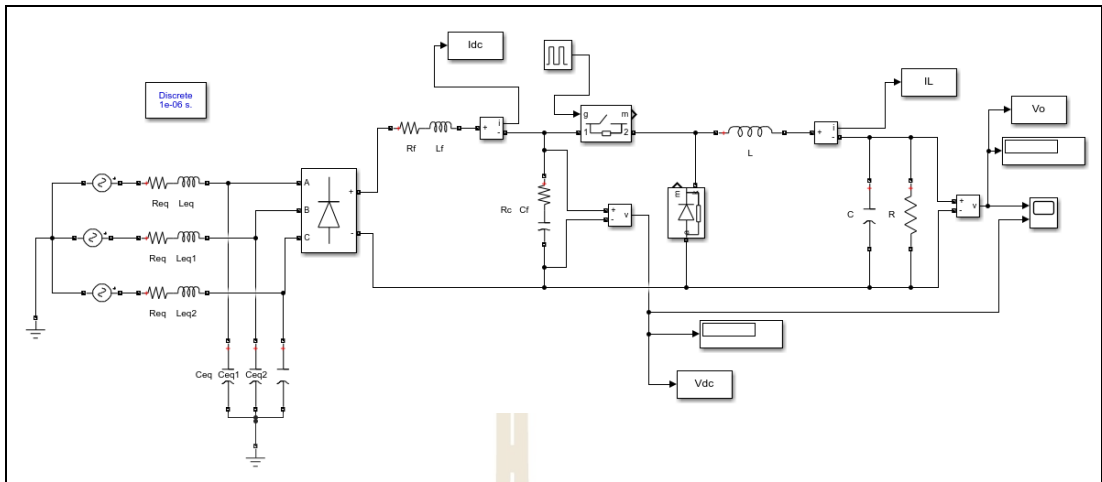




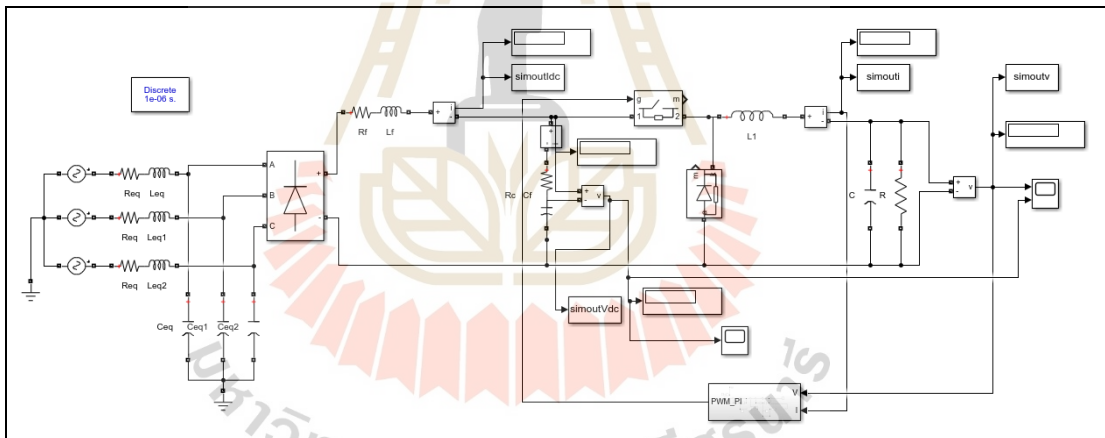
ภาคผนวก ข

บล็อกการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB

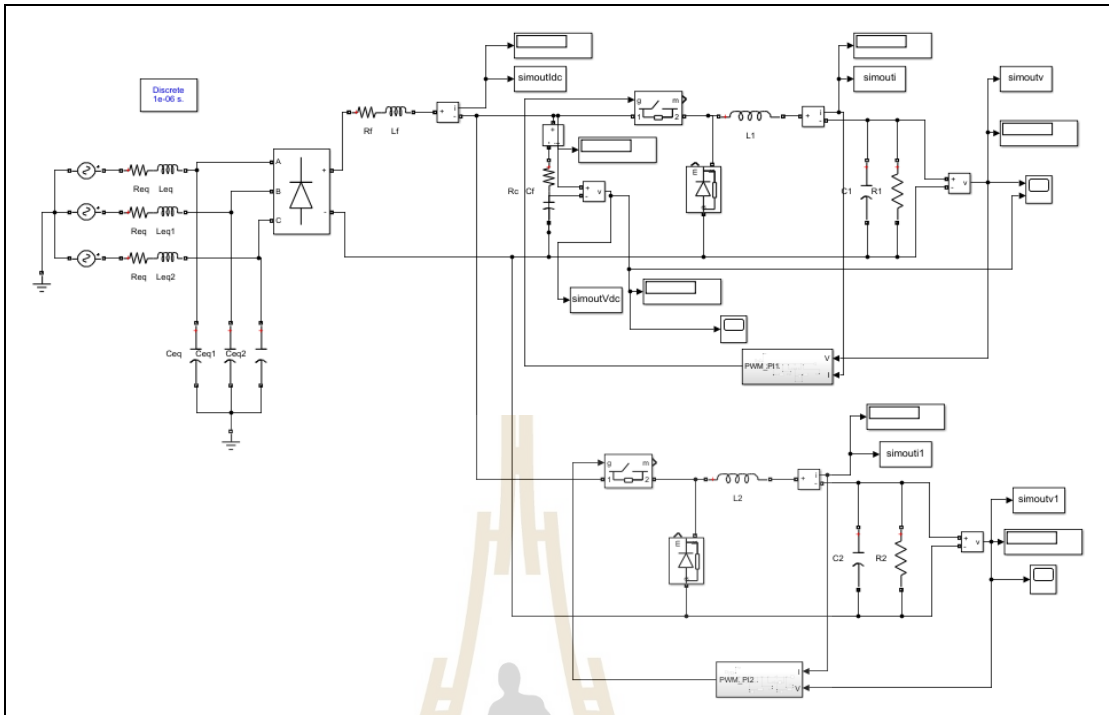
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



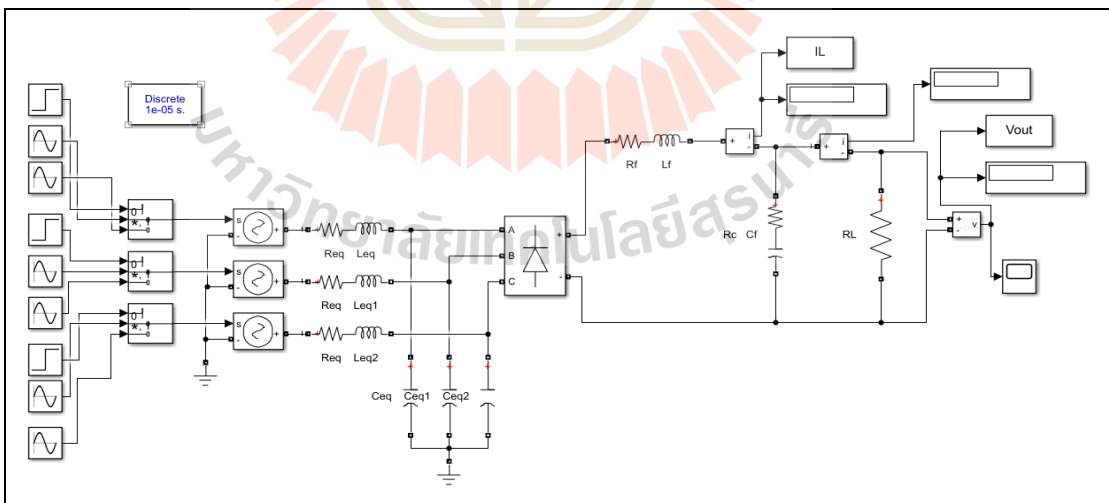
รูปที่ ข.1 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่ไม่มีโหลด
วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีตัวควบคุม



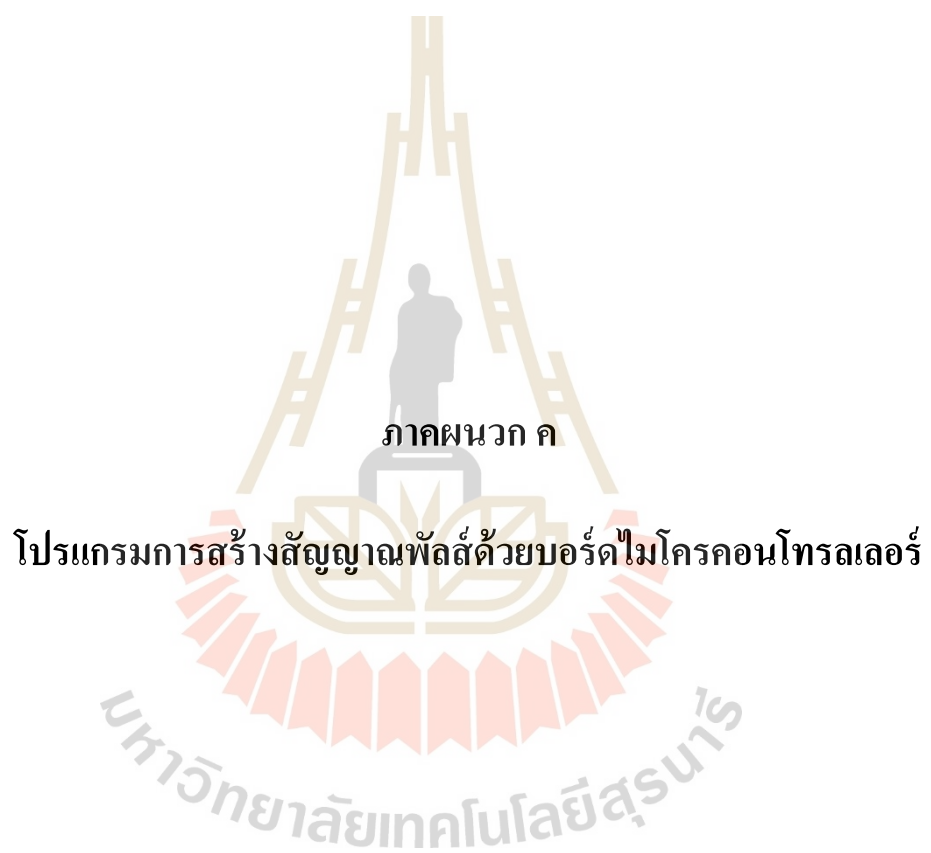
รูปที่ ข.2 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด
วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม



รูปที่ ข.3 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด
วงจรแปลงผันแบบบัคกันขนานกัน



รูปที่ ข.4 บล็อกการจำลองสถานการณ์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน



ภาคผนวก ค

โปรแกรมการสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

*****
ค.1 โปรแกรมการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
*****

#include<avr/io.h>           //นำเข้าไปโลบราลีของอินพุต
int EN = 11;                 //กำหนดพินสำหรับสร้างสัญญาณ PWM
int duty_cycle=0;           //กำหนดวัฏจักรหน้าที่การทำงานเริ่มต้น
void setup()                 // เข้าสู่ฟังก์ชันตั้งค่าของบอร์ดอาดูโน่ [void setup()]
{
  ////////// กำหนดโหมดการสร้างสัญญาณ PWM //////////
  pinMode(EN,OUTPUT);
  TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A1);
  TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B1);
  TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
  TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);
  TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
  ICR1 = 800;
  OCR1A = 0;
  OCR1B = 0;
  TCNT0 = 0;
  OCR1A = duty_cycle*8;
}
void loop()                  //เข้าสู่ฟังก์ชันวนรอบของบอร์ดอาดูโน่ [void
loop()]
{
  duty_cycle = 50;           //กำหนดวัฏจักรหน้าที่การทำงานที่ต้องการ
  OCR1A = duty_cycle*8;
}

```

```

*****
ค.2 โปรแกรมการสร้างสัญญาณควบคุมด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
*****

#include <Keypad.h> //นำเข้าไปไลบรารีของคีย์แพด
#include<avr/io.h> //นำเข้าไปไลบรารีของอินพุต
#include<avr/interrupt.h>
////////// กำหนดค่าตัวเลขของคีย์แพด //////////
const byte ROWS = 4;
const byte COLS = 4;
char keys[ROWS][COLS] = {
  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'}
};
byte rowPins[ROWS] = {31, 33, 35, 37}; //คำสั่งสำหรับติดต่อรหว่างบอร์ดและคีย์แพด
แบบแถว
byte colPins[COLS] = {39, 41, 43, 45}; //คำสั่งสำหรับติดต่อรหว่างบอร์ดและคีย์แพด
แบบหลัก
////////// คำสั่งในการสร้างคีย์แพด //////////
Keypad keypad = Keypad( makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS );
////////// ประกาศตัวแปร //////////
int num[5],count_num,num1,i;
float Vo_buck=0, IL_buck=0, Vo_act, Vo, IL_act, IL, Vo_buck_keep, IL_buck_keep,
Vo_buck_keep_old=0, IL_buck_keep_old=0;
int port_PWM = 11;
int duty_cycle;
float d;
float kpv=0.07, kiv=4.44,kpi=1.535,kii=7211
float Ts_v=0.001,Ts_i=0.0003;

```

```

float err_v, Upv, Uiv, Uiv_1=0, Upi_v;
float err_i, Upi, Uii, Uii_1=0, Upi_i, V=0, Vo1=0, IL1=0;
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h> //นำเข้าไปไลบรารีของจอแสดงผล LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
////////// เข้าสู่ฟังก์ชันตั้งค่าของบอร์ดอาduino [void setup()] //////////
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  //////////// กำหนดการทำงานของจอแสดงผล LCD ////////////
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(1,0);
  lcd.print("Please press Vo");
  lcd.setCursor(1,1);
  lcd.print("Vo=");
  //////////// กำหนดการทำงานของคีย์แพด ////////////
  keypad.addEventListener(keypadEvent);
  count_num=0;
  i=1;
  num[5]=0;
  while(i!=0){ number(); }
  V=num1;
  lcd.clear();
  //////////// กำหนดโหมดการสร้างสัญญาณ PWM ////////////
  pinMode(port_PWM, OUTPUT);
  TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A1);
  TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B1);
  TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
  TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);

```

```

TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
ICR1 = 800; OCR1A = 0; OCR1B = 0; TCNT1=0;
}
void number() {
  keypad.getKey();
}
void keypadEvent(KeypadEvent eKey) {
  switch (keypad.getState()) {
    case PRESSED:
      lcd.setCursor(5+count_num,1);
      if(eKey!='A'){lcd.print(eKey);};
      switch (eKey) {
        case '1':num[count_num]=1;count_num=count_num+1;break;
        case '2':num[count_num]=2;count_num=count_num+1;break;
        case '3':num[count_num]=3;count_num=count_num+1;break;
        case '4':num[count_num]=4;count_num=count_num+1;break;
        case '5':num[count_num]=5;count_num=count_num+1;break;
        case '6':num[count_num]=6;count_num=count_num+1;break;
        case '7':num[count_num]=7;count_num=count_num+1;break;
        case '8':num[count_num]=8;count_num=count_num+1;break;
        case '9':num[count_num]=9;count_num=count_num+1;break;
        case '0':num[count_num]=0;count_num=count_num+1;break;
        case 'A':check_num();return;
      }
    }
}
void keypadEvent_stop(KeypadEvent eKey) {
  switch (keypad.getState()) {
    case PRESSED:
      Serial.print(eKey);

```



```

switch (eKey){
  case 'D':check_num();setup();
}
}
}

void check_num(){
  if(count_num==0){Serial.println("Invalid Number");delay(2000);setup();}
  if(count_num==1){num1=num[0];i=0; return;}
  if(count_num==2){num1=num[0]*10+num[1];i=0; return;}
  if(count_num==3){num1=num[0]*100+num[1]*10+num[2];i=0; return;}
  if(count_num==4){num1=num[0]*1000+num[1]*100+num[2]*10+num[3];i=0; return;}
  if(count_num>4){Serial.println("Invalid Number");delay(2000);setup();}
}

////////// เข้าสู่ฟังก์ชันวนรอบของบอร์ดอาduino [void loop()] //////////
void loop()
{
  test1();
}

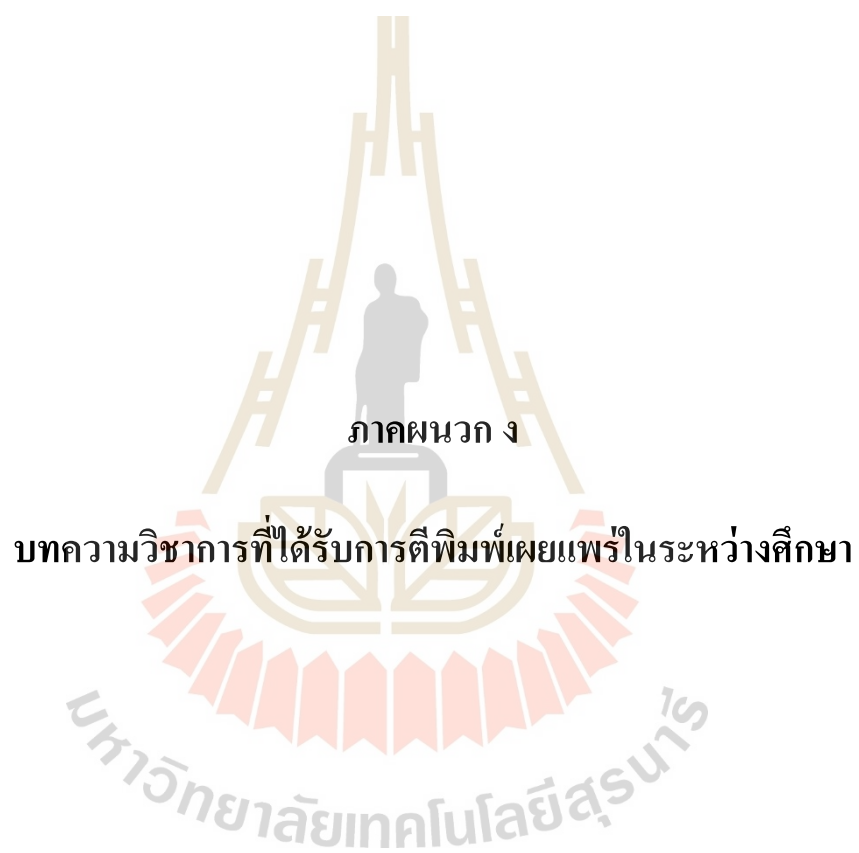
void test1()
{
  while(1)
  {
    //////////// การทำงานของวงจรตรวจจับแรงดัน ////////////
    Vo_buck=analogRead(A0);
    Vo_buck_keep_old=Vo_buck;
    Vo_buck_keep = Vo_buck;
    Vo_act=Vo_buck_keep*5/1023;
    Vo=Vo_act*100+0.5;
    //////////// การทำงานของวงจรตรวจจับกระแส ////////////
    IL_buck=analogRead(A1);

```

```

IL_buck_keep_old=IL_buck;
IL_buck_keep=IL_buck;
IL_act=IL_buck_keep*5/1023;
IL=IL_act*1.3-0.0028;
////////// เข้าสู่การทำงานของรูปแรงดันไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ //////////
err_v=V-Vo;
Upv=kpv*err_v;
Uiv=(kiv*Ts_v*err_v)+Uiv_1;
Upi_v=Upv+Uiv;
if (Upi_v >= 799)
{Upi_v=799;}
else if (Upi_v <=-799)
{Upi_v=-799;}
////////// เข้าสู่การทำงานของรูปกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ //////////
err_i=Upi_v-IL;
Upi=kpi*err_i;
Uii=(kii*Ts_i*err_i)+Uii_1;
Upi_i=Upi+Uii;
if (Upi_i >= 700)
{Upi_i=700;}
else if (Upi_i <=0)
{Upi_i=0;}
////////// ส่งค่าสัญญาณ PWM ไปยังพินที่ 11 //////////
OCR1A = Upi_i;
keypad.addEventListener(keypadEvent_stop);
keypad.getKey();
Uiv_1=Uiv;
Uii_1=Uii;
}
}

```



ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

จุฑาทิพย์ กล้าสงคราม, เทพพนม โสภณเพิ่ม, กองพันธ์ อารีรักษ์. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัลค์ที่มีการควบคุม. การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 11, อุบลราชธานี, 4-7 มิถุนายน 2562, Vol. 1, หน้า 85-89.

จุฑาทิพย์ กล้าสงคราม, เทพพนม โสภณเพิ่ม, กองพันธ์ อารีรักษ์. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานและวงจรแปลงผันแบบบัลค์ขนานกัน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42, นครราชสีมา, 30 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน 2562, Vol. 1, หน้า 133-136.

จุฑาทิพย์ กล้าสงคราม, เทพพนม โสภณเพิ่ม, กองพันธ์ อารีรักษ์. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัลค์ขนานกัน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม - เมษายน 2563 หน้า 86-96.



การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม

Stability Analysis of AC-DC Power System Feeding a Controlled Buck-Converter

จุฑาทิพย์ กล้าสงคราม¹ เทพพนม โสภณเพิ่ม² กองหัน อารีรัมย์³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี E-mail: kongpan@sut.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม ซึ่งโหลดในลักษณะนี้มีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพจะเริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ แล้วนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไป ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพไว้ 2 วิธี คือ การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าจะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูค

คำสำคัญ: โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว, วงจรแปลงผันกำลังแบบบัค, เกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูค

Abstract

This paper propose stability analysis of AC-DC power system feeding a controlled buck-converter that behaving as a constant power load. The stability analysis is started by finding a mathematical model of the system. And then use the mathematical model to be used for further stability analysis. In this paper, two methods of stability analysis are proposed: Eigenvalue's theorem and Middlebrooks criterion

Keywords: constant power load, buck-converter, Middlebrooks criterion.

1. บทนำ

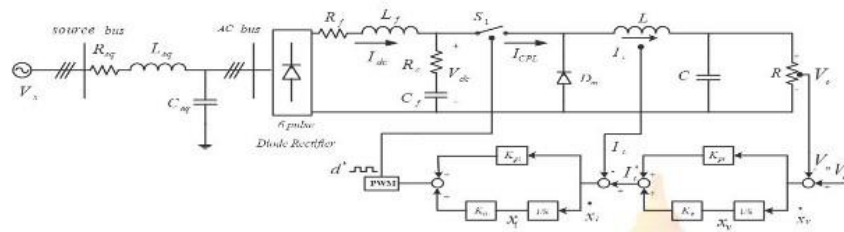
ปัจจุบันโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังโดยส่วนใหญ่จะเป็นวงจรแปลงผันกำลัง เช่น วงจรแปลงผันไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีหรือเป็นดีซีที่มีการควบคุมสัญญาณขาออกให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังมีประสิทธิภาพสูง การดูแลรักษาดี และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย จึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant Power Load: CPL) ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็น

ค่าตัวต้านทานติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม เมื่อนำโหลดชนิดดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษา และการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อสามารถนำไปใช้ในการคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยในบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ 2 วิธี คือ อาศัยทฤษฎีบทค่าจะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูค และมีการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม

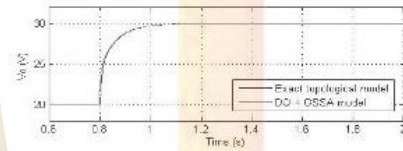
การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังจะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กัเวลา (time varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณืตัวชี้ในวงจรมีแนวโน้มไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเลือกใช้แบบจำลองที่ขึ้นกับเวลาให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา (time-invariant model) ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method: GSSA) และวิธีดีคิว (DQ method) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{V}_{dc} = \frac{R_{dc} I_{dc}}{L_{dc}} + \omega V_{ac,d} - \frac{V_{dc} \cos(\omega t)}{L_{dc}} - \sqrt{\frac{3}{2}} \\ \dot{I}_{dc} = -\frac{R_{dc} I_{dc}}{L_{dc}} + \omega V_{ac,d} - \frac{V_{dc} \sin(\omega t)}{L_{dc}} - \sqrt{\frac{3}{2}} \\ \dot{V}_{ac,d} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} + \omega V_{ac,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{I_g}{C_{dc}} \\ \dot{V}_{ac,q} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} - \omega V_{ac,d} \end{cases} \quad (1)$$



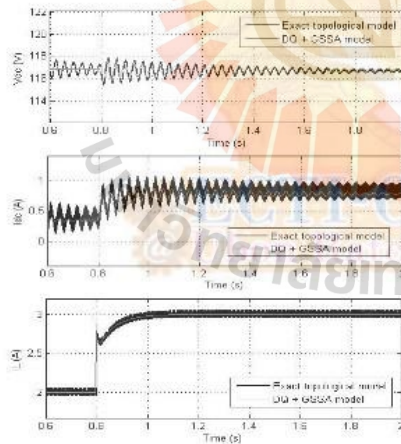
รูปที่ 1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีตัวควบคุม

$$\begin{aligned} \dot{I}_L &= \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3} V_{m,ac} (R_p + R_s + R) I_a}{\pi L_m} \frac{V_o}{L_f} \frac{R K_p I_a'}{L_f} \frac{I_a R K_p K_p V_o'}{L_f} \\ &\quad + \frac{R I_a K_p K_p V_o'}{L_f} + \frac{R I_a K_p K_p X_o'}{L_f} + \frac{R I_a K_p X_o'}{L_f} \quad (2) \\ \dot{V}_a &= \frac{I_a}{C_f} \frac{K_p I_a'}{C_f} + \frac{K_p K_p I_a V_o'}{C_f} + \frac{K_p K_p I_a X_o'}{C_f} + \frac{K_p I_a X_o'}{C_f} \\ \dot{I}_1 &= \frac{V_o}{L} \frac{V_o K_p I_a'}{L} + \frac{K_p K_p V_o V_o'}{L} + \frac{K_p K_p V_o X_o'}{L} + \frac{K_p V_o X_o'}{L} \\ \dot{V}_c &= \frac{I_a}{C} \frac{V_o}{RC} \\ \dot{X}_1 &= -V_o + V_o' \\ \dot{X}_2 &= -I_L - K_p V_o + K_p V_o' + K_p X_o \end{aligned}$$



รูปที่ 2 ผลการตอบสนอง V_o , I_a , I_L และ V_c ของระบบที่ใส่ในรูปที่ 1 ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_o'

จากสมการที่ (1) และ (2) สามารถนำไปตรวจสอบความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับชุดลิกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะได้ผลการตอบสนองดังรูปที่ 2 ดังนี้



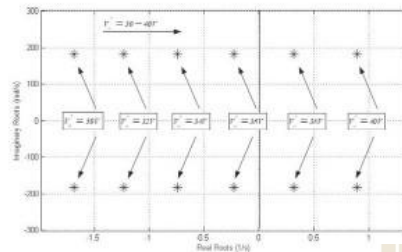
จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามรูปที่ 2 พบว่า แบบจำลองสามารถให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องตรงกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทั้งในส่วนผลการตอบสนองในสภาวะชั่วคราว และในสภาวะคงตัว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถนำไปพัฒนาเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไปได้

3. วิเคราะห์เสถียรภาพ

3.1 วิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเฉพาะ

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเฉพาะเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่แบบพื้นฐานที่ใช้สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้นไม่เปลี่ยนตามเวลา โดยมีเงื่อนไขคือค่าเฉพาะของระบบทุกค่าอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอชจะดีอวาระบนนั้นมีเสถียรภาพ ซึ่งขาดสมการการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณา เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยอาศัยทฤษฎีบทเรย์ลีอันดับหนึ่ง ดังนั้นจะนำไปใช้โดยคร่าวๆ เหมือน $\lambda(x, u)$ สำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าเฉพาะ เพื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้การคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB คำคำสั่ง "eig(A)"

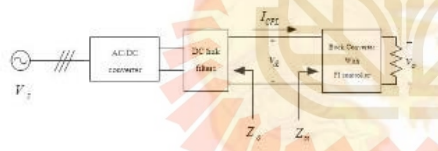
การวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก 30 V จนถึง 40 V เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉพาะของระบบ ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ค่าจะจริงที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากรูปที่ 3 แสดงตำแหน่งค่าจะจริงที่มีส่วนจริงอยู่ใกล้ศูนย์มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบมากกว่าค่าจะจริงที่ตำแหน่งอื่นๆ เมื่อทำการปรับแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตเท่ากับ 30 V, 32 V, 34 V, และ 36 V พบว่าส่วนจริงของค่าจะจริงมีค่าน้อยกว่าศูนย์ หรือยังอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบออส นั่นคือระบบยังคงมีเสถียรภาพ แต่เมื่อทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตเป็น 38 V พบว่าส่วนจริงของค่าจะจริงมีค่ามากกว่าศูนย์ หรือมีตำแหน่งอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบออส ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบขาดเสถียรภาพ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 จะขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตมีค่ามากกว่า 38 V

3.2 วิเคราะห์เสถียรภาพโดยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเติลบุค

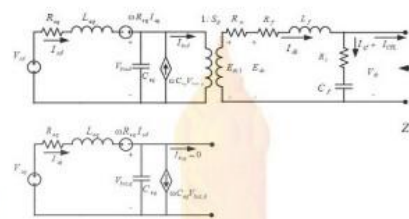


รูปที่ 4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงต้นแบบบักคี่ที่มีตัวควบคุม

หลักการวิเคราะห์เสถียรภาพตามเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเติลบุค ซึ่งจะอาศัยเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ Z_o ของวงจรด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และอินพุตอิมพีแดนซ์ Z_i ของวงจรด้านฝั่งโหลดที่เป็นวงจรแปลงต้นแบบบักคี่ที่มีตัวควบคุม โดยมีเงื่อนไขคือ ถ้าขนาดของ Z_o มีค่ามากกว่าขนาดของ Z_i ที่ความถี่ใดๆ ระบบนั้นจะขาดเสถียรภาพ จากระบบที่พิจารณาจากรูปที่ 4 ประกอบด้วยวงจรทางด้านแหล่งจ่ายที่มีวงจรกรองกำลังไฟฟ้า และวงจรทางฝั่งโหลดคือวงจรแปลงต้นแบบบักคี่ที่มีตัว

ควบคุม ซึ่งในการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์สามารถแยกพิจารณาวงจรออกเป็นทีละฝั่งดังต่อไปนี้

พิจารณาทางด้านแหล่งจ่าย



รูปที่ 5 วงจรที่พิจารณาทางด้านแหล่งจ่าย

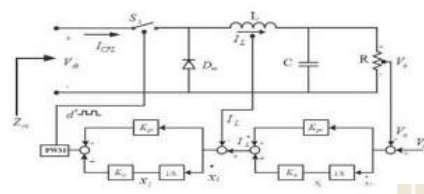
จากรูปที่ 5 เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรจะให้เห็นการตัวแปรสถานะดังสมการที่ (3) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_m = -\frac{R_m}{L_m} I_m + \omega I_m - \frac{1}{L_m} V_{m,d} + \frac{1}{L_m} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_m = -\frac{R_m}{L_m} I_m + \omega I_m - \frac{1}{L_m} V_{m,q} + \frac{1}{L_m} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{m,d} = \frac{1}{C_f} I_m + \omega V_{m,d} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{I_m}{C_f} \\ \dot{V}_{m,q} = \frac{1}{C_f} I_m + \omega V_{m,q} \\ \dot{I}_d = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{V_{m,d}}{L_f} - \frac{(R_f + R_r + R_s)}{L_f} I_d + \frac{R_r}{L_f} I_{cr} - \frac{1}{L_f} V_d \\ \dot{V}_d = \frac{1}{C_f} I_d - \frac{1}{C_f} I_{cr} \end{cases} \quad (3)$$

ซึ่งเอาต์พุตอิมพีแดนซ์จะหาได้จากสมการที่ (4) ดังนี้

$$Z_o = \frac{V_o}{I_{cr}} \quad (4)$$

พิจารณาทางฝั่งจอร์แปลงผันแบบบัคกึ่งที่มีตัวควบคุม



รูปที่ 6 วงจรที่พิจารณาทางฝั่งจอร์แปลงผันแบบบัคกึ่งที่มีตัวควบคุม

สามารถวิเคราะห์หาสมการของระบบในรูปที่ 6 ได้ดังสมการที่ (5) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_L = -\frac{R}{L} I_L - \frac{1}{L} V_o + \frac{d'}{L} V_d \\ \dot{V}_o = -\frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\ \dot{x}_1 = -V_o + V_o' \\ \dot{x}_2 = -I_L + K_p V_o' - K_p V_o + K_p x_1 \end{cases} \quad (5)$$

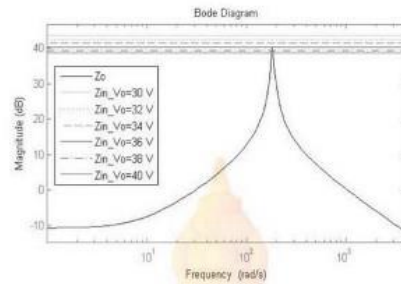
เมื่อ $d' = -K_p I_L - K_p K_p V_o + K_p K_p V_o' + K_p K_p x_1 + K_p x_2$

ซึ่งการหา Z_o ของระบบสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6) คือ

$$Z_o = \frac{V_d}{I_{cs}} \quad (6)$$

สามารถหา Z_o และ Z_o' ด้วยการโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ และนำฟังก์ชันถ่ายโอนของ Z_o และ Z_o' ที่ได้วิเคราะห์มาทั้งหมดไปเขียนแผนภาพโบดเพื่อแสดงขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองในย่านความถี่ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 7

จากรูปที่ 7 พบว่าการปรับเพิ่มตัวแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้สูงขึ้นจะทำให้ขนาดของ Z_o ลดลงในทุกๆ ย่านความถี่ จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 38 V ขนาดของ Z_o จะมากกว่าขนาดของ Z_o' ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบเริ่มมีการขาดเสถียรภาพ ซึ่งผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทก้ำจะจง



รูปที่ 7 แผนภาพโบดของ Z_o และ Z_o'

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1

พารามิเตอร์	ค่า
V_d	50 $V_{rms/phase}$
ω	$2\pi \times 50$ rad/s
R_{sw}	0.1 Ω
L_{sw}	24 μH
C_{in}	2 nF
R_f	0.1 Ω
L_f	30 μH
R_s	0.01 Ω
C_f	1000 μF
$L(\Delta I_o \leq 0.2A)$	15 mH
$C(\Delta V_o \leq 2.8mV)$	1000 μF
R	10 Ω

3. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเอ็มวีที่มีโหลดเป็นวงจรถูกแปลงผันแบบบัคกึ่งที่มีการควบคุม ที่มีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก และในบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ 2 วิธี คือ อาศัยทฤษฎีบทก้ำจะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเลิบรูค จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพพบว่าทั้ง 2 วิธีให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] อภิชาติ สุขะพันธ์ (2558). การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาด
ใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังอินเวอร์ชันที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว.
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา
- [2] R. D. Middlebrook, "Input filter consideration in design and
application of switching regulators," in *Proc. IEEE Ind. Applicat.
Soc. Annu. Meeting*, 1976, pp. 366-382.
- [3] X. Feng, J. Liu, and F. C. Lee, "Impedance specification for stable
DC distributed power system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.
17, no. 2, pp. 157-162, Mar. 2002.
- [4] A. Riccobono, and S. Santi, "Comprehensive review of stability
criteria for DC power distributed system," *IEEE Trans. Ind
Applicat.*, vol. 50, no. 5, pp. 3525-3535, Sep. 2014.


 ECTI-CARD 2019
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดตัวต้านทานและวงจรแปลงผันแบบบักกึ่งขนานกัน

Stability Analysis of AC-DC Power System Feeding a resistor load and buck-converter load parallel

จุฑาทิพย์ ถวัลยธรรม¹ เทพพนม โสพนพันธ์¹ กองพันธ์ อารีรักษ์²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี E-mail: kongpan@sut.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

บทคัดย่อ

โดยปกติวงจรแปลงผันแบบบักกึ่งที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดดังกล่าวจะทำให้เสถียรภาพของระบบลดลง ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจึงเป็นสิ่งสำคัญ ในบทความนี้เกณฑ์ของมิตเติลบรูคถูกนำมาเสนอสำหรับกรวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่เชื่อมต่อกับโหลดวงจรแปลงผันแบบบักกึ่งที่มีการควบคุม และโหลดตัวต้านทาน ซึ่งเกณฑ์นี้มีความยืดหยุ่นสูงเมื่อเทียบกับวิธีการที่รู้จักกัน โดยทั่วไปที่เรียกว่าทฤษฎีบทค่าเจาะจง ผลการจำลองสถานการณ์จะนำมาใช้เพื่อเป็นการยืนยันจุดขาดเสถียรภาพที่คาดเอาไว้จากแบบจำลองที่นำเสนอ ในบทความนี้ร่วมกับเกณฑ์ของมิตเติลบรูค ซึ่งผลที่ได้จากทางทฤษฎี และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องกัน

คำสำคัญ: โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว วงจรแปลงผันแบบบักกึ่ง เกณฑ์เสถียรภาพของมิตเติลบรูค

Abstract

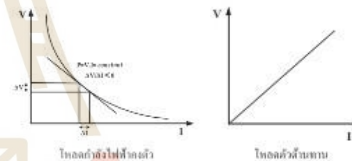
Normally, the controlled buck converter behaves as a constant power load. This load can degrade the system stability. Therefore, the stability analysis is very important. In this paper, Middlebrook's criterion is presented to analyze the stability of AC-DC power systems feeding a controlled buck converter and resistive load. This criteria is very flexible compared with the well-known method called Eigenvalue theorem. The simulation results are used to validate the unstable point predicted from the prepared model with Middlebrook's criterion. Good agreement between theory and simulation can be achieved.

Keywords: Constant power load, Buck-converter, Middlebrook criterion

1. บทนำ

ปัจจุบัน โหลดของระบบไฟฟ้ากำลังโดยส่วนใหญ่จะเป็นวงจรแปลงผันกำลัง เช่น วงจรแปลงผันไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี เอซีเป็นดีซี ที่มีการควบคุมสัญญาณขาออกให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังมีประสิทธิภาพสูง การดูแลรักษาต่ำ และ

สามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย จึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย แคว้งจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant Power Load: CPL) [1] ซึ่งโหลดในลักษณะนี้จะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม เมื่อนำโหลดชนิดดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง [2]-[3] โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของกราฟ V-I ดังรูปที่ 1 ซึ่งโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะให้กำลังเอาต์พุตของวงจรแปลงผันที่คงที่ นั่นคือ เมื่อแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงก็จะทำให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้น จะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันและกระแสมีค่าติดลบ ($dV/di < 0$) ในโหลดความต้านทานจะมีค่าเป็นบวก ($V/I > 0$)

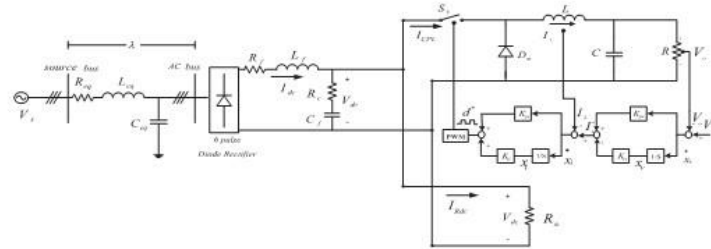


รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และโหลดตัวต้านทาน

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 2 จะเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรเมื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องทำให้แบบจำลองที่ขึ้นกับเวลาให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา (time-invariant model) ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method; GSSA) [4] และวิธีดีคิว (DQ method) [5] ซึ่งแสดงดังสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

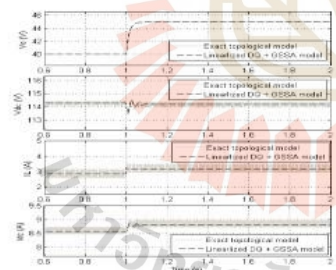
$$\begin{cases} I_{dc} = -\frac{R_{dc} I_{dc}}{L_{dc}} + \omega I_{dc} - \frac{V_{m,dc}}{L_{dc}} + \frac{V_c \cos(\omega t)}{L_{dc}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \\ I_{ac} = -\frac{R_{ac} I_{ac}}{L_{ac}} + \omega I_{ac} - \frac{V_{m,ac}}{L_{ac}} + \frac{V_c \sin(\omega t)}{L_{ac}} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \\ V_{m,dc} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} + \omega V_{m,dc} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{I_c}{C_{dc}} \end{cases} \quad (1)$$



รูปที่ 2 วงจรเครื่องกระแสสลับเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานขนานกับวงจรแปลงหม้อแปลงที่มีกรควบคุม

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= \frac{I_d}{C_d} - \omega V_{Ld} \\
 I_d &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{V_{in}}{L_d} \left(R_s + R_r + R_L \right) L_d \left(\frac{R_s - R_r}{R_s L_d} \right) V_s - \frac{R_r K_d I_d'}{L_d} \\
 &\quad - \frac{I_r R_s K_r V_s}{L_d} + \frac{K_r I_r K_r V_s'}{L_d} + \frac{R_r I_r K_r V_s}{L_d} + \frac{R_r I_r K_r V_s'}{L_d} \\
 V_{in} &= \frac{I_d}{C_d} + \frac{V_{Ld}}{C_d} + \frac{K_r I_r V_s'}{C_d} + \frac{K_r K_r I_r V_s'}{C_d} + \frac{K_r K_r I_r V_s'}{C_d} + \frac{K_r K_r I_r V_s'}{C_d} + \frac{K_r I_r V_s'}{C_d} \\
 I_d &= \frac{V_s}{L} - \frac{V_r K_r I_d'}{L} + \frac{K_r K_r V_r V_s'}{L} + \frac{K_r K_r V_r V_s'}{L} + \frac{K_r K_r V_r V_s'}{L} + \frac{K_r K_r V_r V_s'}{L} \\
 V_s &= \frac{I_d}{C} - \frac{V_r}{RC} \\
 X &= -V_r + V_s' \\
 X &= -I_d - K_r V_r + K_r V_s' + K_r X
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

จากสมการที่ (1) และ (2) สามารถนำไปตรวจสอบความถูกต้องด้วย การเปรียบเทียบกับชุดบล็อกไฟฟ้าที่จำลองบนโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะ ได้ผลการตอบสนองดังรูปที่ 3 ดังนี้

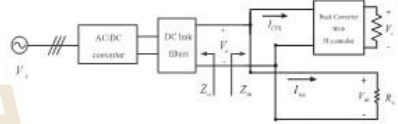


รูปที่ 3 ผลการตอบสนองของ V_L , I_d , I_L และ V_s ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2

จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามรูปที่ 3 พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ที่สุจน์ขึ้นสามารถให้ผลการตอบสนองที่ ถูกต้องตรงกันผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้า ที่จำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทั้งในส่วนผลการตอบสนองในสภาวะ

ชั่วคราว และในสภาวะคงตัว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีความ ถูกต้องสามารถนำไปพัฒนาเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ต่อไป

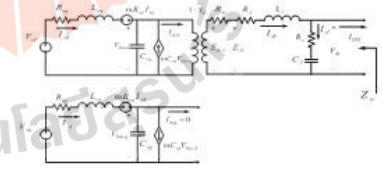
3. การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของมิตเติลบุค



รูปที่ 4 วงจรเครื่องกระแสสลับเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานขนานกับวงจร แปลงหม้อแปลงที่มีกรควบคุม

หลักการวิเคราะห์เสถียรภาพตามเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเติลบุค จะอาศัยเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) ของวงจรถัดด้านแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i) ของวงจรถัดด้านฝั่งโหลดที่เป็นตัวต้านทาน ขนานกับวงจรแปลงหม้อแปลงที่มีกรควบคุม โดยมีเงื่อนไขคือ ถ้า ขนาดของ Z_i มีค่ามากกว่าขนาดของ Z_o ที่ความถี่ใดๆ ระบบนั้นจะขาด เสถียรภาพ [6] จากระบบที่พิจารณาในรูปที่ 4 ประกอบด้วยวงจรถัดด้าน แหล่งจ่ายที่มีวงจรถูกกำลังไฟฟ้า และวงจรถัดด้านฝั่งโหลดคือตัวต้านทาน ขนานกับวงจรแปลงหม้อแปลงที่มีกรควบคุม ซึ่งในการวิเคราะห์หาค่า อิมพีแดนซ์สามารถแยกพิจารณาจากรูปที่ 5 ดังนี้

- พิจารณาทางด้านแหล่งจ่าย



รูปที่ 5 วงจรที่พิจารณาทางด้านแหล่งจ่าย

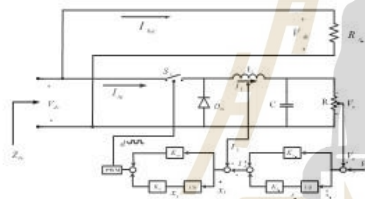
จากรูปที่ 5 เมื่อทำการวิเคราะห์ห้วงจรจะได้รับการตีแปรสถานะดัง สมการที่ (3) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_{m1} = -\frac{R_{m1}}{L_{m1}} I_{m1} + \omega I_{m2} - \frac{1}{L_{m1}} V_{m1} + \frac{1}{L_{m1}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{m2} = -\frac{R_{m2}}{L_{m2}} I_{m2} + \omega I_{m1} - \frac{1}{L_{m2}} V_{m2} + \frac{1}{L_{m2}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{m1} = \frac{1}{C_{m1}} I_{m1} + \omega V_{m1} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{I_b}{C_{m1}} \\ \dot{V}_{m2} = \frac{1}{C_{m2}} I_{m2} + \omega V_{m2} \\ \dot{I}_d = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{V_{m1}d}{L_f} - \frac{(R_p + R_f + R_c)}{L_f} I_d + \frac{R}{L_f} I_{cvt} - \frac{1}{L_f} V_d \\ \dot{V}_d = \frac{1}{C_f} I_d - \frac{1}{C_f} I_{cvt} \end{cases} \quad (3)$$

ซึ่งเอาค่าสุดท้ายที่แกนซ้จะสมารถหาได้จากสมการที่ (4) ดังนี้

$$Z_m = \frac{V_d}{I_{cvt}} \quad (4)$$

- พิจารณาทางฝั่งวงจรแปลงผันแบบบิกที่ที่มีการควบคุม



รูปที่ 6 วงจรที่พิจารณาฝั่งโหลดตัวผันบนวงจรแปลงผันแบบบิกที่มีการควบคุม

สามารถวิเคราะห์หาสมการของระบบในรูปที่ 6 ได้ดังสมการที่ (5) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_L = -\frac{R}{L} I_L - \frac{1}{L} V_L + \frac{d'}{L} V_d \\ \dot{V}_L = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_L \\ \dot{x}_1 = -\gamma_1 x_1 + V_L \\ \dot{x}_2 = -\gamma_2 + K_p V_L - K_i V_L + K_s V_L \end{cases} \quad (5)$$

เมื่อ $d' = -K_p I_L - K_i V_L + K_s V_L + K_r K_p V_L + K_r K_i V_L + K_r K_s V_L$

และเมื่อพิจารณากระแสที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันกำลังแบบบิกจะได้ดังสมการที่ (6) ดังนี้

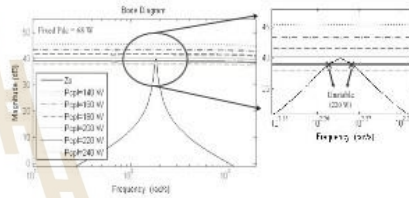
$$\begin{cases} I_m = u(r) I_L \\ \dot{I}_m = -K_m I_L' - K_m K_p V_L + K_m K_i V_L + K_m K_s V_L + K_m K_r V_L + K_m K_r V_L \end{cases} \quad (6)$$

ซึ่งการหา Z_m ของระบบสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7) คือ

$$Z_m = \frac{V_d}{I_m + I_{Rdc}} \quad (7)$$

สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของ Z_m และ Z_m' ด้วยการโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ และนำไปเขียนแผนภาพโพลเพื่อแสดงขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองในย่านความถี่ต่างๆ โดยในการวิเคราะห์จะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกเป็นการพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของไหลวงจรแปลงผันแบบบิก (P_{sp}) และกรณีที่สอง เป็นการพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวผัน (P_b)

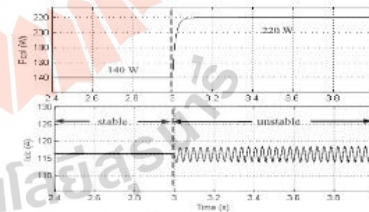
กรณีที่ 1 พิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของไหลวงจรแปลงผันแบบบิก (P_{sp}) จาก 140 – 240 W เมื่อกำหนดให้โหลดตัวผันด้านหน้ามีกำลังไฟที่คงที่เท่ากับ 68 W ได้ผลการพิจารณาดังรูปที่ 6 ดังนี้



รูปที่ 7 แผนภาพโพลของ Z_m และ Z_m' กรณีที่ 1

จากรูปที่ 7 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟของไหลวงจรแปลงผันแบบบิก (P_{sp}) จาก 140 – 240 W พบว่าระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดมีกำลังแค่ 220 W เป็นต้นไป

การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์โดยใช้ชุดบล็อกไฟที่กำลัง ดังรูปที่ 7 ดังนี้



รูปที่ 8 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

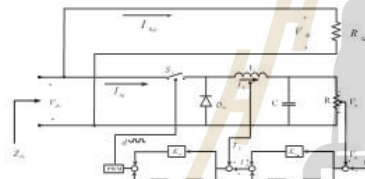
จากรูปที่ 8 พบว่าเมื่อเมื่อ โหลดกำลังไฟที่พ่วงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น 220 W จะทำให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตล้นขีด เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่มากขึ้นหรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถคาดเดาขาดเสถียรภาพได้ถูกต้อง

$$\begin{cases} \dot{I}_{in} = -\frac{R_{in}}{L_{in}} I_{in} + \omega I_{in} - \frac{1}{L_{in}} V_{in} + \frac{1}{L_{in}} \sqrt{\frac{\beta}{2}} V_{in} \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{in} = -\frac{R_{in}}{L_{in}} I_{in} + \omega I_{in} - \frac{1}{L_{in}} V_{in} + \frac{1}{L_{in}} \sqrt{\frac{\beta}{2}} V_{in} \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{in} = \frac{1}{C_{in}} I_{in} + \omega V_{in} - \sqrt{\frac{\beta}{2}} \frac{2\sqrt{\beta}}{\pi} \frac{I_{in}}{C_{in}} \\ \dot{V}_{in} = \frac{1}{C_{in}} I_{in} + \omega V_{in} \\ \dot{I}_L = \frac{\sqrt{\beta}}{2} \frac{2\sqrt{\beta}}{\pi} \frac{V_{in}}{L_{in}} - \frac{(R_{in} + R_f + R_c) I_L}{L_f} + \frac{R_c}{L_f} I_{in} - \frac{1}{L_f} V_{in} \\ \dot{V}_{in} = \frac{1}{C_f} I_{in} - \frac{1}{C_f} I_{out} \end{cases} \quad (3)$$

ซึ่งเอาค่าพหุนามที่แน่นอนซึ่งจะสามารถหาได้จากสมการที่ (4) ดังนี้

$$Z_n = \frac{V_n}{I_{out}} \quad (4)$$

- พิจารณาทางฝั่งวงจรแปลงผันแบบบักที่ที่มีการควบคุม



รูปที่ 6 วงจรที่พิจารณาหาระบบโพลดีกรีหนึ่งบนวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม

สามารถวิเคราะห์หาสมการของระบบในรูปที่ 6 ได้ดังสมการที่ (5) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_L = -\frac{R_f}{L} I_L - \frac{1}{L} V_L + \frac{d'}{L} V_{in} \\ \dot{V}_L = -\frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_L \\ \dot{x}_1 = -\gamma_1 x_1 + V_L \\ \dot{x}_2 = -\gamma_2 x_2 + K_p V_L - K_i I_L + K_f I_L \end{cases} \quad (5)$$

เมื่อ $d' = -K_p I_L - K_p K_p V_L + K_p K_p V_{in} + K_p K_p x_1 + K_p x_1$

และเมื่อพิจารณากระแสที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันกำลังแบบบักจะได้ดังสมการที่ (6) ดังนี้

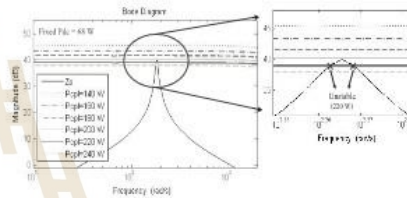
$$\begin{cases} I_{in} = d(t) I_L \\ I_{out} = -K_p I_L - K_p K_p V_L + K_p K_p V_{in} + K_p K_p x_1 + K_p x_1 \end{cases} \quad (6)$$

ซึ่งการหา Z_{in} ของระบบสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7) คือ

$$Z_{in} = \frac{V_n}{I_{in} + I_{Rdc}} \quad (7)$$

สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของ Z_n และ Z_{in} ด้วยการโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ และนำไปเขียนแผนภาพโพลเพื่อแสดงขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองในย่านความถี่ต่างๆ โดยในกรณีวิเคราะห์จะแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกเป็นการพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของไหลวงจรแปลงผันแบบบัก (P_{in}) และกรณีที่สองเป็นการพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงโหลดตัวต้านทาน (P_{in})

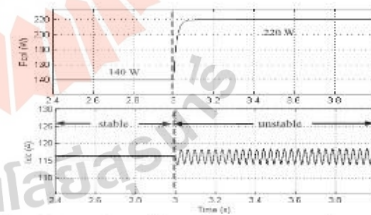
กรณีที่ 1 พิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของไหลวงจรแปลงผันแบบบัก (P_{in}) จาก 140 – 240 W เมื่อกำหนดให้โพลดีกรีหนึ่งมีค่ากำลังไฟเท่ากับ 68 W ได้ผลการพิจารณาดังรูปที่ 6 ดังนี้



รูปที่ 7 แผนภาพโพลของ Z_n และ Z_{in} กรณีที่ 1

จากรูปที่ 7 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟของไหลวงจรแปลงผันแบบบัก (P_{in}) จาก 140 – 240 W พบว่าระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโพลมีค่าตั้งแต่ 220 W เป็นต้นไป

การขึ้นอันตรกิริยาระหว่างเสถียรภาพของระบบจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้กำลัง ดังรูปที่ 7 ดังนี้



รูปที่ 8 การขึ้นอันตรกิริยาระหว่างเสถียรภาพตัวกรองสถานะการผันบนคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 8 พบว่าเมื่อเมื่อโพลค่ากำลังไฟที่คงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น 220 W จะทำให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตผิดเพี้ยน เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่มากขึ้นหรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถคาดเดาขาดเสถียรภาพได้ถูกต้อง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น
วงจรแปลงผันแบบบักซ์ขนานกัน
Stability Analysis of AC-DC Power System Feeding
Paralleled Buck-Converter

จuthatip Klasongram¹ Theppanom Sopapirm² Kongpan Areerak^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Juthatip Klasongram¹ Theppanom Sopapirm² Kongpan Areerak^{1*}

¹School of electrical engineering, Suranaree university of technology

111 University Avenue Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

²Department of electrical power engineering, Mahanakhon university of technology

140 Cheumsampan Rd, Nongchok, Bangkok, Thailand, 10530

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

(Received: August 29, 2020; Accepted: April 03, 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่เชื่อมต่อกับโหลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ที่มีการควบคุมขนานกัน โดยปกติแล้ววงจรแปลงผันแบบบักซ์ที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจึงมีความจำเป็นอย่างมาก ในบทความนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอจะถูกใช้ร่วมกับเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูค ในการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบ มีการตรวจสอบความถูกต้องโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเฉพาะ และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลที่ได้จากทางทฤษฎี และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องกัน

คำสำคัญ: วงจรแปลงผันแบบบักซ์ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การวิเคราะห์เสถียรภาพ

ABSTRACT

This paper proposes stability analysis of AC-DC power system feeding paralleled controlled buck-converter. Normally, a controlled buck-converter behaves as a constant power load, that can affect the stability of system. Therefore, stability analysis is very important. In this paper, the proposed mathematical model is used with the Middlebrook's criterion to predict the unstable point. The results are validated by the well-known Eigenvalue's theorem and the simulation. Good agreement between the theory and simulation is achieved.

Keyword: Buck-converter, constant power load, stability analysis.

1. บทนำ

ปัจจุบันโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังโดยส่วนใหญ่จะเป็นวงจรแปลงผันกำลัง เช่น วงจรแปลงผันไฟฟ้าตีซีเป็นตีซี เอชซีเป็นตีซี ที่มีการควบคุมสัญญาณขาออกให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังมีประสิทธิภาพสูง การดูแลรักษาต่ำ และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย จึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant Power Load: CPL) [1] ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม เมื่อนำโหลดชนิดดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ [2]-[3] จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาและการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อสามารถนำไปใช้ในการคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยในบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ 2 วิธี คือ อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง [4] และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรुक [5] และมีการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

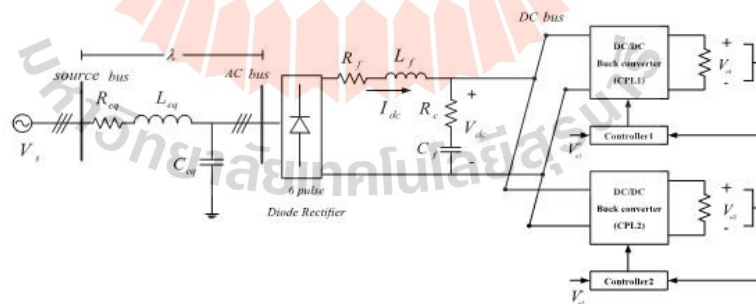
บทความนี้ประกอบด้วยระบบไฟฟ้าที่พิจารณาใน ส่วนที่ 2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในส่วนที่ 3 และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในส่วนที่ 4 ซึ่งจะนำเสนออยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรुक และในที่สุดท้ายเป็นการสรุปผลของบทความ

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

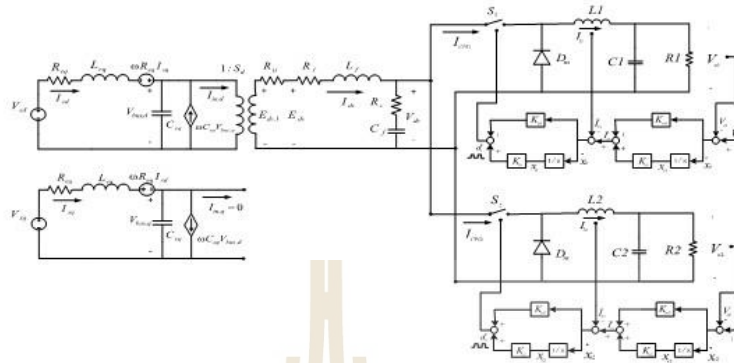
ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลที่จ่ายกำลังผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ที่บัส AC ถูกต่ออยู่กับโหลดที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์แปลงไฟกระแสสลับมาเป็นกระแสตรงที่บัสตีซี (DC bus) ผ่านวงจรกรองสัญญาณที่บัสตีซี ที่มีโหลดมาต่ออยู่ 2 โหลดด้วยกันคือ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์คที่มีการควบคุมแรงดันทางฝั่งสัญญาณขาออกให้คงที่ 2 ตัว แสดงได้ดังรูปที่ 1

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ

เนื่องจากระบบไฟฟ้าพิจารณามีการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันและวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีการทำงานตามฟังก์ชันของเวลา ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจึงเป็นแบบจำลองที่ขึ้นกับเวลา (time varying model) การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยแบบจำลองดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดความยุ่งยาก



รูปที่ 1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์คที่มีการควบคุมขนานกัน



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว

และซับซ้อน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยวิธีการแปลงดีคิว (DQ method) [4] ในส่วนของระบบไฟฟ้าสามเฟสร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method : GSSA) [6]-[7] ในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี ซึ่งจะได้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว ดังรูปที่ 2 วิธีดังกล่าวจะทำให้ได้แบบจำลองไม่ขึ้นกับเวลา (time-invariant model)

จากรูปที่ 2 พิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์รวมทั้งสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่ทางฝั่งเอซี จะถูกเปลี่ยนให้อยู่บนแกนหมุนดีคิว โดยไดโอดเรียงกระแสสามเฟสได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา สำหรับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้สำหรับการกำจัดสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัททิงสองชุด โดยแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 2 สามารถวิเคราะห์ด้วยกฎแรงดัน และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้แบบจำลองของระบบในรูปที่ 1 แสดงได้ดังสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_{d1} = -\frac{R_m I_{d1}}{L_m} + \omega I_m \frac{V_{m1}}{L_m} + \frac{V_m \cos(\omega t)}{L_m} \sqrt{\frac{3}{2}} \\ \dot{I}_{d2} = -\frac{R_s I_{d2}}{L_s} + \omega I_m \frac{V_{m2}}{L_s} + \frac{V_m \sin(\omega t)}{L_s} \sqrt{\frac{3}{2}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_{m1} = \frac{I_{d1}}{C_1} - \omega K_{m1} \\ \dot{V}_{m2} = \frac{I_{d2}}{C_2} - \omega K_{m2} \\ \dot{I}_{d1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{2} V_{m1}}{\pi L_{m1}} \left(\frac{R_p + R_s}{L_p} I_{d1} + \frac{R_s K_{m1} I_{d2}}{L_p L_s} + \frac{I_m R_s K_{m1} V_{m2}}{L_p L_s} \right) \\ + \frac{R_p I_{d1} K_{m1} V_{m2}}{L_p L_s} + \frac{R_s I_{d1} K_{m2} V_{m1}}{L_p L_s} + \frac{R_s I_{d1} K_{m2} V_{m2}}{L_p L_s} \\ + \frac{I_m R_s K_{m1} V_{m2}}{L_p L_s} + \frac{R_s I_{d1} K_{m1} V_{m1}}{L_p L_s} + \frac{R_s I_{d1} K_{m2} V_{m1}}{L_p L_s} + \frac{R_s I_{d1} K_{m2} V_{m2}}{L_p L_s} \\ \dot{V}_{m2} = \frac{I_{d2}}{C_2} - \frac{K_{m2} I_{d1}}{C_2} + \frac{K_{m2} I_{d2}}{C_2} + \frac{K_{m2} I_{d1} V_{m1}}{C_2} + \frac{K_{m2} I_{d2} V_{m1}}{C_2} \\ + \frac{K_{m2} I_{d1} V_{m2}}{C_2} + \frac{K_{m2} I_{d2} V_{m2}}{C_2} \\ \dot{V}_{c1} = \frac{I_{d1}}{C_1} - \frac{V_{c1}}{R C_1} \\ \dot{V}_{c2} = -\dot{V}_{c1} + \dot{V}_{m1} \\ \dot{V}_{c1} = -\dot{V}_{c2} - K_{m1} V_{c2} + K_{m1} V_{m1} + K_{m1} V_{m2} \\ \dot{I}_{d1} = \frac{V_{c1}}{L_1} - \frac{V_m K_{m1} I_{d2}}{L_1} - \frac{K_{m1} K_{m2} V_{m1} V_{m2}}{L_1} + \frac{K_{m1} K_{m2} V_{m1} V_{c2}}{L_1} \\ \dot{V}_{c2} = \frac{V_{c2}}{C_2} - \frac{V_{c2}}{R C_2} \\ \dot{V}_{c2} = -\dot{V}_{c1} + \dot{V}_{m2} \\ \dot{V}_{c2} = -\dot{V}_{c1} - K_{m2} V_{c1} + K_{m2} V_{m1} + K_{m2} V_{m2} \end{cases} \quad (2)$$

สมการที่ (1) และ (2) เป็นแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพจำเป็นต้องทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทเลอร์อันดับหนึ่ง จากสมการที่ (1) และ (2) เมื่อผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นแล้ว เขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองตัวแปรสถานะได้ตั้งสมการที่ (3) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{\delta x} = A(x_s, u_s)\delta x + B(x_s, u_s)\delta u \\ \delta y = C(x_s, u_s)\delta x + D(x_s, u_s)\delta u \end{cases} \quad (3) \quad B(x_s, u_s) =$$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\cos(\lambda)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sin(\lambda)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_{p1} K_{p1} J_{11z}}{L_1} & \frac{R_{p2} K_{p2} J_{11z}}{L_2} \\ 0 & \frac{K_{p1} K_{p1} J_{11z}}{C_1} & \frac{K_{p2} K_{p2} J_{11z}}{C_2} \\ 0 & \frac{K_{p1} K_{p1} J_{11z}}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & K_{p1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{p2} K_{p2} J_{11z}}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & K_{p2} \end{bmatrix}$$

เมื่อ

$$\delta x = \begin{bmatrix} \delta I_{sd} & \delta I_{sq} & \delta v_{sd} & \delta v_{sq} & \delta I_{d1} & \delta I_{q1} \\ \delta v_{sd} & \delta x_{s1} & \delta x_{s2} & \delta I_{d2} & \delta v_{sq} & \delta x_{s2} & \delta x_{s1} \end{bmatrix}$$

$$\delta u = \begin{bmatrix} \delta v_s & \delta v_{s1} & \delta v_{s2} \end{bmatrix}$$

$$\delta y = \begin{bmatrix} \delta v_{s1} & \delta v_{s2} \end{bmatrix}$$

รายละเอียดของเมทริกซ์ A B C และ D สามารถแสดงได้ดังนี้

$$C(x_s, u_s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A(x_s, u_s) = \begin{bmatrix} \frac{R}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & \frac{R}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & \omega & \frac{\sqrt{3}\sqrt{J}}{\sqrt{2}C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_1} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}\sqrt{J}}{\sqrt{2}C_1} & 0 & \frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + R)}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & \omega(5.71) & \frac{\lambda_1 K_{p1} K_{p1} J_{11z}}{L_1} & \frac{\lambda_2 K_{p2} K_{p2} J_{11z}}{L_2} & \frac{\lambda_1 K_{p1} J_{11z}}{L_1} & \omega(5.11) & \frac{R_{p1} K_{p1} J_{11z}}{L_1} & \frac{R_{p2} K_{p2} J_{11z}}{L_2} & \frac{R_{p1} K_{p1} J_{11z}}{L_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 & \omega(6.71) & \frac{K_{p1} K_{p1} J_{11z}}{C_1} & \frac{K_{p2} K_{p2} J_{11z}}{C_2} & \frac{K_{p1} J_{11z}}{C_1} & \omega(6.11) & \frac{K_{p1} K_{p1} J_{11z}}{L_1} & \frac{K_{p2} K_{p2} J_{11z}}{L_2} & \frac{K_{p1} J_{11z}}{L_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega(7.6) & \frac{K_{p1} J_{11z}}{L_1} & \frac{K_{p2} J_{11z}}{L_2} & \frac{K_{p1} J_{11z}}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1} & \frac{1}{C_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{p1} J_{11z}}{L_1} & \frac{K_{p2} K_{p2} J_{11z}}{L_2} & \frac{K_{p1} K_{p1} J_{11z}}{L_1} & \frac{K_{p2} J_{11z}}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_1} & -\frac{1}{C_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{p1} & -K_{p2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$D(x, u) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$a(5.7) = \frac{2R_{m1}I_{m1} + R_{m2}K_{m1}V_{m1} + R_{m3}K_{m2}X_{m1} + R_{m4}X_{m1} + R_{m5}K_{m1}V_{m1}}{L_1}$$

$$a(5.11) = \frac{2R_{m1}I_{m1} + R_{m2}K_{m1}V_{m1} + R_{m3}K_{m2}X_{m1} + R_{m4}X_{m1} + R_{m5}K_{m1}V_{m1}}{L_1}$$

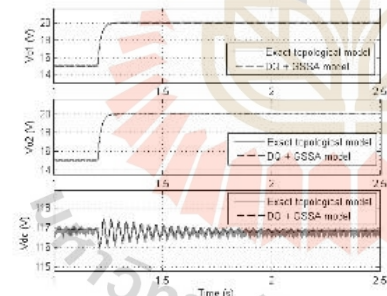
$$a(6.7) = \frac{2K_{m1}I_{m1} + K_{m2}K_{m1}V_{m1} + K_{m3}K_{m2}X_{m1} + K_{m4}X_{m1} + K_{m5}K_{m1}V_{m1}}{C_1}$$

$$a(6.11) = \frac{2K_{m1}I_{m1} + K_{m2}K_{m1}V_{m1} + K_{m3}K_{m2}X_{m1} + K_{m4}X_{m1} + K_{m5}K_{m1}V_{m1}}{C_1}$$

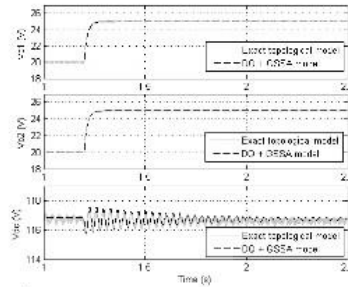
$$a(7.6) = \frac{K_{m1}I_{m1} + K_{m2}K_{m1}V_{m1} + K_{m3}K_{m2}X_{m1} + K_{m4}X_{m1} + K_{m5}K_{m1}V_{m1}}{L_1}$$

$$a(11.6) = \frac{K_{m1}I_{m1} + K_{m2}K_{m1}V_{m1} + K_{m3}K_{m2}X_{m1} + K_{m4}X_{m1} + K_{m5}K_{m1}V_{m1}}{L_1}$$

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ของสัญญาณขนาดเล็บบนช่วงตัว เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 1 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB จะได้ผลการตอบสนองดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 ผลการตอบสนอง V_{c1} , V_{c2} และ V_{dc} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน V_{c1} และ V_{c2} จาก 15 V ไปเป็น 20 V



รูปที่ 4 ผลการตอบสนอง V_{c1} , V_{c2} และ V_{dc} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน V_{c1} และ V_{c2} จาก 20 V ไปเป็น 25 V

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1

พารามิเตอร์	ค่า
V_c	50 $V_{rms/phase}$
ω	$2\pi \times 50$ rad/s
R_{m1}	0.1 Ω
L_{m1}	24 μH
C_{m1}	2 nF
R_{m2}	0.1 Ω
L_{m2}	30 μH
R_{m3}	0.01 Ω
C_{m2}	1000 μF
$L_1 = L_2 (\Delta V_c \leq 0.2A)$	15 mH
$C_1 = C_2 (\Delta V_c \leq 2.8mV)$	1000 μF
$R_1 = R_2$	15 Ω

รูปที่ 3 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) แรงดันเอาต์พุตของโวลต์จอร์แปลงผันแบบบักซ์ชุดที่หนึ่ง (V_{c1}) และแรงดันเอาต์พุตของโวลต์จอร์แปลงผันแบบบักซ์ชุดที่สอง (V_{c2}) โดยมีการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดของจอร์แปลงผันแบบบักซ์ชุดที่ 1 (V_{c1}) และแรงดันเอาต์พุตของโวลต์จอร์แปลงผัน

แบบบัพที่ชุดที่ 2 (V_{o2}) จาก 15 V ไปเป็น 20 V ที่เวลา 1.2 วินาที และรูปที่ 4 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_c) แรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัพที่ชุดที่หนึ่ง (V_{o1}) และแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัพที่ชุดที่สอง (V_{o2}) โดยมีการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดของวงจรแปลงผันแบบบัพที่ชุดที่ 1 (V_{o1}) และแรงดันเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัพที่ชุดที่ 2 (V_{o2}) จาก 20 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 1.2 วินาที จากผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณ พบว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะคงตัว ดังนั้นการพิสูจน์แบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโพลเป็นวงจรถ่วงผันแบบบัพที่ขนานกัน ด้วยวิธีคิดและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ถือเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้

4. การวิเคราะห์เสถียรภาพ

4.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบพื้นฐานที่ใช้สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยมีเงื่อนไขคือถ้าค่าเจาะจงของระบบทุกค่าอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบแอสจะถือว่าระบบนั้นมีเสถียรภาพ [9]-[11] ในการวิเคราะห์จะใช้เมทริกซ์ A ที่ได้จากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3) การหาค่าเจาะจงสามารถหาได้จากสมการที่ (4) โดยใช้การคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่านคำสั่ง "eig(A)"

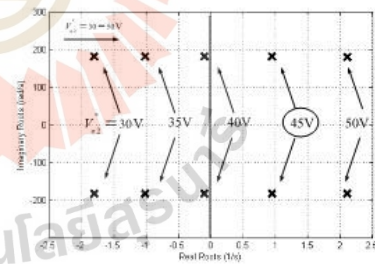
$$\det[A - \lambda I] = 0 \tag{4}$$

จากนั้นจะทำการตรวจสอบค่าเจาะจงของระบบ ถ้าค่าเจาะจงเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ (5) จะถือว่าระบบมีเสถียรภาพ [9]

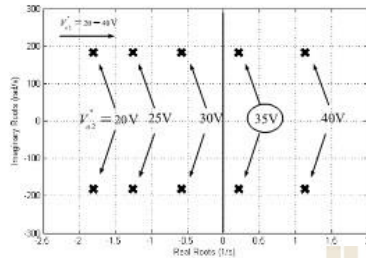
$$\text{real } \lambda_i < 0 \tag{5}$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ และ n คือ จำนวนตัวแปรสถานะของระบบ

การพิจารณาเสถียรภาพ จะพิจารณาหาค่าเจาะจงจากแบบจำลองในสมการที่ (3) โดยปรับเปลี่ยนค่าจุดการทำงาน ซึ่งในที่นี้คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัพ จะได้ค่าเจาะจงเด่น (dominant eigenvalues) เมื่อทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัพที่ชุดที่สอง (V_{o2}) จาก 30 V จนถึง 50 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัพที่ชุดที่หนึ่ง (V_{o1}) เท่ากับ 20 V แสดงได้ดังรูปที่ 5 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัพที่ชุดที่สอง (V_{o2}) จาก 20 V จนถึง 40 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัพที่ชุดที่หนึ่ง (V_{o1}) เท่ากับ 30 V แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 5 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ เมื่อมีการคงค่า V_{o1} เท่ากับ 30 V

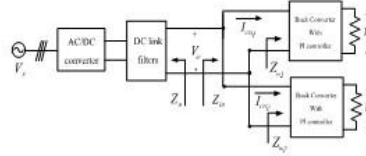


รูปที่ 6 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพ
เมื่อมีการตั้งค่า V_{ref} เท่ากับ 20 V

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งชุดที่สองเท่ากับ 45 V ส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่ามากกว่าศูนย์หรือมีตำแหน่งอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอส ดังนั้นที่จุดปฏิบัติการนี้ระบบขาดเสถียรภาพ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณายขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งชุดที่สองมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 45 V เป็นต้นไป และจากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณายขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งชุดที่สองมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 35 V เป็นต้นไป

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก

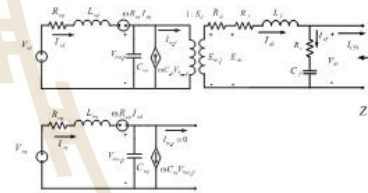
หลักการวิเคราะห์เสถียรภาพตามเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูกจะอาศัยเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) ของวงจรตัวนำแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_{in}) ของวงจรด้านฝั่งโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่มีการควบคุมขนานกัน ดังรูปที่ 7 โดยมีเงื่อนไขคือ ถ้าขนาดของ Z_o มีค่ามากกว่าขนาดของ Z_{in} ที่ความถี่ใดๆ ระบบนั้นจะขาดเสถียรภาพ



รูปที่ 7 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหนด
วงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่มีการควบคุมขนานกัน

จากระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 7 ประกอบด้วยวงจรถ่ายทางด้านแหล่งจ่ายที่มีวงจรรองกำลังไฟฟ้า และวงจรถ่ายฝั่งโหลดคือวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่มีตัวควบคุมขนานกัน ซึ่งในการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์สามารถแยกพิจารณา วงจรออกเป็นทีละฝั่งดังต่อไปนี้

- พิจารณาทางฝั่งแหล่งจ่าย



รูปที่ 8 วงจรที่พิจารณาทงฝั่งแหล่งจ่าย

จากรูปที่ 8 เมื่อทำการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยกฎแรงดันและกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการตัวแปรสถานะ ดังสมการที่ (6) และ (7) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_{Ls} = -\frac{R}{L_s} I_{Ls} + \omega I_{Cs} - \frac{1}{L_s} V_{o1} + \frac{1}{L_s} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{Cs} = -\frac{R}{L_s} I_{Cs} + \omega I_{Ls} - \frac{1}{L_s} V_{o2} + \frac{1}{L_s} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{Cs} = \frac{1}{C_s} I_{Cs} + \omega I_{Ls} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{I_L}{C_s} \\ \dot{V}_{m2} = \frac{1}{C_m} I_{m2} + \omega V_{m2} \end{cases} \quad (6)$$

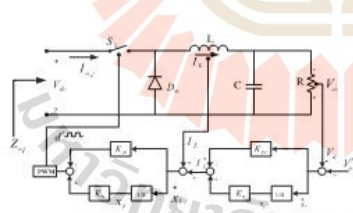
$$\begin{cases} \dot{I}_{sk} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{V_{m,d}}{L_{eq}} \frac{(R_{\mu} + R_f + R_c) I_{sk}}{L_f} \\ \quad + \frac{R}{L_f} I_{cpl} - \frac{1}{L_f} V_{sk} \\ \dot{V}_{sk} = \frac{1}{C_f} I_{sk} - \frac{1}{C_f} I_{cpl} \end{cases} \quad (7)$$

เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปที่ 8 สามารถหาได้จากสมการที่ (8) ดังนี้

$$Z_o = \frac{V_{sk}}{I_{cpl}} \quad (8)$$

- พิจารณาทางฝั่งโหลดวงจรแปลงผันแบบบักคัทที่มี การควบคุมขนาดกัน

การหาอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_m) ของวงจรทางฝั่งโหลด ที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบักคัทขนาดกัน ทำได้โดยการ ขนาดกันระหว่างอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผัน แบบบักคัทตัวที่หนึ่ง ($Z_{m,1}$) และอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจร แปลงผันแบบบักคัทตัวที่สอง ($Z_{m,2}$) นั่นคือ $Z_{m,1} // Z_{m,2}$ ก็จะได้อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_m) ของระบบที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบักคัทขนาดกัน [8] ดังสมการที่ (9) พิจารณาที่โหลดวงจรแปลงผันแบบบักคัทตัวที่หนึ่งได้ดังรูป ที่ 9 ดังนี้



รูปที่ 9 วงจรที่พิจารณาทางด้านโหลดวงจรแปลงผัน แบบบักคัทที่มีตัวควบคุมตัวที่หนึ่ง

$$Z_m = Z_{m,1} // Z_{m,2} \quad (9)$$

จากรูปที่ 9 เมื่อการวิเคราะห์วงจรด้วยกฎแรงดัน และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้สมการตัวแปรสถานะ ดังสมการที่ (10) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_L = -\frac{R}{L} I_L - \frac{1}{L} V_o + \frac{d'}{L} V_{sk} \\ \dot{V}_o = -\frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\ \dot{x}_c = -V_o + V_o^* \\ \dot{x}_s = -I_L + K_{ps} V_o^* - K_{ps} V_o + K_{ps} x_c \end{cases} \quad (10)$$

เมื่อ $d' = -K_{ps} I_L - K_{ps} K_{ps} V_o + K_{ps} K_{ps} V_o^* + K_{ps} K_{ps} x_c + K_{ps} x_s$

พิจารณากระแสที่ไหลเข้าวงจรแปลงผันแบบบักคัทตัว ที่หนึ่งจะได้ดังสมการที่ (11) ดังนี้

$$\begin{cases} I_{s,1} = u(t) I_L \\ I_{m,1} = -K_{ps} I_L^* - K_{ps} K_{ps} V_o + K_{ps} K_{ps} V_o^* I_L \\ \quad + K_{ps} K_{ps} x_c I_L + K_{ps} x_s I_L \end{cases} \quad (11)$$

เมื่อ $u(t) = d'$

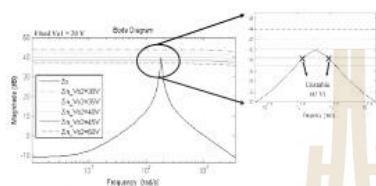
อินพุตอิมพีแดนซ์ของระบบในรูปที่ 9 สามารถหาได้ จากสมการที่ (12) ดังนี้

$$Z_{m,1} = \frac{V_{sk}}{I_{m,1}} \quad (12)$$

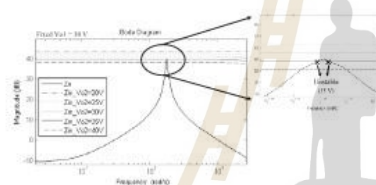
สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_m) และอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) ด้วยการโปรแกรมบน คอมพิวเตอร์ และนำไปเขียนแผนภาพโพลเดเพื่อแสดง ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ตอบสนองในย่านความถี่ต่างๆ

การวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำการปรับค่าแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักคัทชุดที่ 2 (V_o^*) จาก 30 V จนถึง 50 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักคัทชุดที่ 1 (V_{o1}^*)

เท่ากับ 20 V มีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 10 และปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่ 2 (V_{o2}^*) จาก 20 V จนถึง 40 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่ 1 (V_{o1}^*) เท่ากับ 30 V มีผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 แผนภาพโพลของ Z_n และ Z_m เมื่อมีการคงค่า V_{o1}^* เท่ากับ 20 V

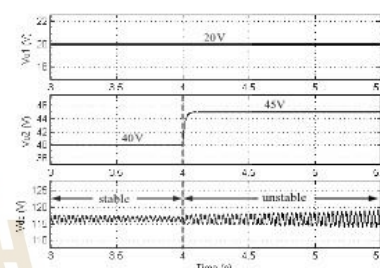


รูปที่ 11 แผนภาพโพลของ Z_n และ Z_m เมื่อมีการคงค่า V_{o1}^* เท่ากับ 30 V

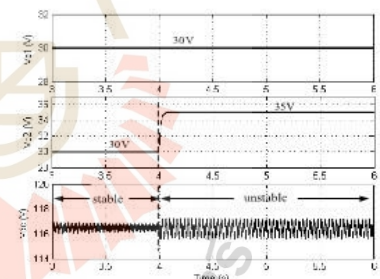
จากรูปที่ 10 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่สอง (V_{o2}^*) จาก 30 V จนถึง 50 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่หนึ่ง (V_{o1}^*) เท่ากับ 20 V พบว่าระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่สอง มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 45 V เป็นต้นไป และจากรูปที่ 11 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่สอง (V_{o2}^*) จาก 20 V จนถึง 40 V และคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่หนึ่ง (V_{o1}^*) เท่ากับ 30 V พบว่าระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพล

ดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่สอง มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 35 V เป็นต้นไป

การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในรูปที่ 5 และ 10 กับรูปที่ 6 และ 11 จะดำเนินการโดยการจำลองของระบบในรูปที่ 1 บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ตามลำดับ



รูปที่ 12 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการคงค่า V_{o1}^* เท่ากับ 30 V



รูปที่ 13 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการคงค่า V_{o1}^* เท่ากับ 20 V

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 12 เมื่อคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซูดที่หนึ่ง (V_{o1}^*) เท่ากับ 20 V และเปลี่ยนแปลงค่า

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลตรงแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่สอง (V_{o2}) จาก 40 V ไป 45 V ที่ค่าแรงดัน 45 V จะทำให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตคิซีเกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่มากขึ้นหรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ และจากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 13 เมื่อคงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลตรงแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่หนึ่ง (V_{o1}) เท่ากับ 30 V และเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลตรงแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่สอง (V_{o2}) จาก 30 V ไป 35 V ที่ค่าแรงดัน 35 V จะเกิดการขาดเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพได้ถูกต้อง

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้กำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโพลตรงแปลงผันแบบบักซ์ที่มีการควบคุมขนานกัน โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูก โดยเริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้ง 2 วิธี พบว่าให้ผลการวิเคราะห์ที่ตรงกัน และสอดคล้องกับการยืนยันผลโดยการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้กำลังบนคอมพิวเตอร์

6. กิตติกรรมประกาศ


คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Emadi, A. Khaligh, C.H. Rivetta, and G.A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 4, pp. 1112-1125, Jul, 2006.
- [2] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani, "Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach," *IEEE Trans. on Circuit and Systems*, Vol. 44, pp. 767-770, August 1997.
- [3] C. Rivetta, G.A. Williamson, and A. Emadi, "Constant power loads and negative impedance instability in sea and undersea vehicles: statement of the problem and comprehensive large-signal solution," *Proc. IEEE Electric Ship Tech Symposium.*, July 2005, pp. 313-320.
- [4] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, "Stability analysis and modelling of AC-DC System with mixed load using DQ-transformation method," In 2008 *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*, Cambridge, UK, 2008 pp. 19-24.
- [5] R. D. Middlebrook, "Input filter consideration in design and application of switching regulators," *IEEE Industry Applicat. Soc. Annu. Meeting*, 1976, pp. 366-382.
- [6] A. Emadi, "Modeling of power electronic loads in AC distribution systems using the generalized state-space averaging method," *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, vol. 51, no. 5, pp. 992-1000, Oct 2004.
- [7] A. Emadi, "Modeling and analysis of multiconverter DC power electronic systems using the generalized state-space averaging

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2563

96

- method," *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, vol. 51, no. 3, pp. 661-668, Jun 2004.
- [8] X. Feng, J. Liu, and F. C. Lee, "Impedance specification for stable DC distributed power system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 2, pp. 157-162, Mar. 2002.
- [9] T. Sopapirm, "Instability mitigation of a three-phase diode rectifier feeding a controlled buck converter by using the active damping method," in *2018 21st International Conference on Electrical Machines and System, Jeju*, 2018, pp. 745-748.
- [10] กองพัน อารีรักษ์, "ระบบควบคุม," พิมพ์ครั้งที่ 1, นครราชสีมา : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2560.
- [11] เทพพนม โสภณเพิ่ม, "การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนาดกัน," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 2554.
- 

ประวัติผู้เขียน

นางสาวจุฑาทิพย์ กกล้าสงคราม เกิดเมื่อวันที่ 2 มกราคม พ.ศ. 2539 ที่จังหวัดชัยภูมิ เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านโนนจี้วงาม ชั้นมัธยมศึกษา ที่โรงเรียนแก้งคร้อวิทยา จังหวัดชัยภูมิ และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2560 และในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยระหว่างศึกษาได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 5 รายวิชา ได้แก่ ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง ปฏิบัติการระบบควบคุม และปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน และมีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 3 บทความ ดังที่ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก จ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี