

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับ
วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้

นายโกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

**MODELLING AND STABILITY ANALYSIS OF
THREE-PHASE CONTROLLED RECTIFIERS**

Koson Chaicharoenudomrung

**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 2011

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับ
วงจรรีจกระแสดสามเฟสแบบควบคุมได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ทองพัน อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ทองพล อารีรักษ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับ
วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ (MODELLING AND STABILITY ANALYSIS
OF THREE-PHASE CONTROLLED RECTIFIERS) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองพัน อารีรักษ์, 160 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการแปลงดีคิวิ และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ โดยมีการควบคุมของวงจรเรียงกระแสด้วยตัวควบคุมพีไอ และมีอุปกรณ์ในการสวิตช์เป็นไทรสเตอร์ ซึ่งมีโหลดของวงจรเป็นโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power load: CPL) โหลดดังกล่าวนี้ สามารถลดเสถียรภาพของระบบได้อย่างมีนัยสำคัญ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ มีความจำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอาศัยการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีการแปลงดีคิวิ สำหรับระบบควบคุมในเบื้องต้นได้อาศัยการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์เสถียรภาพขั้นพื้นฐาน นอกจากนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้มีการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์คือ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (ATS) โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทั้งนี้เพื่อให้การทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ ที่พารามิเตอร์ค่าต่าง ๆ ของระบบ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ด้วยวิธีการแปลงดีคิวิ สามารถคาดเดาจุดที่ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

KOSON CHAICHAROENUDOMRUNG : MIDELLING AND STABILITY

ANALYSIS OF THREE-PHASE CONTROLLED RECTIFIERS : ASST. PROF.

KONGPAN AREERAK, Ph.D., 160 PP.

STABILITY ANALYSIS/ CONSTANT POWER LOAD/ DQ MODELLING
METHOD/THREE PHASE CONTROLLED RECTIFIER

The thesis presents the mathematical model using DQ Transformation method and stability analysis of the three-phase controlled rectifier feeding the ideal constant power load (CPL). The cascade PI controllers are used to regulate voltage. The CPL load can significantly degrade the system stability. Therefore, the stability study of the proposed power system is very important. In the thesis, the dynamic model derived from the DQ method is used with the eigenvalue theorem for stability studies. In addition, this dynamic model is also used as the objective function for optimal controller design via the adaptive tabu search (ATS) algorithm. As a result, the best performance of the output response is obtained. For the stability analysis due to the CPL, the proposed dq model can correctly predict the unstable point in which a good agreement between theoretical and simulation results is achieved.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กองพล อารีรักษ์ และอาจารย์ผู้สอนทุกท่านประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ รวมถึง น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ทุก ๆ คน ที่ให้คำปรึกษา และคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของเรื่อง.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	7
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับ ปัญหาทางวิศวกรรม.....	11
2.5 สรุป.....	13
3 ทฤษฎีพื้นฐานการแปลงดีคิว.....	14
3.1 บทนำ.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	การแปลงของคลาร์ก (Clarke's transform).....	14
3.2.1	การแปลงระหว่างแกน $\alpha\beta$ และแกน dq	16
3.3	การแปลงของปาร์ก (Park's transform)	17
3.4	การแปลงดีคิวกับวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า.....	18
3.4.1	วงจรอนุกรมของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ	18
3.4.2	วงจรขนานของตัวเก็บประจุ.....	21
3.5	สรุป	23
4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	
	โดยวิธีการแปลงดีคิว.....	24
4.1	บทนำ.....	24
4.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ กรณีโหลดตัวต้านทาน.....	24
4.3	การคำนวณค่าในสถานะคงตัวสำหรับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบ บริดจ์กรณีโหลดตัวต้านทาน	33
4.4	การตรวจสอบความถูกต้องและการจำลองสถานการณ์	35
4.5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ สำหรับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์.....	37
4.6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและการทำให้เป็นเชิงเส้น.....	39
4.7	การคำนวณค่าในสถานะคงตัว	42
4.8	การจำลองสถานการณ์	44
4.9	การวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	46
4.10	สรุป	48
5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้	
	กรณีไม่มีตัวควบคุม	50
5.1	บทนำ.....	50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุม ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	50
5.3	การคำนวณค่าในสภาวะคงตัวสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบควบคุมได้กรณีไม่มีตัวควบคุมและมีโหลดเป็นตัวต้านทาน	59
5.4	การตรวจสอบความถูกต้องและการจำลองสถานการณ์	61
5.5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุม	67
5.6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและการทำให้เป็นเชิงเส้น	68
5.7	การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว	70
5.8	การจำลองสถานการณ์	72
5.9	การวิเคราะห์เสถียรภาพ	77
5.10	สรุป	84
6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้	85
6.1	บทนำ	85
6.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ และ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว	85
6.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น	87
6.4	การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว	90
6.5	การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิม	94
6.5.1	การออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า	94
6.5.2	การออกแบบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า	95
6.6	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและการวิเคราะห์เสถียรภาพ	96
6.7	การวิเคราะห์เสถียรภาพการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ	100
6.8	สรุป	107
7	การออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	108

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.1 บทนำ	108
7.2 การค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว.....	108
7.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบควบคุมได้ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว	112
7.3.1 การทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว	113
7.3.2 การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้การค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว	118
7.4 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล	119
7.5 สรุป	122
8 สรุปและข้อเสนอแนะ	124
8.1 สรุป	124
8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต	126
รายการอ้างอิง	127
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์	131
ภาคผนวก ข. โปรแกรมการคำนวณหาผลเฉลยค่าในสถานะคงตัว.....	138
ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	147
ประวัติผู้เขียน	160

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่มีต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....5
2.2	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์.....8
2.3	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ กับปัญหาทางวิศวกรรม.....11
4.1	พารามิเตอร์ของระบบวงจรเรียงกระแสคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์.....36
5.1	พารามิเตอร์ของระบบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้กรณีไม่มีตัวควบคุม.....62
6.1	พารามิเตอร์ของระบบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้.....96
7.1	ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น.....114
7.2	ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง.....115
7.3	ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น.....116
7.4	ผลการทดสอบค่าปรับลดรัศมี.....117
7.5	ผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม.....119
7.6	ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม.....120

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงสามเฟสเป็นแกน $\alpha\beta 0$15
3.2	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq16
3.3	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงสามเฟสเป็นแกน dq17
3.4	ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส19
3.5	วงจรสมมูลของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำในสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกน dq21
3.6	ตัวเก็บประจุของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส.....21
3.7	วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุในสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกน dq23
4.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และโหลดตัวต้านทาน..... 25
4.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟสและความต้านทานปรับค่าได้ของมุมความเหลื่อม..... 26
4.3	สัญญาณการสวิตชิงโดยไม่พิจารณาผลกระทบของมุมความเหลื่อม..... 26
4.4	แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว 28
4.5	วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์บนแกน dq 29
4.6	วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และโหลดตัวต้านทานบนแกน dq 30
4.7	วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์บนแกน dq ในรูปแบบอย่างง่าย..... 30
4.8	สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส 33
4.9	การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V_{rms} 36
4.10	การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 210 เป็น 220 V_{rms} 37
4.11	วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว..... 38
4.12	วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์บนแกน dq ในรูปแบบอย่างง่าย..... 39
4.13	สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส 42
4.14	ผลเฉลยค่าสถานะคงตัวของ $V_{bus,o}$ $V_{out,o}$ และ λ_o เมื่อ P_{CPL} เปลี่ยนแปลง..... 44
4.15	การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จาก 2 kW เป็น 3 kW..... 45
4.16	การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จาก 4 kW เป็น 5 KW..... 45
4.17	ค่าเจาะจงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 47
4.18	ภาพขยายพื้นที่สำคัญจากรูปที่ 4.17 (λ_s และ λ_o).....47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.19	ผลการจำลองสถานการณ์การขาดเสถียรภาพ	48
5.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้กรณีไม่มีตัวควบคุมที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	51
5.2	วงรีกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้และความต้านทานปรับค่าได้	52
5.3	สัญญาณการสวิตชิงของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ โดยไม่พิจารณาผลกระทบของมุมความเหลื่อม	52
5.4	แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว	54
5.5	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้บนแกน dq	55
5.6	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้และโหลดตัวต้านทานบนแกน dq	56
5.7	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้บนแกน dq ในรูปแบบอย่างง่าย	56
5.8	สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส	59
5.9	การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V _{rms} เมื่อมุม $\alpha = 0$ องศา	62
5.10	การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V _{rms} เมื่อมุม $\alpha = 10$ องศา	63
5.11	การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V _{rms} เมื่อมุม $\alpha = 20$ องศา	63
5.12	การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V _{rms} เมื่อมุม $\alpha = 30$ องศา	64
5.13	การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V _{rms} เมื่อมุม $\alpha = 40$ องศา	64
5.14	การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V _{rms} เมื่อมุม $\alpha = 60$ องศา	65
5.15	กระแสไฟฟ้ากระแสสลับเฟส a ในโหนดนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง	65
5.16	กระแสไฟฟ้ากระแสสลับเฟส a ในโหนดนำกระแสแบบต่อเนื่อง	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17	วงจรรีขงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้กรณีไม่มีตัวควบคุม และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว..... 67
5.18	วงจรรีขงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้บนแกน dq ในรูปแบบอย่างง่าย 68
5.19	สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส 71
5.20	การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 7 kW เป็น 9 kW เมื่อมุม $\alpha = 0$ องศา..... 73
5.21	การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 7 kW เป็น 9 kW เมื่อมุม $\alpha = 10$ องศา..... 73
5.22	การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 7 kW เป็น 9 kW เมื่อมุม $\alpha = 20$ องศา..... 74
5.23	การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 7 kW เป็น 9 kW เมื่อมุม $\alpha = 30$ องศา..... 74
5.24	การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 7 kW เป็น 9 kW เมื่อมุม $\alpha = 40$ องศา..... 75
5.25	การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 1 kW เป็น 3 kW เมื่อมุม $\alpha = 60$ องศา..... 75
5.26	กระแสไฟฟ้ากระแสสลับเฟส a ในโหมคนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง 76
5.27	กระแสไฟฟ้ากระแสสลับเฟส a ในโหมคนำกระแสแบบต่อเนื่อง..... 76
5.28	ค่าเฉลี่ยกรณีมุม $\alpha = 0$ องศา 78
5.29	ผลการจำลองการขาดเสถียรภาพกรณีมุม $\alpha = 0$ องศา 79
5.30	ค่าเฉลี่ยกรณีมุม $\alpha = 10$ องศา 79
5.31	ค่าเฉลี่ยกรณีมุม $\alpha = 20$ องศา 80
5.32	ค่าเฉลี่ยกรณีมุม $\alpha = 30$ องศา 80
5.33	ค่าเฉลี่ยกรณีมุม $\alpha = 40$ องศา 81
5.34	ผลการจำลองการขาดเสถียรภาพกรณีมุม $\alpha = 10$ องศา 82
5.35	ผลการจำลองการขาดเสถียรภาพกรณีมุม $\alpha = 20$ องศา 82
5.36	ผลการจำลองการขาดเสถียรภาพกรณีมุม $\alpha = 30$ องศา 83
5.37	ผลการจำลองการขาดเสถียรภาพกรณีมุม $\alpha = 40$ องศา 83
6.1	วงจรรีขงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้เมื่อมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว 86
6.2	โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.1 86
6.3	วงจรมูลอย่างง่ายของวงจรรีขงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้บนแกน dq 87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.4	สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส	91
6.5	กราฟผลเฉลยค่าในสภาวะคงตัวของ $V_{bus,o}$ α_o และ λ_o เมื่อ P_{CPL} เปลี่ยนแปลง	93
6.6	ระบบควบคุมกระแสไฟฟ้า	94
6.7	ระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า	95
6.8	การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 7 kW เป็น 8 kW เมื่อ $V_{out}^* = 500$ V	97
6.9	ค่าเจาะจงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น	98
6.10	ภาพขยายส่วนที่สำคัญจากรูปที่ 6.9.....	99
6.11	ผลการจำลองสถานการณ์การขาดเสถียรภาพ	100
6.12	ขอบเขตเสถียรภาพของระบบเมื่อ L_F เปลี่ยนแปลง	101
6.13	ขอบเขตเสถียรภาพของระบบเมื่อ C_F เปลี่ยนแปลง.....	102
6.14	การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สำหรับ $C_F = 900$ μ F	102
6.15	การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สำหรับ $C_F = 1000$ μ F	103
6.16	การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สำหรับ $C_F = 1300$ μ F	103
6.17	ขอบเขตเสถียรภาพของระบบเมื่อ ω_{nv} เปลี่ยนแปลง	104
6.18	การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สำหรับ $\omega_{nv} = 2\pi \times 8$ rad/s.....	105
6.19	การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สำหรับ $\omega_{nv} = 2\pi \times 10$ rad/s.....	105
6.20	การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สำหรับ $\omega_{nv} = 2\pi \times 13$ rad/s.....	106
6.21	ขอบเขตเสถียรภาพของระบบเมื่อ ω_{ni} เปลี่ยนแปลง.....	106
7.1	คู่ค่า S_o ในพื้นที่การค้นหา	109
7.2	ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_o	110
7.3	กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่	110
7.4	กำหนดค่า S_o ใหม่	111
7.5	กลไกการเดินย้อนรอย	111
7.6	บล็อกไดอะแกรมการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม เชิงปรับตัว	112
7.7	การลู่เข้าหาคำตอบ W	119

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.8	ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเปลี่ยนแปลงจาก 6 kW เป็น 8 kW 121
7.9	ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเปลี่ยนแปลงจาก 7 kW เป็น 9 kW121
ก.1	วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....132
ก.2	วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว133
ก.3	โครงสร้างโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ.....134
ก.4	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้กรณีไม่มีตัวควบคุม ซึ่งมีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....135
ก.5	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้กรณีไม่มีตัวควบคุม ซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว 136
ก.6	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้.....137

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้ถูกนำมาใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะวงจรแปลงผันกำลังซึ่งทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลด สำหรับโหลดที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังส่วนใหญ่มักประพฤติตัวเป็นโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power loads: CPL) (Rivetta, Williamson, and Emadi, 2005; Emadi, Rivetta, Williamson, 2006) โดยเฉพาะโหลดที่มีการควบคุมการทำงาน อาทิเช่น วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมความเร็ว โหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัวเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรงซึ่งสามารถลดเสถียรภาพของระบบได้อามีนัยสำคัญ การขาดเสถียรภาพอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบได้ จากสาเหตุดังกล่าว จึงทำให้มีการศึกษา และวิเคราะห์เสถียรภาพ ซึ่งในอดีตได้มีการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Emadi, 2004) การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน อาทิเช่น วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ (Areerak, Bozhko, Asher, and Thomas, 2008) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือก วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในการสวิตช์ เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านทานกำลังไฟฟ้าได้สูง อีกทั้งวงจรนี้สามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่และเป็นไปตามความต้องการได้ จึงเป็นที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม จากการศึกษาค้นคว้า พบว่า การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพมีหลายวิธี เช่น วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ (state-space averaging method: SSA) วิธีการแปลงดีคิว (DQ-transformation: DQ) (Rim, Hu, and Cho, 1990) และวิธีค่าเฉลี่ยไม่เป็นเชิงเส้น (non linear average-value method :NLAM) (Han, Wang, and Howe, 2006) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ด้วยวิธีการแปลงดีคิว เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้ถูกต้อง และมีความซับซ้อนน้อยในการวิเคราะห์เสถียรภาพ อีกทั้งยังเหมาะสำหรับระบบสามเฟสอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้

1.2.2 เพื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีตัวควบคุมที่มีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ (ideal constant power load)

1.2.3 เพื่อดำเนินการออกแบบตัวควบคุมพีไอ สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ให้มีสมรรถนะการทำงานที่ดีขึ้น โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์

1.2.4 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเมื่อค่าพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลง

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้

1.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สร้างขึ้นด้วยวิธีการแปลงคิคว

1.3.3 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (power system blockset) ร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

1.3.4 ตัวควบคุมที่ใช้สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้เป็นตัวควบคุมพีไอ

1.3.5 ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้น การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเพียงเท่านั้น

1.3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

1.3.7 โหลดของระบบเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

1.3.8 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ด้วยวิธีการค้นหาแบบแบบตามูเชิงปรับตัว

1.3.9 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ไม่พิจารณาการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจร โดยจะสนใจเพียงแค่แบบจำลองของระบบเท่านั้น

1.3.10 ไม่พิจารณาผลกระทบเนื่องจากฮาร์มอนิก

1.3.11 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสเป็นแบบสมดุล

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้เท่านั้น

1.4.2 การทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟส ศึกษาในช่วงโหมดการทำงานแบบต่อเนื่องเท่านั้น (CCM)

1.4.3 ออกแบบตัวควบคุมพีไอ สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า การค้นหาแบบแบบตามูเชิงปรับตัว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีการแปลงดีคิว สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้

1.5.2 ได้องค์ความรู้ด้านการวิเคราะห์เสถียรภาพ สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

1.5.3 ได้องค์ความรู้ด้านการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ด้วยตัวควบคุมพีไอ

1.5.4 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

1.5.5 บทความวิจัยเผยแพร่ระดับชาติ หรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 8 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการวิเคราะห์เสถียรภาพ

บทที่ 3 อธิบายการแปลงดีคิวในรูปแบบต่าง ๆ และการประยุกต์การแปลงดีคิวกับสายส่งกำลังไฟฟ้า

บทที่ 4 นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทานและโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัว การทำให้เป็นเชิงเส้นและการ

คำนวณค่าในสภาวะคงตัว การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

บทที่ 5 นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ที่ไม่มีตัวควบคุม โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทานและโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัว การทำให้เป็นเชิงเส้นของแบบจำลอง การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการวิเคราะห์เสถียรภาพ

บทที่ 6 นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ที่มีตัวควบคุม โดยมีโหลดเป็นโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัว การทำให้เป็นเชิงเส้น การคำนวณค่าในสภาวะคงตัวและการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิม การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การวิเคราะห์เสถียรภาพ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบที่มีผลต่อเสถียรภาพ

บทที่ 7 นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ด้วยวิธีการค้นหาแบบดาบุงเชิงปรับตัว การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ขอบเขตการค้นหาและการทดสอบพารามิเตอร์ นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลการทำงานของตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมและตัวควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบดาบุงเชิงปรับตัว

บทที่ 8 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการวิจัยค้นคว้า และพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนมาถึงปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้ในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวกับงานวิศวกรรม เพื่อใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงผลกระทบของโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังในด้านต่างๆ รวมถึงเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตามที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1989	VladGrigore, JariHatonen , JormaKyyra, andTeuvoSuntio	นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมพลวัตของวงจรแปลงผันแบบบักค์ ซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับโหมดการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในช่วงโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบ
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1999	Emadi, A., Fahimi, B., and Ehsani, M.	นำเสนอแนวคิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้าของเครื่องบินและการแก้ไขปัญหาแบบพื้นฐาน ระบบที่ศึกษาประกอบด้วยวงจรแปลงผันหลายวงจร รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมแบบโหมคเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมอาศัยทฤษฎีเสถียรภาพของไลอาปูนอฟ(Lyapunov)
2004	Jusoh, A.B.	นำเสนอเกี่ยวกับการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีวงจรกรองกำลังไฟฟ้า โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพได้อาศัยวิธีเกณฑ์ของมิดเดิลบรูค(Middlebrook criterion) นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการออกแบบวงจรพาสซีฟ เพื่อช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นอีกด้วย
2005	Rivetta, C., Williamson, G.A., and Emadi, A.	นำเสนอเกี่ยวกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้าของเรือดำน้ำและการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นที่พฤติกรรมพลวัตของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี ซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และพฤติกรรมของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุม ซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
2006	Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A.	นำเสนอ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การขาดเสถียรภาพในระบบไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าและวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอเกี่ยวกับแนวคิดของการขาดเสถียรภาพสำหรับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้า รวมถึงแนวทางการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันในระบบไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้าเมื่อมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบ
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Rahimi, A.M. and Emadi, A.	นำเสนอวิธีการแก้ปัญหา การขาดเสถียรภาพแบบ แอกทีฟ สำหรับวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี ซึ่งถือว่าเป็น วิธีการแบบใหม่ที่นำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันดิซี เป็นดิซี ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งทำให้ระบบมี เสถียรภาพ โดยได้แสดงผลการจำลองสถานการณ์ด้วย คอมพิวเตอร์และผลการทดลองเพื่อเป็นการตรวจสอบและ ยืนยัน

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

เนื่องจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มีความจำเป็นต้องอาศัย
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง ซึ่งแบบจำลองโดยทั่วไปมักเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับ
เวลาอันเนื่องมาจากผลของการสวิตชิงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า
ทำให้มีความยุ่งยากและซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลอง
ทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์และสามารถอาศัย
ทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน
แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1989	Ridley, R.B.	นำเสนอเกี่ยวกับแบบจำลองสำหรับการแก้ไขตัวประกอบกำลังของวงจรแปลงผันแบบบวสต์ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยและแนวทางการออกแบบตัวควบคุม และการตรวจสอบความถูกต้อง โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์
1997	Mahdavi, J., Emaadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized state-space averaging) และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์
1998	Soo-Bin Han, Nam-Sup Choi, Chun-Taik Rim, and Gyu-Hyeong Cho	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมด้วยพีดับเบิลยูเอ็ม ด้วยวิธีการแปลงดีคิว และการวิเคราะห์ลักษณะพลวัต โดยวิธีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอผลการทดลองจริงอีกด้วย
2004	Emadi, A.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีหลายวงจรเชื่อมต่อกันในระบบ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์
2004	Jalla, M.M., Emadi, A., Williamson, G.A., and Fahimi, B.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีหลายวงจรเชื่อมต่อกันในระบบ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การตรวจสอบความถูกต้องอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งผลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004	Baghrmian, A., and Forsyth, A.J.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ 12 พัลส์ ซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยวิธีค่าเฉลี่ย (Averaged-value) สำหรับวิธีการตรวจสอบความถูกต้องได้อาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์
2004	Emadi, A.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส ซึ่งมีโหลดตัวต้านทานขนานกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยแบบจำลองของวงจรได้อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และวิเคราะห์เสถียรภาพ ด้วยวิธีค่าเจาะจง
2006	Han Liqiu, Wang Jiabin, and Howe David	นำเสนอเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากระแสตรง 270 โวลต์ สำหรับระบบไฟฟ้าเครื่องบิน โดยอาศัยแบบจำลองปริภูมิสถานะที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear state-space models) และการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีค่าเจาะจง รวมถึงการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์
2007	Liqu Han, Jiabin Wang, and Howe, D.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสแบบ 6 และ 12 พัลส์ โดยวิธีค่าเฉลี่ย สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2008	Areerak, K.-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกับตัวต้านทาน โดยวิธีการแปลงดีคิว และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีค่าเจาะจง พร้อมทั้งศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบอีกด้วย
2008	Areerak, K.-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมด้วยพีดับเบิลยูเอ็ม โดยใช้วิธีการแปลงดีคิว และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีค่าเจาะจง พร้อมทั้งแสดงผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์
2008	Jiabin Wang, and Howe, D.	นำเสนอวิธีการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ด้วยการออกแบบตัวควบคุม สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ 12 พัลส์ สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาเพียงระบบควบคุม วงจรกรอง และ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเท่านั้น โดยอาศัยวิธีค่าเจาะจง
2009	Areerak, K.-N., Bozhko, S.V., de Lillo, L., Asher, G.M., Thomas, D.W.P., Watson, A., and Wu, T.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้าของเครื่องบิน โดยคำนึงถึงพลวัตที่เกิดขึ้นเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยวิธีการแปลงดีคิวโดยระบบที่พิจารณาประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรอง รวมถึงความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง และ โหลดมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรที่มีการควบคุมความเร็ว การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอาศัยวิธีค่าเจาะจง การแสดงผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Hao Wang, Jinjun Liu, and Dan Hou;	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีแบบสองทิศทาง ด้วยวิธีเกณฑ์ของมิตเดิลบรูก โดยพิจารณาเอาต์พุตอิมพีแดนซ์และอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรแปลงผัน รวมถึงวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพ และแสดงผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางวิศวกรรม

การค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวเป็นวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ที่นำมาประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ปัจจุบันได้มีการนำวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวมาประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมมากมาย เช่น ระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบควบคุม การระบุเอกลักษณ์ เป็นต้น โดยในอดีตที่ผ่านมาการนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มีน้อยมาก และมีการนำไปใช้กับระบบที่แตกต่างกันออกไป โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางวิศวกรรม

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2002	Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Srikaew, A., Sujitjorn, S., and Totarong, P.	นำเสนอขั้นตอนและวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว ในการประยุกต์ เพื่อการระบุเอกลักษณ์ของระบบ เมื่อระบบที่ศึกษาเป็นการแกว่งของลูกตุ้ม

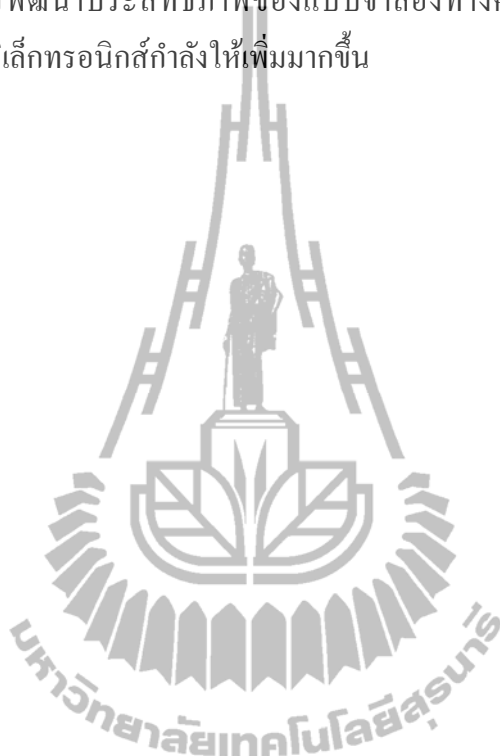
ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้
กับปัญหาทางวิศวกรรม (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004	Areerak, K-N., Kulworawanichpong, T. and Sujitjorn, S.	นำเสนอวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ในการ ประยุกต์สำหรับการออกแบบรีเลย์แบบดิจิทัล ซึ่งอยู่ในระบบไฟฟ้าขนาด 5 บัส และมีรีเลย์ แบบดิจิทัลอยู่ 6 ตัว
2004	Kulworawanichpong, T, Areerak, K-L, Areerak, K-N and Sujitjorn, S.	นำเสนอวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกส์ แบบใหม่ โดยอาศัยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิง ปรับตัว ซึ่งพบว่าสามารถระบุเอกลักษณ์ฮาร์มอ นิคที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและ แม่นยำ

จากงานวิจัยในอดีตที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น พบว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ยังไม่มีการนำเสนอระบบที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ด้วยตัวควบคุมพีไอ ซึ่งมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นไทรซิสเตอร์ เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านทานกำลังไฟฟ้าได้มาก จึงเป็นที่นิยมใช้ตามโรงงานอุตสาหกรรม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะอาศัยวิธีการแปลงดีคิว เนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับระบบสามเฟสสมดุล ซึ่งในอดีตได้มีการนำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการแปลงดีคิวอยู่พอสมควร สำหรับวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพ จะอาศัยวิธีการคำนวณหาค่าเจาะจง เนื่องจากเป็นทฤษฎีพื้นฐาน และมีขั้นตอนการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนมากนัก และมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ พบว่า การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ยังไม่เป็นที่ปรากฏอย่างแพร่หลาย ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงมีการนำเสนอ การออกแบบตัวควบคุมพีไอ ซึ่งอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการทำงานของวงเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้

2.5 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 นี้ เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้น ถือเป็นเป็นพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัย สำหรับการทําวิจัยวิทยานิพนธ์ และการพัฒนาประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังให้เพิ่มมากขึ้น



บทที่ 3

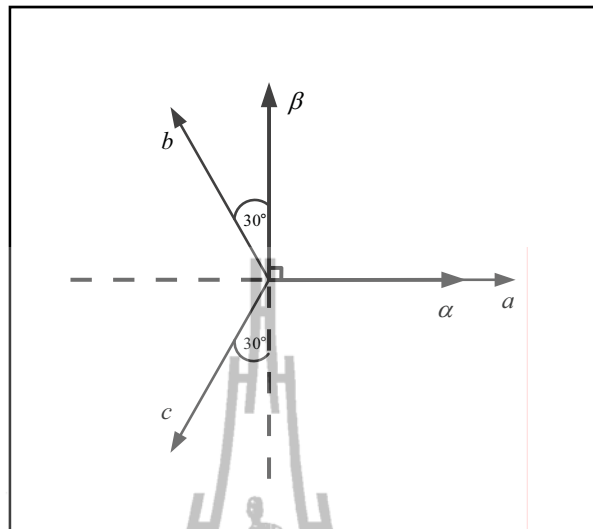
ทฤษฎีพื้นฐานการแปลงดีคิว

3.1 บทนำ

การศึกษาระบบต่าง ๆ ทางวิศวกรรม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีความจำเป็นอย่างมาก สำหรับการออกแบบและการวิเคราะห์ระบบ การแปลงดีคิวเป็นการแปลงทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ลดความซับซ้อนของระบบไฟฟ้าสามเฟสสมมูลได้เป็นอย่างดีซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถแปลงปริมาณทางไฟฟ้าจากแกนสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าแกนสองเฟสที่อยู่บนแกนดีคิว (dq) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยวิธีการแปลงดีคิวในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลัง ซึ่งจะได้รับการอธิบายในบทที่ 4 สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอ หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับการแปลงดีคิวผ่านทางตัวอย่างวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น ก่อนการนำวิธีการแปลงดังกล่าวไปใช้ในบทต่อไป

3.2 การแปลงของคลาร์ก (Clarke's transform)

แผนภาพเวกเตอร์ของการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ โดยการแปลงของคลาร์กแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 แกน α จะอยู่บนแกนของเฟส a และมีเฟสล้าหลังแกน β เป็นมุม $\pi/2$ เรเดียนการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta 0$ สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.1) เมื่อ f_{abc} คือ ปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสใด ๆ ซึ่งอาจหมายถึง แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า หรือ ฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 3.1 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงสามเฟสเป็นแกน $\alpha\beta 0$

$$[f_{\alpha\beta 0}] = [T_{\alpha\beta 0}] [f_{abc}] \quad (3.1)$$

เมื่อ

$$[T_{\alpha\beta 0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

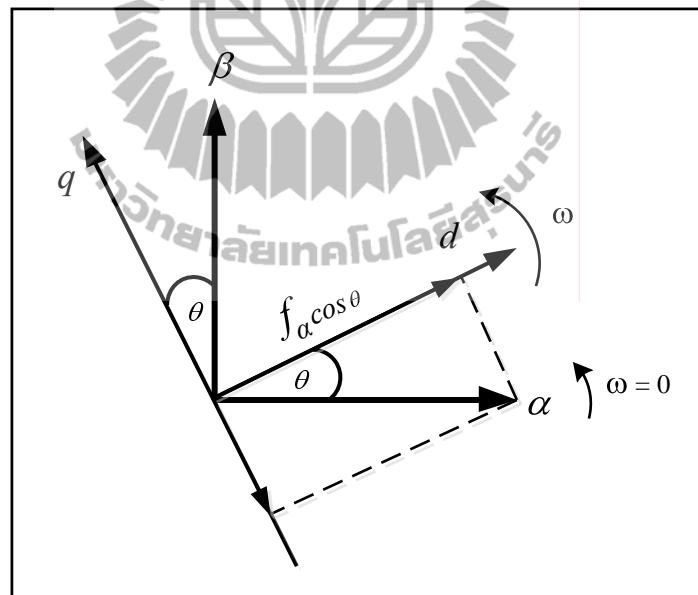
สำหรับอินเวอร์สการแปลงของคลาร์กแสดงได้ดังสมการ

$$[f_{abc}] = [T_{\alpha\beta 0}]^{-1} [f_{\alpha\beta 0}] \quad (3.2)$$

$$\text{เมื่อ } [\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} & 1 \end{bmatrix}$$

3.2.1 การแปลงระหว่างแกน $\alpha\beta$ และแกน dq

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมดุค ดังนั้นจึงไม่พิจารณาปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน 0 รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพเวกเตอร์ความสัมพันธ์ระหว่างแกน $\alpha\beta$ และแกน dq โดยการแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq สามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (3.3) เมื่อ θ คือ มุมหมุนของการแปลงดีคิว ซึ่งมีค่าเท่ากับ ωt



รูปที่ 3.2 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq

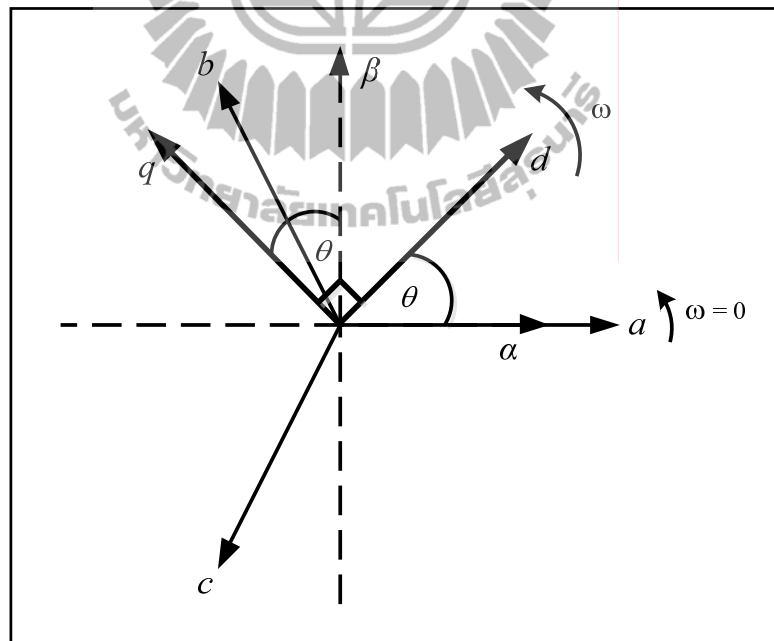
$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

สำหรับอินเวอร์สของการแปลงแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.3 การแปลงของปาร์ก (Park's transform)

การแปลงของปาร์กเป็นการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าจากแกนสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าสองเฟสบนแกน dq ซึ่งมีพื้นฐานมาจากการแปลงของคลาร์ก สำหรับแผนภาพเวกเตอร์การแปลงของปาร์กแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 โดย แกน d จะตั้งฉากกับแกน q และมีเฟสล้ำหลังแกน q การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน dq สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.5) เมื่อ f_{abc} คือปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสใดๆ และ θ คือ มุมหมุนของการแปลงดีคว ซึ่งมามีค่าเท่ากับ ωt



รูปที่ 3.3 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงสามเฟสเป็นแกน dq

$$\begin{bmatrix} f_{dq0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{dq0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{abc} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\text{เมื่อ } [\mathbf{T}_{dq0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

สำหรับอินเวอร์สการแปลงของปาร์กแสดงได้ดังสมการ

$$[f_{abc}] = [\mathbf{T}_{dq0}]^{-1} [f_{dq0}] \quad (3.6)$$

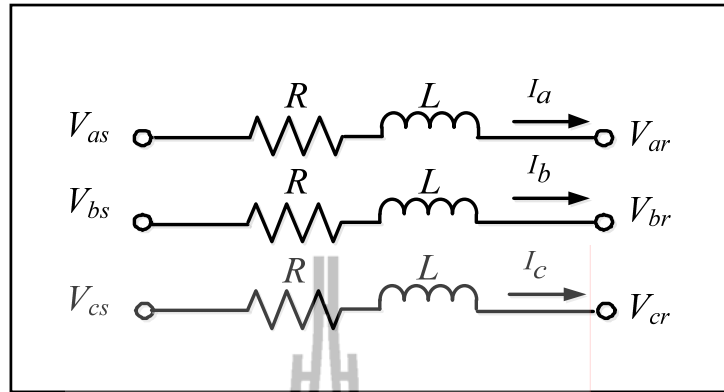
$$\text{เมื่อ } [\mathbf{T}_{dq0}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

3.4 การแปลงดีควิกับวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า

ในส่วนนี้จะเป็นการนำวิธีการแปลงดีควิมาประยุกต์ใช้กับวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส (Ong, 1998) ซึ่งประกอบด้วยวงจรอนุกรมของตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ และวงจรขนานของตัวเก็บประจุ พร้อมทั้งแสดงวงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกน dq

3.4.1 วงจรอนุกรมของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

วงจรสมมูลอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส แสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นระบบที่จะนำวิธีการแปลงดีควิมาประยุกต์ใช้ เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวงจรสมมูลบนแกน dq



รูปที่ 3.4 ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส

พิจารณาแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของสายส่งกำลังไฟฟ้าง่ายแสดงในรูปที่ 3.4 แสดงได้ดังสมการที่ (3.7)

$$\Delta V_{abc} = R I_{abc} + L \frac{d}{dt} I_{abc} \quad (3.7)$$

เมื่อ

$$\Delta V_{abc} = \begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad I_{abc} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3.7) แปลงค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม (ΔV_{abc}) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า (I_{abc}) จากปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสเป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน dq โดยอาศัยสมการการแปลงของพาร์คในสมการที่ (3.5) และอินเวอร์สการแปลงของพาร์คในสมการที่ (3.6) ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังสมการที่ (3.8) ถึงสมการที่ (3.11) ดังนี้

$$\mathbf{T}_{dq0}^{-1} \Delta V_{dq0} = R (\mathbf{T}_{dq0}^{-1} \mathbf{I}_{dq0}) + L \frac{d}{dt} (\mathbf{T}_{dq0}^{-1} \mathbf{I}_{dq0}) \quad (3.8)$$

นำเมตริกซ์การแปลงของพาร์ค (\mathbf{T}_{dq0}) คูณตลอดในสมการที่ (3.8)

$$\mathbf{T}_{dq0} \mathbf{T}_{dq0}^{-1} \Delta \mathbf{V}_{dq0} = \mathbf{T}_{dq0} R (\mathbf{T}_{dq0}^{-1} \mathbf{I}_{dq0}) + \mathbf{T}_{dq0} L \frac{d}{dt} (\mathbf{T}_{dq0}^{-1} \mathbf{I}_{dq0}) \quad (3.9)$$

$$\Delta \mathbf{V}_{dq0} = R \mathbf{I}_{dq0} + L \mathbf{T}_{dq0} \left\{ \frac{d}{dt} (\mathbf{T}_{dq0}^{-1}) \mathbf{I}_{dq0} + \mathbf{T}_{dq0}^{-1} \frac{d}{dt} (\mathbf{I}_{dq0}) \right\} \quad (3.10)$$

$$\Delta \mathbf{V}_{dq0} = R \mathbf{I}_{dq0} + L \mathbf{T}_{dq0} \frac{d}{dt} (\mathbf{T}_{dq0}^{-1}) \mathbf{I}_{dq0} + L \frac{d}{dt} (\mathbf{I}_{dq0}) \quad (3.11)$$

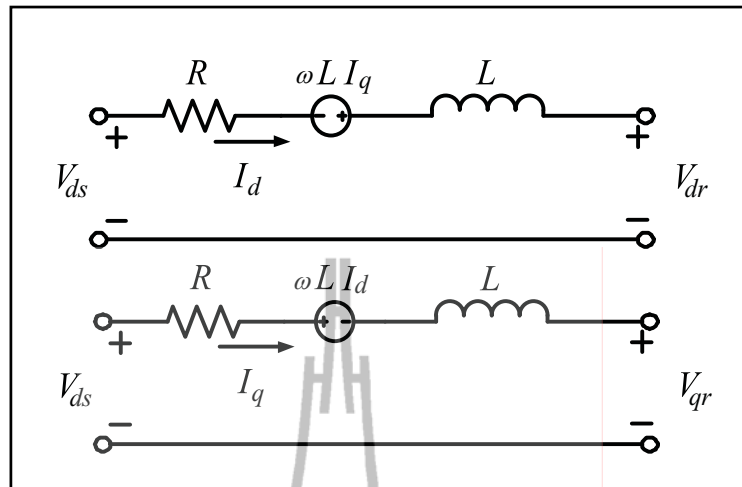
เมื่อ $\mathbf{T}_{dq0} \frac{d}{dt} (\mathbf{T}_{dq0}^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและกระแสวิ่งผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกน dq ได้ดังสมการที่ (3.12) และ (3.13)

$$\Delta V_d = R I_d - \omega L I_q + L \frac{d}{dt} i_d \quad (3.12)$$

$$\Delta V_q = R I_q + \omega L I_d + L \frac{d}{dt} i_q \quad (3.13)$$

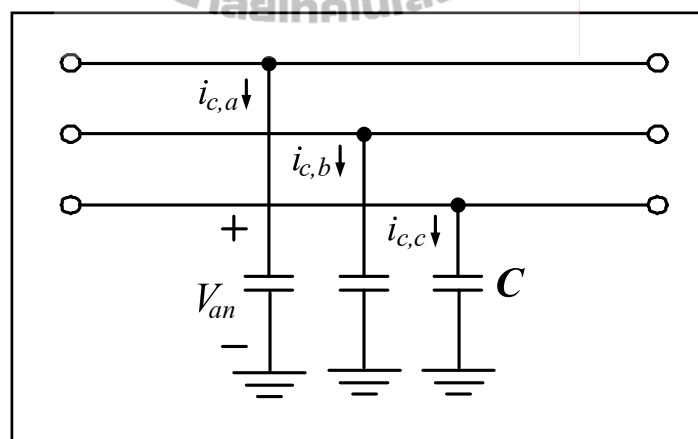
จากสมการที่ (3.12) และ (3.13) วงจรสมมูลอนุกรมของตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 สามารถเขียนให้อยู่บนแกน dq ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำในสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกน dq

3.4.2 วงจรขนานของตัวเก็บประจุ

วงจรสมมูลขนานตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสแสดงดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นระบบที่จะนำวิธีการแปลงดีคิวมาประยุกต์ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวงจรสมมูลบนแกน dq



รูปที่ 3.6 ตัวเก็บประจุของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส

พิจารณากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 3.6 แสดงได้ดังสมการที่ (3.15)

$$\mathbf{I}_{c,abc} = C \frac{d}{dt} \mathbf{V}_{abc} \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.14) แปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ($\mathbf{I}_{c,abc}$) และ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (\mathbf{V}_{abc}) จากปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสเป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน dq โดยอาศัยสมการการแปลงของปาร์คในสมการที่ (3.5) และอินเวอร์สการแปลงของปาร์คในสมการที่ (3.6) ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังสมการที่ (3.15)-(3.17) ดังนี้

$$\mathbf{T}_{dq0}^{-1} \mathbf{I}_{c,dq0} = C \frac{d}{dt} (\mathbf{T}_{dq0}^{-1} \mathbf{V}_{dq0}) \quad (3.15)$$

นำเมตริกซ์การแปลงของปาร์ค (\mathbf{T}_{dq0}) คูณตลอดในสมการที่ (3.15)

$$\mathbf{I}_{c,dq0} = C \mathbf{T}_{dq0} \left\{ \frac{d}{dt} (\mathbf{T}_{dq0}^{-1}) \mathbf{V}_{dq0} + \mathbf{T}_{dq0}^{-1} \frac{d}{dt} (\mathbf{V}_{dq0}) \right\} \quad (3.16)$$

$$\mathbf{I}_{c,dq0} = C \mathbf{T}_{dq0} \frac{d}{dt} (\mathbf{T}_{dq0}^{-1}) \mathbf{V}_{dq0} + C \frac{d}{dt} (\mathbf{V}_{dq0}) \quad (3.17)$$

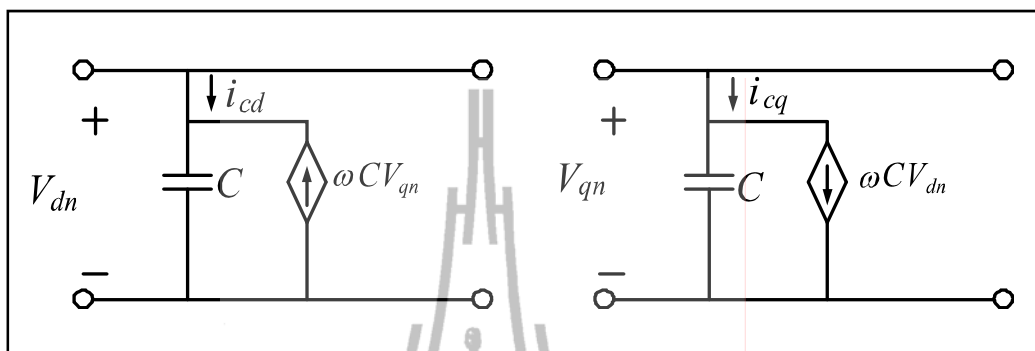
เมื่อ
$$\mathbf{T}_{dq0} \frac{d}{dt} (\mathbf{T}_{dq0}^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกน dq ได้ดังสมการที่ (3.18) และ (3.19)

$$i_{cd} = -\omega C V_q + C \frac{d}{dt} V_d \quad (3.18)$$

$$i_{cq} = \omega C V_d + C \frac{d}{dt} V_q \quad (3.19)$$

จากสมการที่ (3.18) และ (3.19) วงจรสมมูลขนานตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 สามารถเขียนให้อยู่บนแกน dq ได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุในสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกน dq

3.5 สรุป

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานการแปลงดีคิวถือเป็นสิ่งสำคัญมากในการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการแปลงของคลาร์ก (Clarke's transform) โดยในขั้นตอนแรกจะทำการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนสามเฟสเป็นปริมาณทางไฟฟ้าสองเฟสบนแกน $\alpha\beta$ หลังจากนั้น จึงทำการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน dq สำหรับวิธีการแปลงของปาร์ค (Park's transform) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากการแปลงของคลาร์ก โดยสามารถแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนสามเฟสเป็นปริมาณทางไฟฟ้าสองเฟสบนแกน dq ได้เลย จึงมีความสะดวกมากกว่าวิธีการแปลงของคลาร์กนอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการแปลงดีคิวของปาร์คกับสายส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการแปลงดีคิว ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการศึกษเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทต่อ ๆ ไป

บทที่ 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ โดยวิธีการแปลงดีคิวิ

4.1 บทนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้ามีความสำคัญอย่างยิ่ง เมื่อนำไปใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยวิธีการแปลงดีคิวิของปาร์ก (Park's transform) เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งได้มีผู้วิจัยและนำเสนอไว้แล้วในอดีต ทั้งนี้เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้วิธีการแปลงดีคิวิกับระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้าจึงได้นำมาเสนอในบทนี้ โดยแบ่งโหลดของวงจรเรียงกระแสซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีโหลดตัวต้านทาน และกรณีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณากรณีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเป็นสำคัญ เนื่องจากโหลดดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้น เนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ โดยวิธีการแปลงดีคิวิ การคำนวณค่าในสภาวะคงตัวเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์ และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณี โหลดของระบบเป็น โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว นอกจากนี้จะนำเสนอ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการจำลองสถานการณ์ รวมถึงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ

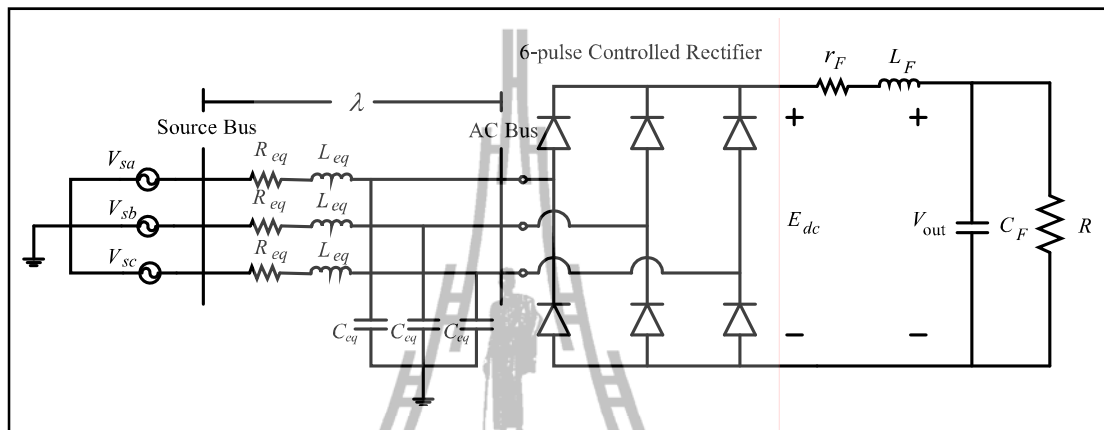
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟส

แบบบริดจ์กรณีโหลดตัวต้านทาน

ระบบที่ทำการศึกษาสำหรับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยวิธีการแปลงดีคิวิ เพื่อให้เกิดความเข้าใจในบทต่อ ๆ ไป แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสต่อกับสายส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ โดยมีไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และต่อเข้ากับวงจรกรอง ซึ่งมีโหลดเป็นตัวต้านทาน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พิจารณาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสเป็นแบบสมมูล R_{eq} L_{eq} และ C_{eq} เป็นพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า ส่วนพารามิเตอร์ของวงจรกรองแทนด้วย r_F L_F และ C_F ซึ่งมี E_{dc} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส และ V_{out} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ

ระบบ ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_F ของวงจรกรอง โดยมีโพลดตัวต้านทาน R และ λ คือ มุมการเปลี่ยนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่าย (source bus) กับบัสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC bus) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.1

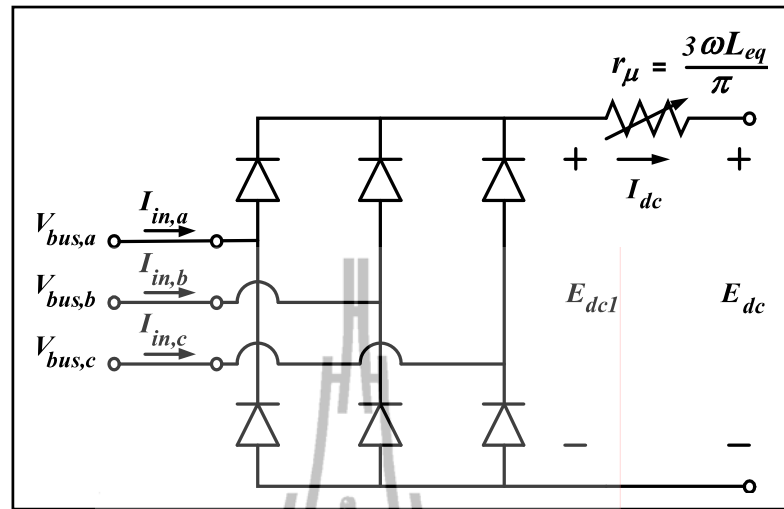


รูปที่ 4.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และโพลดตัวต้านทาน

ผลจาก L_{eq} ในสายส่งกำลังไฟฟ้า จะทำให้เกิดมุมความเหลื่อม μ (overlap angle) ขึ้นในสัญญาณการสวิตชิง ซึ่งมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตตก จากผลกระทบบดงกล่าวสามารถพิจารณาผลของมุมความเหลื่อมสามารถแทนได้ด้วยความต้านทานปรับค่าได้ r_μ ที่บริเวณด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (Mohan, Underland and Robbins, 2003) ความต้านทานปรับค่าได้ สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

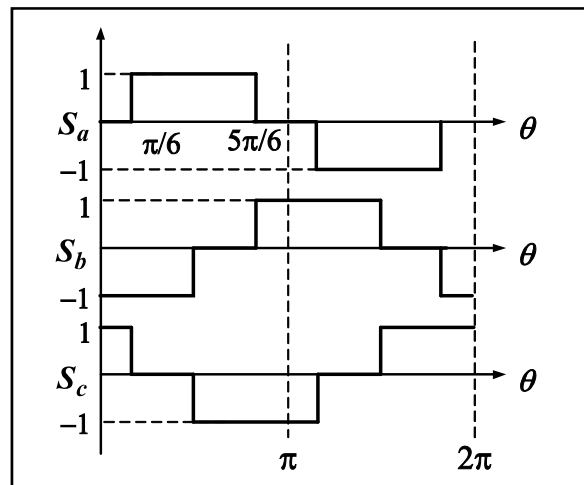
$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (4.1)$$

โดยที่ ω คือ ความถี่ของระบบ



รูปที่ 4.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสและความต้านทานปรับค่าได้ของมูมความเหลื่อม

จากรูปที่ 4.2 E_{dc1} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส โดยยังไม่ได้พิจารณาผลกระทบของมูมความเหลื่อม ในขณะที่ E_{dc} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรที่พิจารณาผลกระทบของมูมความเหลื่อมด้วยความต้านทานที่ปรับค่าได้ เมื่อพิจารณาผลกระทบดังกล่าวให้เป็นความต้านทานปรับค่าได้แล้ว ดังนั้น สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแส โดยไม่พิจารณาผลกระทบของมูมความเหลื่อมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สัญญาณการสวิตช์โดยไม่พิจารณาผลกระทบของมูมความเหลื่อม

ฟังก์ชันของการสวิตชิง S_{abc} ในรูปที่ 4.3 สามารถแสดงได้โดย อนุกรมฟูรีเยร์ (Sakui, Fujita, and Shioya, 1989) ซึ่งพิจารณาที่ความถี่มูลฐาน (ไม่พิจารณาฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบ) ฟังก์ชันของการสวิตชิงสามเฟส แสดงได้ตามสมการดังนี้

$$\mathbf{S}_{abc} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi) \end{bmatrix}^T \quad (4.2)$$

โดยที่ ϕ คือ มุมเฟสที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ

ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟส แสดงตามสมการที่ (4.3) และ (4.4) (Hansen, Asiminoaei, and Blaabjerg, 2003) ตามลำดับ

$$\mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{S}_{abc} I_{dc} \quad (4.3)$$

$$E_{dc1} = \mathbf{S}_{abc}^T \mathbf{V}_{bus,abc} \quad (4.4)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ จะพิจารณาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสเป็นแบบสมดุล โดยไม่พิจารณาฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบ และวงจรเรียงกระแสสามเฟสต้องทำงานในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง (continuous conduction mode, CCM) วงจรเรียงกระแสสามเฟส สามารถแปลงให้อยู่บนแกน dq ซึ่งมีสมการของการแปลงคือดังนี้

$$\mathbf{T}[\theta(t)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta(t)) & \cos(\theta(t) - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta(t) + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta(t)) & -\sin(\theta(t) - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta(t) + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

โดยที่ $\theta(t) = \omega t - \frac{\pi}{2} + \phi$

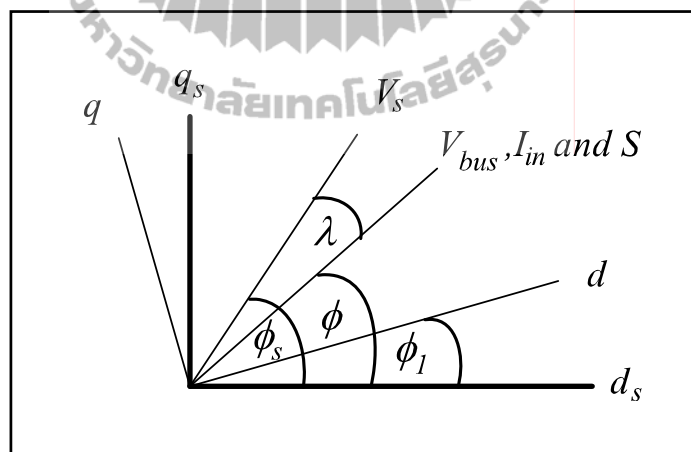
จากสมการที่ (4.2) (4.3) และ (4.4) สามารถแปลงให้อยู่บนแกน dq ด้วยสมการที่ (4.5) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\mathbf{I}_{in,dq} = \mathbf{S}_{dq} I_{dc} \quad (4.6)$$

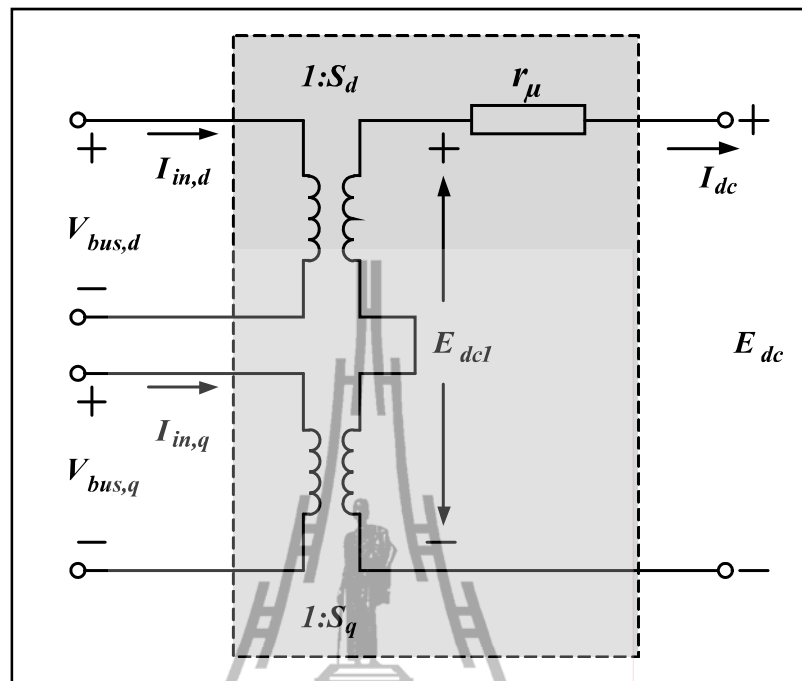
$$E_{dc1} = \mathbf{S}_{dq}^T \mathbf{V}_{bus,dq} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{S}_{dq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} [\cos(\phi_1 - \phi) \quad -\sin(\phi_1 - \phi)]^T \quad (4.8)$$

จากสมการ (4.6) (4.7) และ (4.8) วงจรเรียงกระแสสามเฟส สามารถแทนด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมี S_d และ S_q เป็นอัตราส่วนของหม้อแปลง ขึ้นอยู่กับมุมเฟสการเคลื่อนที่ของแกน dq (ϕ) มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ (ϕ) แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 เมื่อ V_s คือ ค่ายอดสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าเฟสที่แหล่งจ่าย I_{in} คือ ค่ายอดสูงสุดของกระแสไฟฟ้า V_{bus} คือ ค่ายอดสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ และ S คือ ค่ายอดสูงสุดของฟังก์ชันของการสวิตชิง วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสสามเฟสบนแกน dq สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5

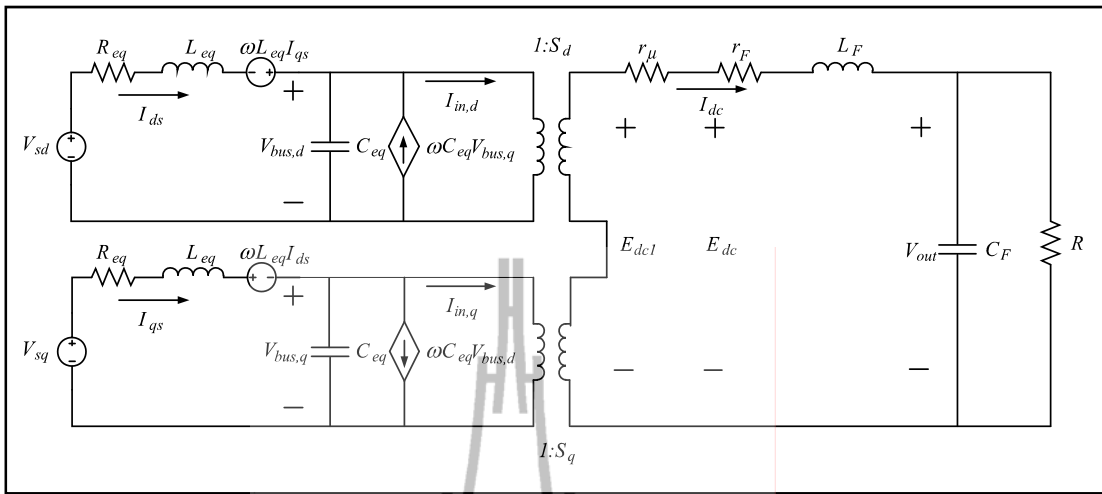


รูปที่ 4.4 แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว

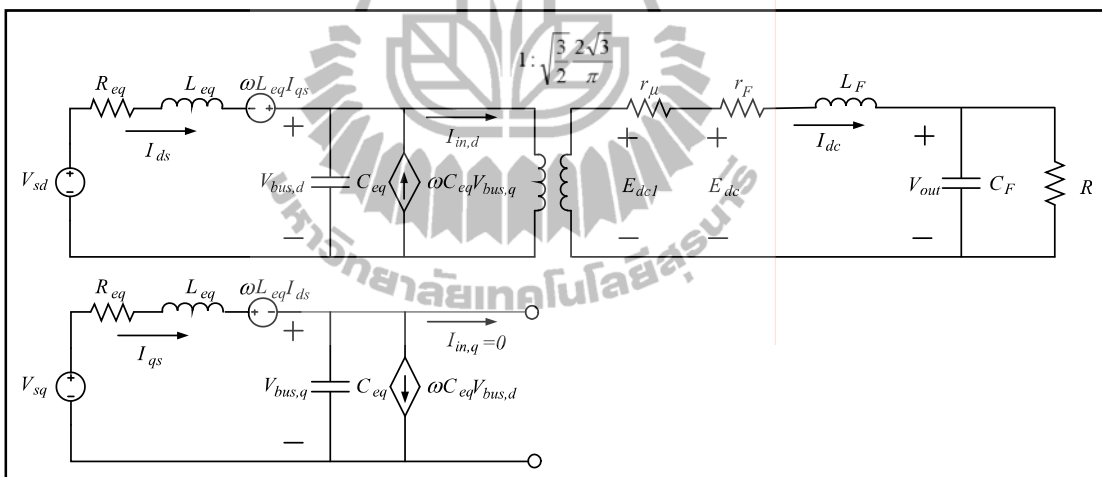


รูปที่ 4.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์บนแกน dq

สำหรับในส่วนของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามารถแปลงวงจรสมมูลจากแกนสามเฟสให้เป็นวงจรสมมูลสองเฟสบนแกน dq ได้ โดยรายละเอียดการแปลงสายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยวงจรอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ ที่ขนานกับตัวเก็บประจุ ได้รับการอธิบายไว้ในบทที่ 3 แล้ว วงจรสมมูลสายส่งกำลังไฟฟ้าและวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งสามารถทำให้เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายได้โดยการกำหนดมุมเฟสการหมุนของฟังก์ชันของการสวิตชิง ($\phi_1 = \phi$) ทำให้ได้วงจรสมมูลในรูปแบบอย่างง่ายดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และโหลดตัวต้านทานบนแกน dq



รูปที่ 4.7 วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์บนแกน dq ในรูปแบบอย่างง่าย

จากรูปที่ 4.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถวิเคราะห์ด้วยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) โดยกำหนด ตัวแปรสถานะ อินพุต และเอาต์พุต ดังสมการที่ (4.9)

ตัวแปรสถานะ :

$$\mathbf{x} = [I_{ds} \ I_{qs} \ V_{bus,d} \ V_{bus,q} \ I_{dc} \ V_{out}]^T$$

อินพุต :

$$\mathbf{u} = [V_m]$$

(4.9)

เอาต์พุต :

$$\mathbf{y} = [V_{out}]$$

สมการอนุพันธ์ แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\bullet \quad I_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd}$$

$$\bullet \quad I_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq}$$

$$\bullet \quad V_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc}$$

$$\bullet \quad V_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs}$$

(4.10)

$$\bullet \quad I_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_F} V_{bus,d} - \left(\frac{r_F}{L_F} + \frac{r_\mu}{L_F} \right) I_{dc} - \frac{1}{L_F} V_{out}$$

$$\bullet \quad V_{out} = \frac{1}{C_F} I_{dc} - \frac{1}{RC_F} V_{out}$$

จากสมการอนุพันธ์ในสมการที่ (4.10) สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบปริภูมิสถานะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}\end{aligned}\quad (4.11)$$

เมื่อ $\mathbf{x} = [I_{ds} \ I_{qs} \ V_{bus,d} \ V_{bus,q} \ I_{dc} \ V_{out}]^T$

$$\mathbf{u} = [V_m]$$

$$\mathbf{y} = [V_{out}]$$

สำหรับรายละเอียดของเมตริกซ์ \mathbf{A} \mathbf{B} \mathbf{C} และ \mathbf{D} แสดงได้ดังสมการที่ (4.12)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{eq}} & 0 & -\left(\frac{r_F}{L_F} + \frac{r_\mu}{L_F}\right) & -\frac{1}{L_F} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_F} & -\frac{1}{RC_F} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

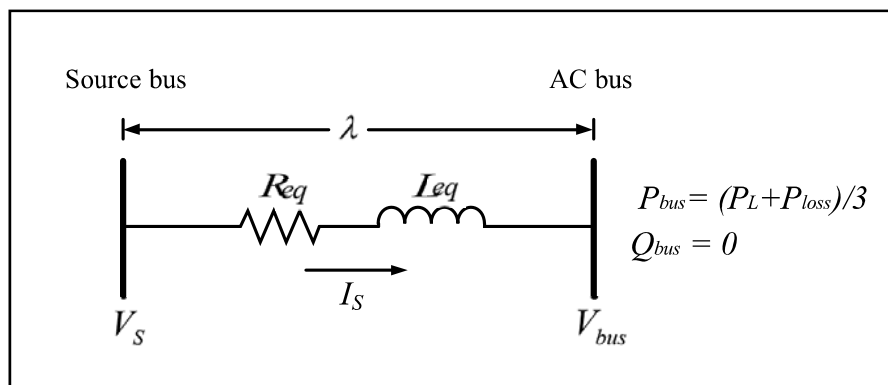
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\cos(\lambda_o)}{L_{eq}} \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sin(\lambda_o)}{L_{eq}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{6 \times 1}$$

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

$$\mathbf{D} = [0]_{1 \times 1}$$
(4.12)

4.3 การคำนวณค่าในสถานะคงตัวสำหรับวงจรกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบ บริดจ์กรณีโหลดตัวต้านทาน

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4.11) และ (4.12) ต้องคำนวณหาค่า λ_o โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะคำนวณค่าดังกล่าวด้วยทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า วิเคราะห์ระบบด้านไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 4.1 พิจารณาวงจรสายส่งหนึ่งเฟส แผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถแสดงดังรูปที่ 4.8 สำหรับตัวเก็บประจุของสายส่งมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา



รูปที่ 4.8 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 4.8 สามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = (P_L + P_{loss})/3 \quad (4.13)$$

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus} \quad (4.14)$$

เมื่อ V_{bus} คือ แรงดันเฟส (rms) ที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC bus) หรือแรงดันอินพุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส λ คือ มุมเฟสการเลื่อนระหว่าง V_s กับ V_{bus} และ $Z \angle \gamma$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยที่ กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยาต่อเฟส พิจารณาที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$P_{bus} = (P_L + P_{loss})/3 \quad (4.15)$$

$$Q_{bus} = 0 \quad (4.16)$$

เมื่อ P_L คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดตัวต้านทาน และ P_{loss} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัวต้านทาน r_F ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.17) และ (4.18) ตามลำดับ สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา กำหนดให้มีค่าเป็น 0 เนื่องจากสมมติฐานของวงจรเรียงกระแสพิจารณาให้กระแสไฟฟ้าอินพุตมีเฟสตรงกับแรงดันไฟฟ้าอินพุต

$$P_L = \frac{V_{out}^2}{R} \quad (4.17)$$

$$P_{loss} = r_F I_{dc}^2 \quad (4.18)$$

โดยที่
$$V_{out} = \frac{E_{dc1} R}{(r_\mu + r_F + R)}$$

$$I_{dc} = \frac{E_{dc1}}{(r_{\mu} + r_F + R)}$$

$$E_{dc1} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi}(\sqrt{2}V_{bus})$$

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

เมื่อ V_{bus} คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรเรียงกระแส และ E_{dc1} คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตขาออกของวงจรเรียงกระแส สำหรับ V_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทาน R จากสมการที่ (4.13) ถึง (4.18) สามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = \frac{1}{3R} \left(\frac{3\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{bus})R}{\pi(r_{\mu} + r_F + R)} \right)^2 + \frac{r_F}{3} \left(\frac{3\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{bus})}{\pi(r_{\mu} + r_F + R)} \right)^2 \quad (4.19)$$

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = 0 \quad (4.20)$$

จากสมการที่ (4.13) และ (4.20) สามารถคำนวณหาผลเฉลยได้โดยวิธีการเชิงตัวเลข นิวตัน-ราฟสัน ซึ่งทำให้ได้ค่า $V_{bus,o}$ และ λ_o ที่สภาวะคงตัว เพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

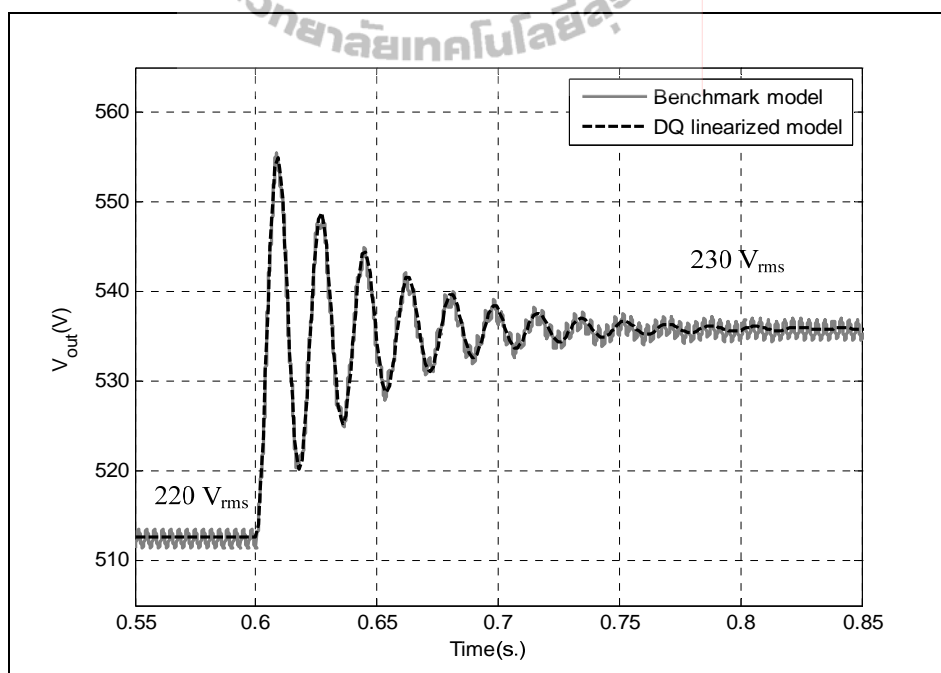
4.4 การตรวจสอบความถูกต้องและการจำลองสถานการณ์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4.11) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 โดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกว่า Benchmark model โดยที่ Benchmark model ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 แสดงไว้ในภาคผนวก ก ในรูปที่ ก.1 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์จะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วย

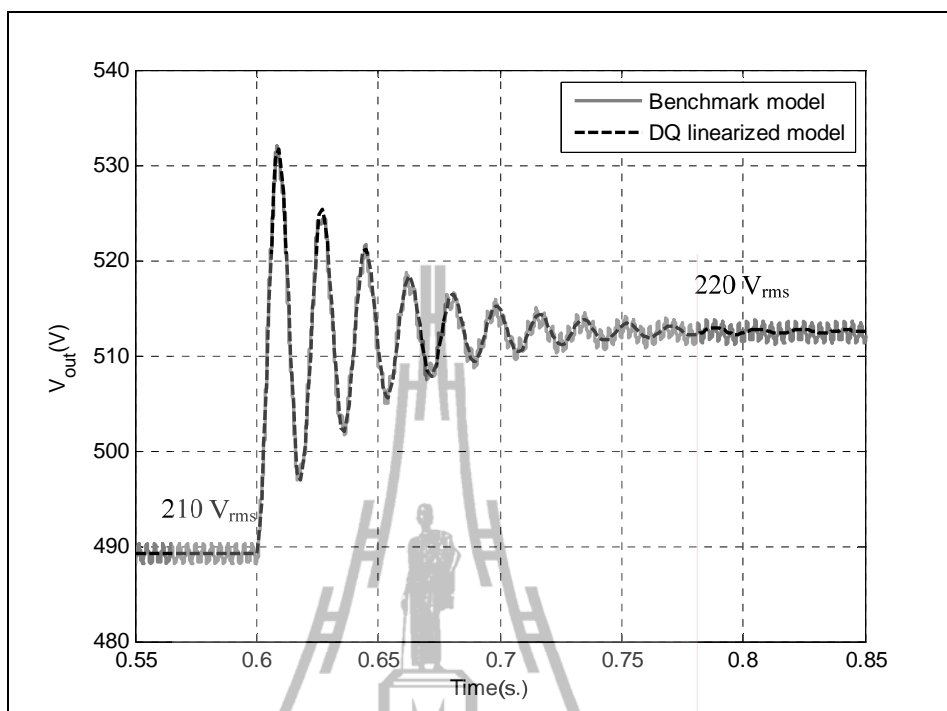
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ จะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ ต้องทำงานในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง (CCM)

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของระบบวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์

พารามิเตอร์	รายละเอียด
ω	$2\pi \times 50$ rad/s
R_{eq}	0.1Ω
L_{eq}	$24 \mu\text{H}$
C_{eq}	2 nF
r_F	0.02Ω
L_F	7.5 mH
C_F	$1000 \mu\text{F}$
R	50Ω



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V_{rms}



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 210 เป็น 220 V_{rms}

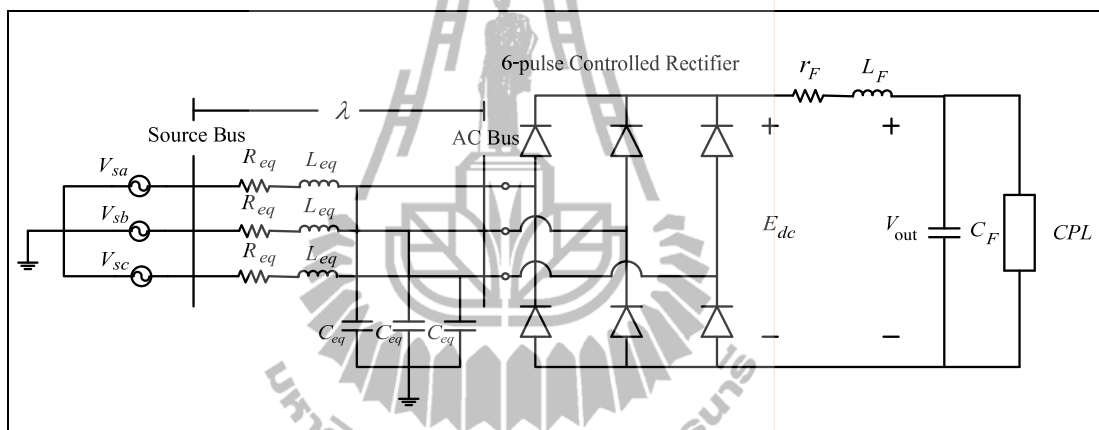
จากรูปที่ 4.9 สังเกตได้ว่าในช่วงเวลา $t=0-0.6$ s รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบ จะอยู่ในสภาวะคงตัว ขณะที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าเท่ากับ 220 V_{rms} ต่อมาในช่วงเวลา หลังจาก $t=0.6$ s แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 230 V_{rms} แบบทันทีทันใด ทำให้รูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเกิดการแกว่งไกว และเข้าสู่สภาวะคงตัว แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแปรค่าตามแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันในรูปที่ 4.10 แหล่งจ่ายเปลี่ยนจาก 210 V_{rms} เป็น 220 V_{rms} โดยผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีการแปลงดีคิวมีความถูกต้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับการ ออกแบบหรือการวิเคราะห์ระบบได้

4.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียง

กระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์

ระบบไฟฟ้าที่ศึกษาในตอนนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สามเฟส สายส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ และวงจรกรอง ซึ่งมีโหลดของระบบเป็น โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยโหลดดังกล่าวมีผลต่อเสถียรภาพของ

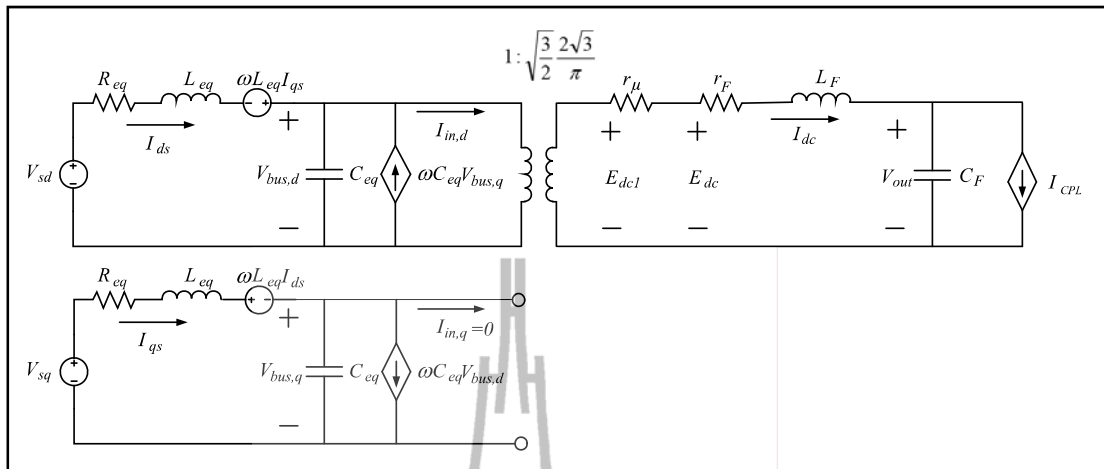
ระบบ(Emadi, Fahimi, and Ehsani, 1999) ซึ่งในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึง การนำแบบจำลองมาใช้ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ (Areerak, Bozhko, Asher, and Thomas, 2008) แบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสเป็นแบบสมมูลสมมูล R_{eq} L_{eq} และ C_{eq} เป็นพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า ส่วนพารามิเตอร์ของวงจรกรองแทนด้วย r_F L_F และ C_F ซึ่งมี E_{dc} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบควบคุมได้ และ V_{out} เป็นแรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตของระบบ ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_F ของวงจรกรอง โดยมีโหลด กำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ P_{CPL} และสำหรับมุมการเปลี่ยนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่าย (Source bus) และบัสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC bus) แทนด้วยค่า λ



รูปที่ 4.11 วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ระบบไฟฟ้าที่ศึกษาในรูปที่ 4.11 สามารถเขียนวงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าบนแกน dq ได้ ดังรูปที่ 4.12 เมื่อวงจรเรียงกระแสสามเฟสสามารถแทนได้ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งได้อธิบาย รายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2 สำหรับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติสามารถพิจารณาเป็น แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแสดงดังสมการที่ (4.21)

$$I_{CPL} = \frac{P_{CPL}}{V_{out}} \quad (4.21)$$



รูปที่ 4.12 วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์บนแกน dq ในรูปแบบอย่างง่าย

4.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและการทำให้เป็นเชิงเส้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถวิเคราะห์ด้วยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) กับวงจรสมมูลในรูปที่ 4.12 สามารถเขียนสมการอนุพันธ์ได้สมการที่ (4.22) จากสมการอนุพันธ์แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบ พบว่าเป็นสมการอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังนั้น ระบบสมการนี้อาจเรียกว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งทำให้การจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์ระบบมีความซับซ้อน จึงมีความจำเป็นต้องทำให้เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยการทำให้เป็นเชิงเส้นของเทย์เลอร์ ซึ่งพิจารณาเทอมแรกเท่านั้น ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก หรือสมการอนุพันธ์เชิงเส้นที่พิจารณารอบจุดปฏิบัติการ

$$\begin{aligned}
\bullet \quad I_{ds} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
\bullet \quad I_{qs} &= -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
\bullet \quad V_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
\bullet \quad V_{bus,q} &= -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\
\bullet \quad I_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_F} V_{bus,d} - \left(\frac{r_F}{L_F} + \frac{r_\mu}{L_F} \right) I_{dc} - \frac{1}{L_F} V_{out} \\
\bullet \quad V_{out} &= \frac{1}{C_F} I_{dc} - \frac{1}{C_F} \frac{P_{CPL}}{V_{out}}
\end{aligned} \tag{4.22}$$

กำหนด ตัวแปรสถานะ อินพุต และเอาต์พุต ดังสมการ

$$\begin{aligned}
\text{ตัวแปรสถานะ : } \mathbf{x} &= [I_{ds} \quad I_{qs} \quad V_{bus,d} \quad V_{bus,q} \quad I_{dc} \quad V_{out}]^T \\
\text{อินพุต : } \mathbf{u} &= [V_m \quad P_{CPL}]^T \\
\text{เอาต์พุต : } \mathbf{y} &= [V_{out}]
\end{aligned} \tag{4.23}$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นของสมการที่ (4.22) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\delta \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\
\delta \mathbf{y} &= \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u}
\end{aligned} \tag{4.24}$$

$$\text{เมื่อ } \delta \mathbf{x} = [\delta I_{ds} \quad \delta I_{qs} \quad \delta V_{bus,d} \quad \delta V_{bus,q} \quad \delta I_{dc} \quad \delta V_{out}]^T$$

$$\delta \mathbf{u} = [\delta V_m \quad \delta P_{CPL}]^T, \quad \delta \mathbf{y} = [\delta V_{out}]$$

สำหรับรายละเอียดเมตริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)$ $\mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)$ $\mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)$ เป็นดังสมการที่ (4.25)

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{eq}} & 0 & -\left(\frac{r_F}{L_F} + \frac{r_\mu}{L_F}\right) & -\frac{1}{L_F} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_F} & \frac{P_{CPL}}{C_F V_{out,o}^2} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\cos(\lambda_o)}{L_{eq}} & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sin(\lambda_o)}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_F V_{out,o}} \end{bmatrix}_{6 \times 2}$$

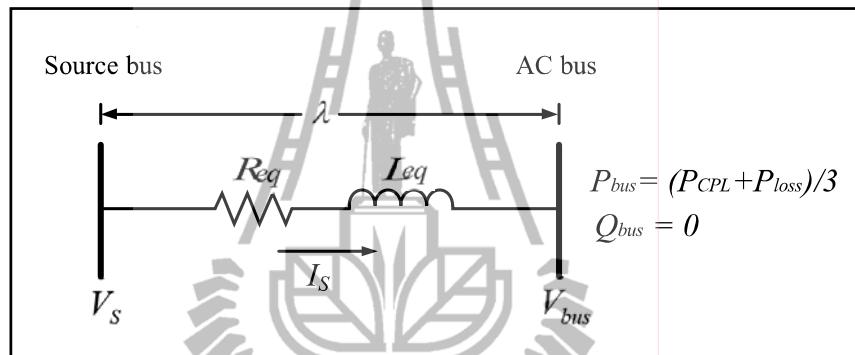
$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]_{1 \times 6}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = [0 \ 0]_{1 \times 2} \quad (4.25)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4.24) และ (4.25) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยการทำให้เป็นเชิงเส้นของเทย์เลอร์แล้ว สังเกตได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับจุดการทำงาน ซึ่งการระบุสถานะของจุดการทำงานจะขึ้นอยู่กับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งในที่นี่คือค่า P_{CPL}

4.7 การคำนวณค่าในสถานะคงตัว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 4.6 เป็นแบบจำลองที่ได้มาจากการทำให้เป็นเชิงเส้นซึ่งพิจารณาการรอบจุดการทำงาน โดยต้องกำหนดค่า $V_{out,o}$ และ λ_o สำหรับการจำลองสถานการณ์ขนาดเล็กและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถนำมาวิเคราะห์ระบบด้านไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อคำนวณค่าในสถานะคงตัวได้ วงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟสของระบบในรูปแบบที่ 4.11 สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.13 ตัวเก็บประจุในสายส่งกำลังไฟฟ้ามีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณาเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ



รูปที่ 4.13 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 4.13 สามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = P_{bus} \quad (4.26)$$

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus} \quad (4.27)$$

โดยที่ $P_{bus} = (P_{CPL} + P_{loss})/3$ และ $Q_{bus} = 0$

เมื่อ P_{CPL} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวที่ไหลของระบบ และ P_{loss} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจาก r_F สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏกำหนดให้มีค่าเป็น 0 เนื่องจากสมมติฐานของวงจรเรียงกระแส

พิจารณาให้กระแสไฟฟ้าอินพุตมีเฟสตรงกับแรงดันไฟฟ้าอินพุต จากสมการที่ (4.26) และ สมการที่ (4.27) สามารถคำนวณค่า $V_{bus,o}$ และ λ_o ที่สถานะคงตัวได้โดยวิธีเชิงตัวเลขนิวตันราฟสัน $V_{out,o}$ สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4.24) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_{out,o} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot (\sqrt{2}V_{bus,o}) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,o} - r_F I_{dc,o} \quad (4.28)$$

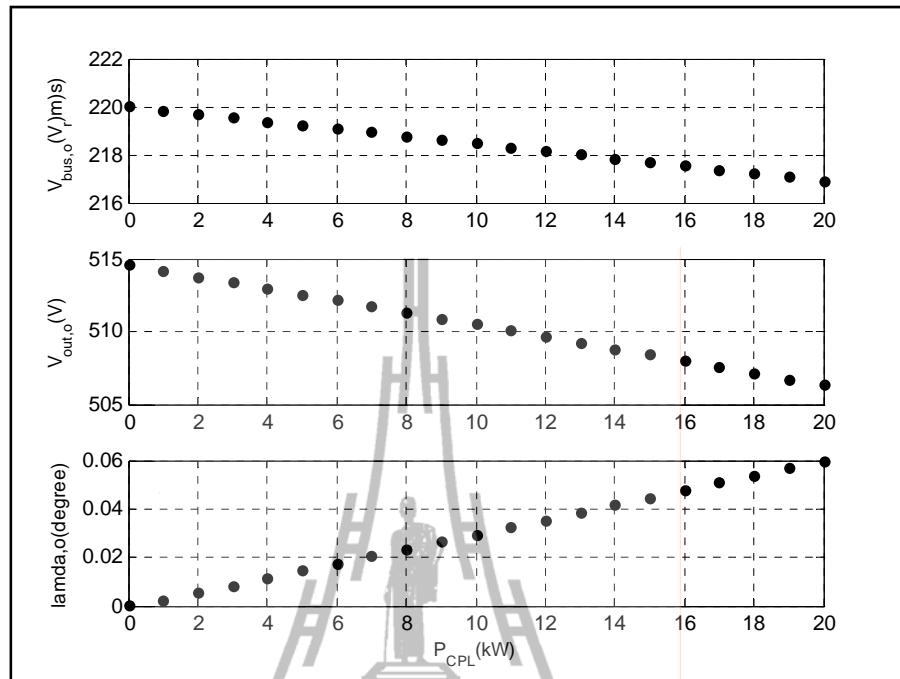
โดยที่

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

$$Z = \sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \right)$$

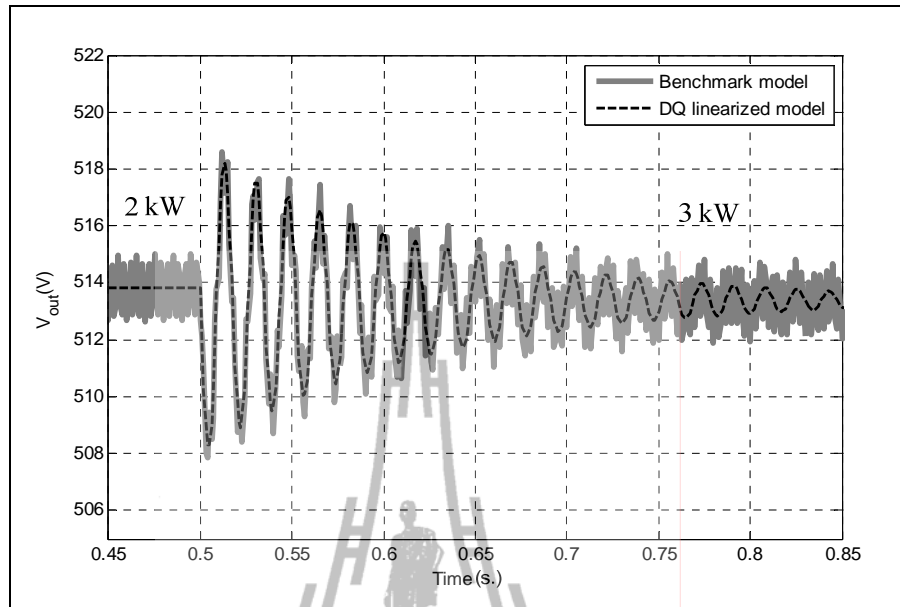
จากสมการที่ (4.26) (4.27) และ (4.28) ค่าสถานะคงตัวเปลี่ยนแปลงเมื่อจุดการทำงานจากระบบเปลี่ยน ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงของ P_{CPL} ดังนั้น สามารถคำนวณค่าสถานะคงตัวในแต่ละจุดการทำงานจากระบบในรูปแบบที่ 4.11 สำหรับค่าสถานะคงตัวจากการหาผลเฉลยของสมการที่ (4.26) (4.27) และ (4.28) เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบตัวอย่างดังตารางที่ 4.1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14



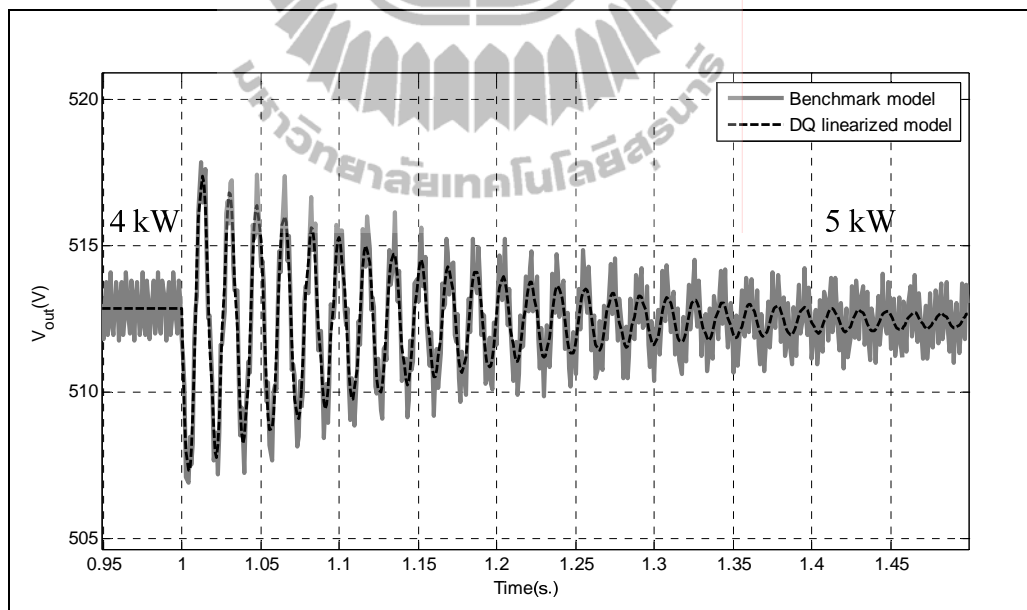
รูปที่ 4.14 ผลเฉลยค่าสถานะคงตัวของ $V_{bus,o}$, $V_{out,o}$ และ λ_o เมื่อ P_{CPL} เปลี่ยนแปลง

4.8 การจำลองสถานการณ์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4.24) และรายละเอียดของเมตริกซ์ในสมการที่ (4.25) เป็นแบบจำลองของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.11 โดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกว่า Benchmark model โดยที่ Benchmark model ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.11 แสดงไว้ในภาคผนวก ก. ในรูปที่ ก.2 ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4.24) พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4.1 ขณะที่โหลดตัวต้านทานของระบบจะถูกแทนที่ด้วยโหลดกำลังไฟฟ้คงตัว และมีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ $V_s = 220 \text{ V}_{\text{rms}}$ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ จะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ ต้องทำงานในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง (CCM)



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จาก 2 kW เป็น 3 kW



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จาก 4 kW เป็น 5 kW

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงผลตอบสนองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.11 ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4.24) (DQ linearized

model) โดยรูปที่ 4.15 แสดงผลตอบสนองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ขณะที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) มีการเปลี่ยนแปลงจาก 2 kW เป็น 3 kW ที่เวลา $t = 0.5$ s ในทำนองเดียวกัน สำหรับรูปที่ 4.16 เป็นผลตอบสนองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเปลี่ยนจาก 4 kW เป็น 5 kW ที่เวลา $t = 1$ s ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ สังกัดได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการอธิบายไว้ในข้างต้นมีความถูกต้องทั้งสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้

4.9 การวิเคราะห์เสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.11 เนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีผลต่อเสถียรภาพของระบบซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 1 จึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.8 ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่รับการพิสูจน์ด้วยวิธีการแปลงคิควมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยทฤษฎีบทการหาค่าเจาะจง ซึ่งค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์ $A(x_0, u_0)$ ตามสมการที่ (4.29)

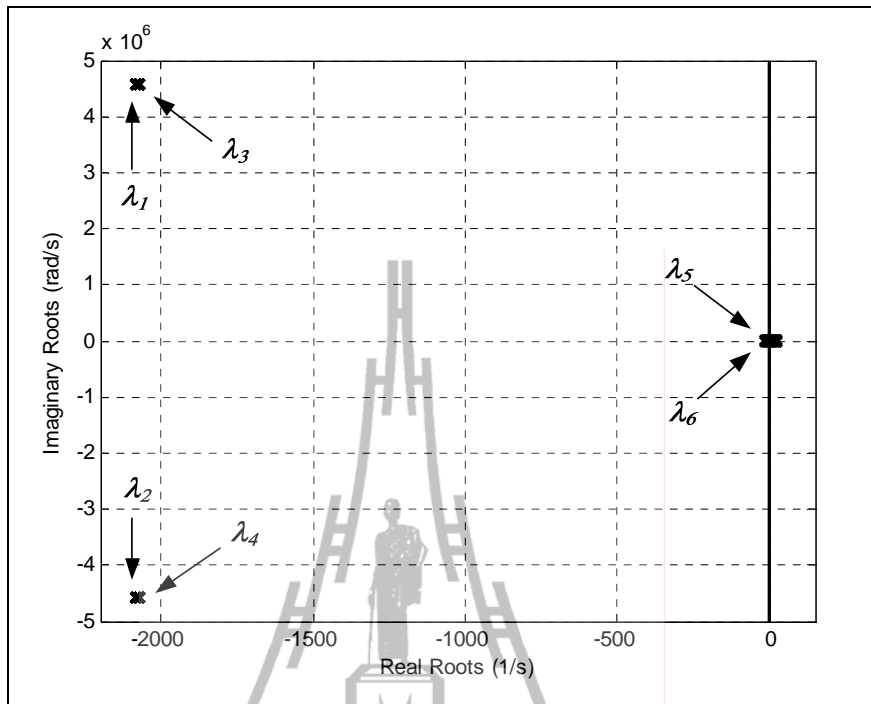
$$\det[\lambda I - A] = 0 \quad (4.29)$$

ระบบจะยังคงมีเสถียรภาพ ถ้า

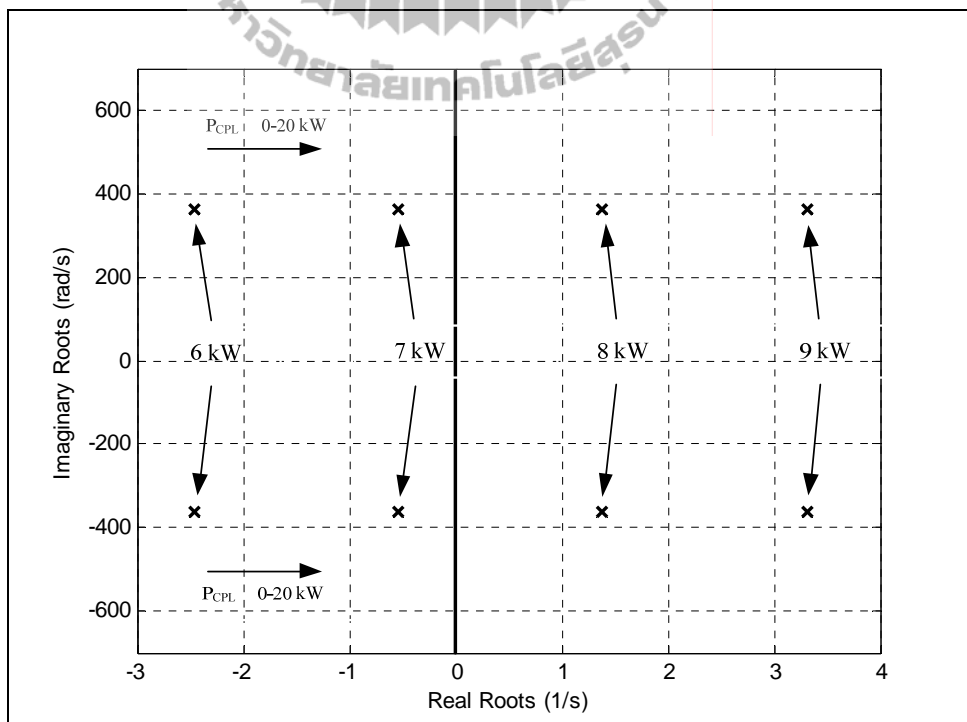
$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (4.30)$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ($n =$ จำนวนตัวแปรสถานะ)

การวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบในรูปที่ 4.11 จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งคำนวณค่าเจาะจงของเมตริกซ์ $A(x_0, u_0)$ โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.1 สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าว พิจารณาให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเปลี่ยนค่าจาก 0 kW ถึง 20 kW ดังแสดงในรูปที่ 4.17 สำหรับรูปที่ 4.18 แสดงภาพขยายของค่าเจาะจง (λ_5 และ λ_6) พบว่า ระบบจะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 7 kW สำหรับกรณีศึกษา

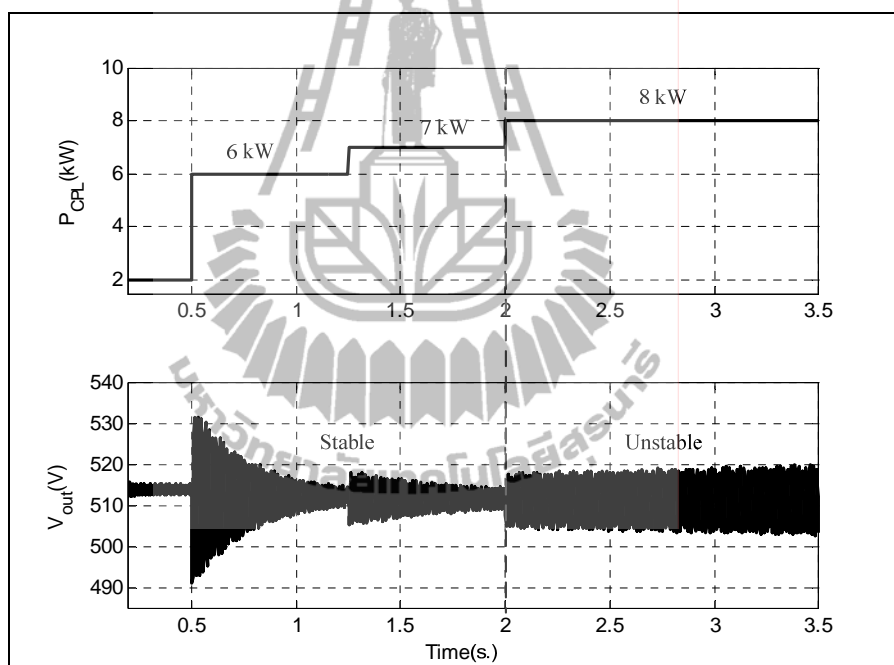


รูปที่ 4.17 ค่าเจาะจงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 4.18 ภาพขยายพื้นที่สำคัญจากรูปที่ 4.17 (λ_5 และ λ_6)

ค่าเจาะจง λ_1 - λ_4 ในรูปที่ 4.17 มีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ L_{eq} และ C_{eq} ของระบบ โดยตำแหน่งค่าเจาะจงจะอยู่ใกล้กับความถี่ธรรมชาติ $1/\sqrt{L_{eq}C_{eq}}$ ($\sim 4.56 \times 10^6$ ตามพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 4.1) ในทำนองเดียวกัน ค่าเจาะจงเด่น λ_5 และ λ_6 จะมีความสัมพันธ์กับ L_F และ C_F โดยมีตำแหน่งที่ $1/\sqrt{L_F C_F}$ (~ 365.148) ดังนั้น พารามิเตอร์ของวงจรกรองกำลังไฟฟ้ากระแสตรง มีความสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบ เพื่อเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยในรูปที่ 4.19 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การขาดเสถียรภาพของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลที่เกิดขึ้น พบว่า ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 8 kW ซึ่งมีค่าเท่ากับการวิเคราะห์เสถียรภาพจากทฤษฎีค่าเจาะจงดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.18

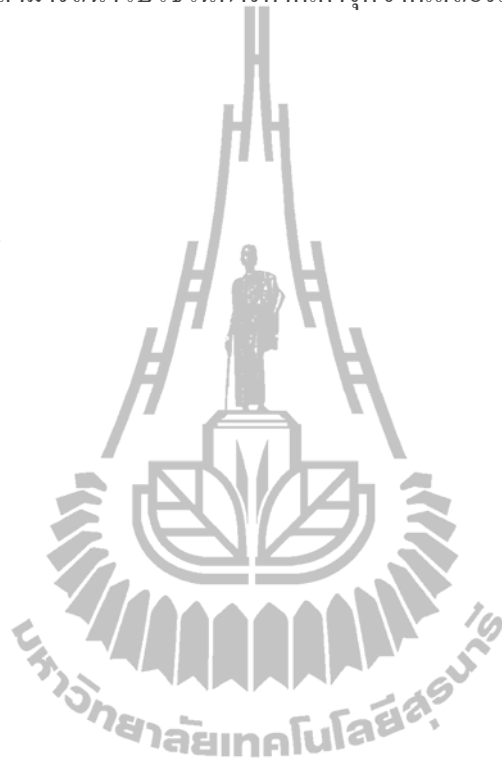


รูปที่ 4.19 ผลการจำลองสถานการณ์การขาดเสถียรภาพ

4.10 สรุป

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ โดยวิธีการแปลงดีคิว ซึ่งเป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยลดความซับซ้อนของระบบไฟฟ้าสามเฟส สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องของระบบเพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์ระบบได้ สำหรับโหลดของระบบพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ กรณีโหลดตัวต้านทาน และ กรณีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

นี้จะศึกษาเกี่ยวกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อเสถียรภาพของระบบเป็นสำคัญ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีการแปลงคิวิ สามารถนำไปใช้ในการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพ เนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้อย่างถูกต้อง



บทที่ 5

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบควบคุมได้กรณีไม่มีตัวควบคุม

5.1 บทนำ

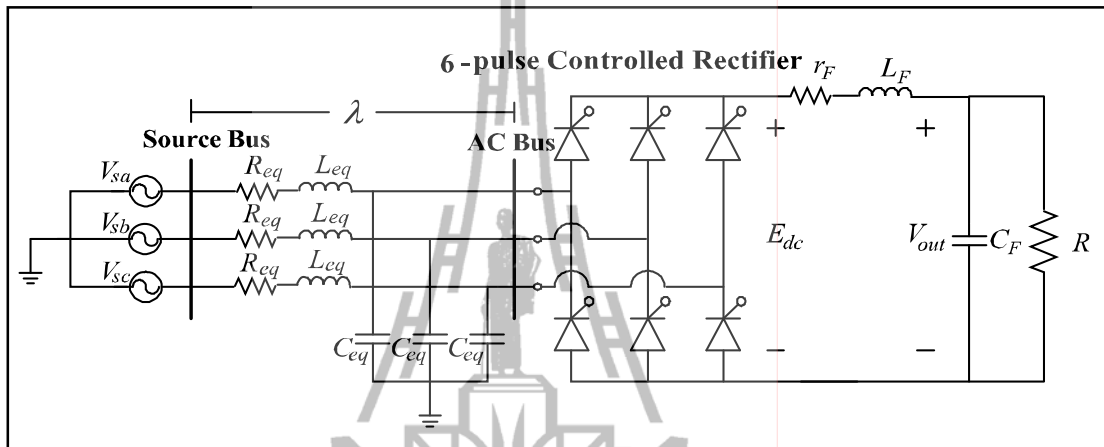
ปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า และโหลดของวงจรแปลงผันเหล่านี้เมื่อมีการควบคุม ส่วนใหญ่ประพฤติตัวเป็น โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งสามารถลดเสถียรภาพของระบบอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น แบบจำลองของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง จึงมีความสำคัญมากในการจำลองสถานการณ์ การออกแบบ รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะประกอบด้วย 2 ส่วน โดยในส่วนแรกจะเป็นการนำเสนอเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุม ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน โดยอาศัยวิธีการแปลงดีคิวิ สำหรับในส่วนที่สองจะเป็นการนำเสนอเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุม ที่มีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ โดยวิธีการแปลงดีคิวิ และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ทั้งนี้แบบจำลองดังกล่าวมีผลโดยตรงกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ เนื่องจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องและแม่นยำ นอกจากนี้จะนำเสนอ การคำนวณค่าในสภาวะคงตัวเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง รวมถึงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุม ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

ระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษาในส่วนนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุม โดยมีไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรกรองสัญญาณทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง และโหลดตัวต้านทาน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นแบบสมมูล R_{eq} , L_{eq} และ C_{eq} แทนพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า สำหรับพารามิเตอร์ของวงจรกรอง

สัญญาณทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงแทนด้วย $r_F L_F$ และ C_F ในขณะที่ E_{dc} และ V_{out} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_F ของวงจรกรองตามลำดับ และโหลดตัวต้านทาน R มุมการเปลี่ยนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่าย (Source bus) กับบัสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC bus) แทนด้วย λ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.1

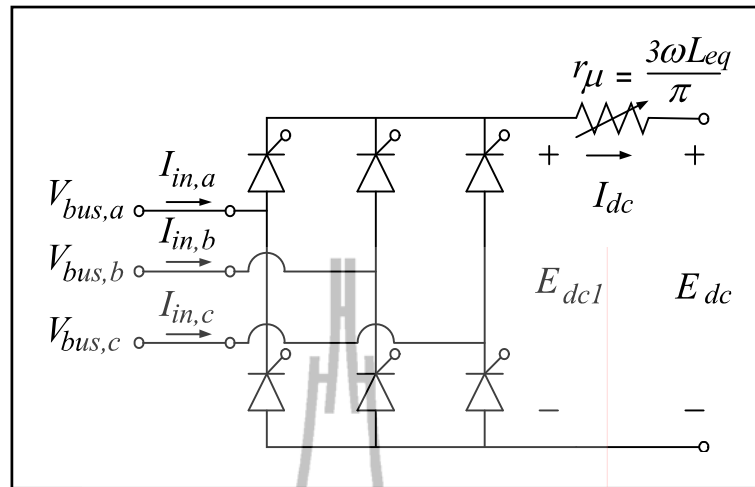


รูปที่ 5.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้กรณีไม่มีตัวควบคุมที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

ผลกระทบจากตัวเหนี่ยวนำ L_{eq} ในสายส่งกำลังไฟฟ้าด้านไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้เกิดมุมความเหลื่อม μ ซึ่งมีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรเรียงกระแสลดลง จากผลกระทบดังกล่าวนี้สามารถพิจารณาแทนได้ด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ r_μ ที่บริเวณด้านไฟฟ้ากระแสตรง (Mohan, Undeland, and Robbins, 2003) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 สำหรับค่าความต้านทานปรับค่าได้จะขึ้นอยู่กับความถี่ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

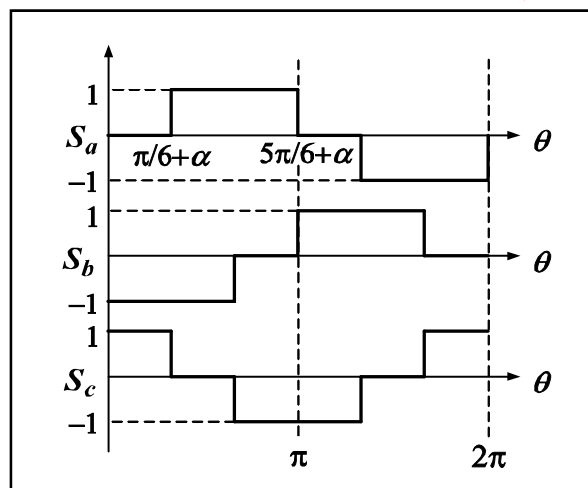
$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (5.1)$$

โดยที่ ω คือ ความถี่ของระบบ



รูปที่ 5.2 วงเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้และความต้านทานปรับค่าได้

จากรูปที่ 5.2 E_{dc1} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ซึ่งไม่พิจารณาผลกระทบของมุมความเหลื่อม ในขณะที่ E_{dc} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรที่พิจารณาผลกระทบของมุมความเหลื่อมด้วยความต้านทานที่ปรับค่าได้ และเนื่องจากพิจารณาผลกระทบของมุมความเหลื่อมด้วย r_{μ} ดังนั้น สัญญาณการสวิตช์ของวงจรดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 เมื่อ α คือ มุมจุดชนวนที่ขาเกทของไทรสเตอร์



รูปที่ 5.3 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้

โดยไม่พิจารณาผลกระทบของมุมความเหลื่อม

ฟังก์ชันของการสวิตชิง S_{abc} ในรูปที่ 5.3 สามารถแสดงได้โดย อนุกรมฟูรีเยร์ (Sakui, Fujita and Shioya, 1989) ซึ่งพิจารณาที่ความถี่มูลฐาน (ไม่พิจารณาฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบ) ฟังก์ชันของการสวิตชิงสามเฟส แสดงได้ตามสมการดังนี้

$$\mathbf{S}_{abc} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi - \alpha) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi - \alpha) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi - \alpha) \end{bmatrix}^T \quad (5.2)$$

โดยที่ ϕ คือ มุมเฟสที่ บัสไฟฟ้ากระแสสลับ

α คือ มุมจุดชนวนของไทริสเตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและ เอาต์พุตของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟส แสดงตามสมการที่ (5.3) และ (5.4) ตามลำดับ

$$\mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{S}_{abc} I_{dc} \quad (5.3)$$

$$E_{dcl} = \mathbf{S}_{abc}^T \mathbf{V}_{bus,abc} \quad (5.4)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ จะพิจารณาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสเป็นแบบสมดุล โดยไม่พิจารณาฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบ และวงจรเรียงกระแสสามเฟสต้องทำงานในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ สามารถแปลงให้อยู่บนแกน dq ซึ่งมีสมการของการแปลงดีคิวดังนี้

$$\mathbf{T}[\theta(t)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta(t)) & \cos(\theta(t) - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta(t) + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta(t)) & -\sin(\theta(t) - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta(t) + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

โดยที่ $\theta(t) = \omega t - \frac{\pi}{2} + \phi_1$

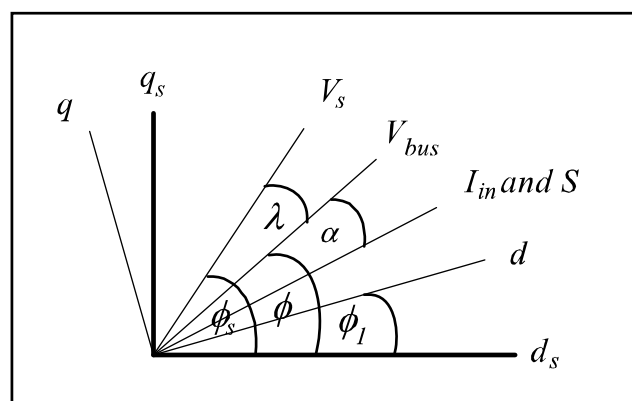
จากสมการที่ (5.2) (5.3) และ (5.4) สามารถแปลงให้อยู่บนแกน dq ด้วยสมการที่ (5.5) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\mathbf{I}_{in,dq} = \mathbf{S}_{dq} I_{dc} \quad (5.6)$$

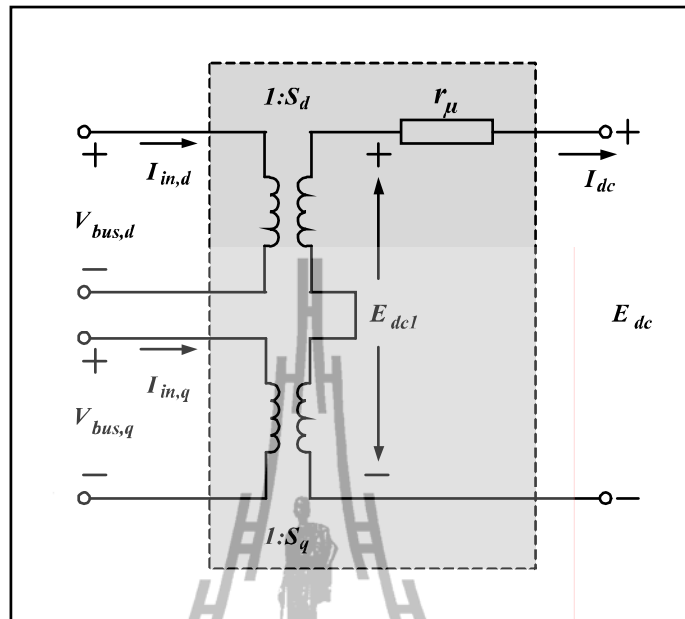
$$E_{dcl} = \mathbf{S}_{dq}^T \mathbf{V}_{bus,dq} \quad (5.7)$$

$$\mathbf{S}_{dq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} [\cos(\phi_1 - \phi + \alpha) \quad -\sin(\phi_1 - \phi + \alpha)]^T \quad (5.8)$$

จากสมการ (5.6) (5.7) และ (5.8) วงจรเรียงกระแสสามเฟส สามารถแทนด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมี s_d และ s_q เป็นอัตราส่วนของหม้อแปลงที่ขึ้นอยู่กับมุมเฟสการเคลื่อนที่ของแกน dq (ϕ) มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ (ϕ) แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิวดังแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 เมื่อ V_s คือ ค่ายอดสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าเฟสที่แหล่งจ่าย I_m คือ ค่ายอดสูงสุดของกระแสไฟฟ้า V_{bus} คือ ค่ายอดสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ และ S คือ ค่ายอดสูงสุดของฟังก์ชันของการสวิตชิง วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้บนแกน dq สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5

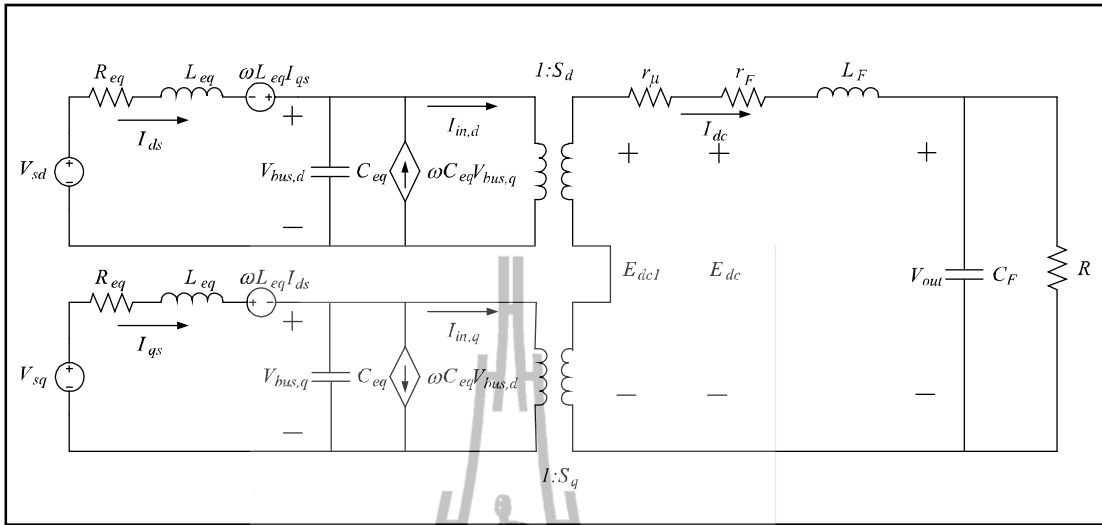


รูปที่ 5.4 แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิวด

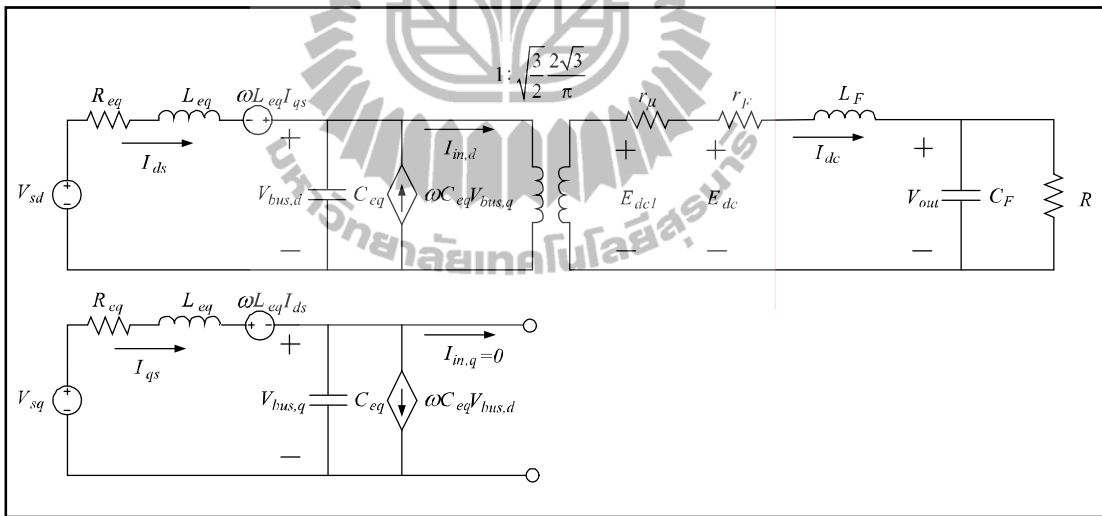


รูปที่ 5.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้บนแกน dq

สำหรับในส่วนของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามารถแปลงวงจรสมมูลจากแกนสามเฟสให้เป็นวงจรสมมูลสองเฟสบนแกน dq ได้ โดยรายละเอียดการแปลงสายส่งกำลังไฟฟ้า (Ong, 1998) ซึ่งประกอบด้วย วงจรอนุกรมตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ ที่ขนานกับตัวเก็บประจุ ได้รับการอธิบายไว้ในบทที่ 3 วงจรสมมูลสายส่งกำลังไฟฟ้าและวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุม สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งสามารถทำให้เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายได้โดยการกำหนดมุมเฟสการหมุนของฟังก์ชันของการสวิตชิง ($\phi = \phi - \alpha$) ทำให้ได้วงจรสมมูลในรูปแบบอย่างง่ายดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.6 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้และโหลดตัวต้านทานบนแกน dq



รูปที่ 5.7 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้บนแกน dq ในรูปแบบอย่างง่าย

จากวงจรสมมูลอย่างง่ายในรูปที่ 5.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) โดยกำหนดตัวแปรสถานะ อินพุต และเอาต์พุต ดังสมการที่ (5.9)

$$\begin{aligned}
 \text{ตัวแปรสถานะ : } \mathbf{x} &= [I_{ds} \ I_{qs} \ V_{bus,d} \ V_{bus,q} \ I_{dc} \ V_{out}]^T \\
 \text{อินพุต : } \mathbf{u} &= [V_m] \\
 \text{เอาต์พุต : } \mathbf{y} &= [V_{out}]
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

สมการอนุพันธ์ แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad \dot{I}_{ds} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
 \bullet \quad \dot{I}_{qs} &= -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
 \bullet \quad \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \bullet \quad \dot{V}_{bus,q} &= -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\
 \bullet \quad \dot{I}_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_F} V_{bus,d} - \left(\frac{r_F}{L_F} + \frac{r_\mu}{L_F} \right) I_{dc} - \frac{1}{L_F} V_{out} \\
 \bullet \quad \dot{V}_{out} &= \frac{1}{C_F} I_{dc} - \frac{1}{RC_F} V_{out}
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

จากสมการอนุพันธ์ในสมการที่ (5.10) สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบปริภูมิสถานะ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\
 \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

เมื่อ $\mathbf{x} = [I_{ds} \ I_{qs} \ V_{bus,d} \ V_{bus,q} \ I_{dc} \ V_{out}]^T$

$$\mathbf{u} = [V_m]$$

$$\mathbf{y} = [V_{out}]$$

สำหรับรายละเอียดของเมตริกซ์ **A** **B** **C** และ **D** แสดงได้ดังสมการที่ (5.12)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{eq}} & 0 & -\left(\frac{r_F}{L_F} + \frac{r_\mu}{L_F}\right) & -\frac{1}{L_F} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_F} & -\frac{1}{RC_F} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

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

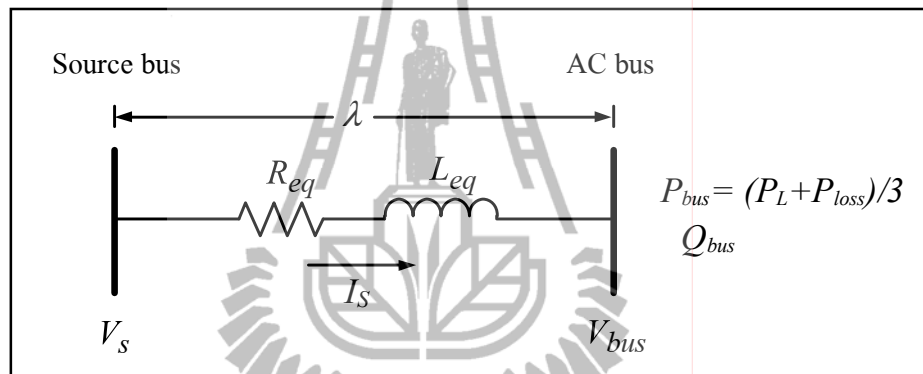
$$\mathbf{C} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]_{1 \times 6}$$

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

(5.12)

5.3 การคำนวณค่าในสถานะคงตัวสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุมและมีโหลดเป็นตัวต้านทาน

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (5.11) และ (5.12) ต้องคำนวณหาค่า λ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะคำนวณค่าดังกล่าวด้วยทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า วิเคราะห์ระบบด้านไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 5.1 พิจารณาวงจรสายส่งหนึ่งเฟส แผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถแสดงดังรูปที่ 5.8 สำหรับตัวเก็บประจุของสายส่งมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณาเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ



รูปที่ 5.8 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 5.8 สามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = P_{bus} \quad (5.13)$$

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus} \quad (5.14)$$

เมื่อ V_{bus} คือ แรงดันเฟส (rms) ที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC bus) หรือแรงดันอินพุทของวงจรเรียงกระแสสามเฟส λ คือ มุมเฟสการเลื่อนระหว่าง V_s กับ V_{bus} และ $Z \angle \gamma$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยที่กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าปรากฏต่อเฟส พิจารณาที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$P_{bus} = V_{bus} I_{bus} \cos \alpha \quad (5.15)$$

$$Q_{bus} = V_{bus} I_{bus} \sin \alpha \quad (5.16)$$

โดยที่ $P_{bus} = \frac{(P_L + P_{loss})}{3}$

$$Q_{bus} = \frac{(P_L + P_{loss})}{3} \tan \alpha$$

เมื่อ P_L คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่โหลดตัวต้านทาน R และ P_{loss} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัวต้านทาน r_F ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.17) และ (5.18) ตามลำดับ ดังนี้

$$P_L = \frac{V_{out}^2}{R} \quad (5.17)$$

$$P_{loss} = r_F I_{dc}^2 \quad (5.18)$$

โดยที่ $V_{out} = \frac{E_{dc1} R}{(r_\mu + r_F + R)}$

$$I_{dc} = \frac{E_{dc1}}{(r_\mu + r_F + R)}$$

$$E_{dc1} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2} V_{bus}) \cos(\alpha)$$

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

เมื่อ V_{bus} คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรเรียงกระแส และ E_{dcl} คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตขาออกของวงจรเรียงกระแส สำหรับ V_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทาน R จากสมการที่ (5.13) ถึง (5.18) สามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = \frac{1}{3R} \left(\frac{3\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{bus}) \cos(\alpha) R}{\pi(r_\mu + r_F + R)} \right)^2 + \frac{r_F}{3} \left(\frac{3\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{bus}) \cos(\alpha)}{\pi(r_\mu + r_F + R)} \right)^2 \quad (5.19)$$

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = \left(\frac{1}{3R} \left(\frac{3\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{bus}) \cos(\alpha) R}{\pi(r_\mu + r_F + R)} \right)^2 + \frac{r_F}{3} \left(\frac{3\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{bus}) \cos(\alpha)}{\pi(r_\mu + r_F + R)} \right)^2 \right) \tan \alpha \quad (5.20)$$

จากสมการที่ (5.19) และ (5.20) สามารถคำนวณหาผลเฉลยได้โดยวิธีการเชิงตัวเลข นิวตัน-ราฟสัน ซึ่งทำให้ได้ค่า $V_{bus,o}$ และ λ_o ที่สภาวะคงตัว เพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์ โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การคำนวณค่าในสภาวะคงตัวสำหรับระบบในบทนี้ สังเกตได้ว่าค่า Q_{bus} จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์เหมือนกับการคำนวณในบทที่ 4 แต่จะมีค่าขึ้นอยู่กับมุม α รายละเอียดของโปรแกรมการคำนวณหาผลเฉลยแสดงไว้ในภาคผนวก ข

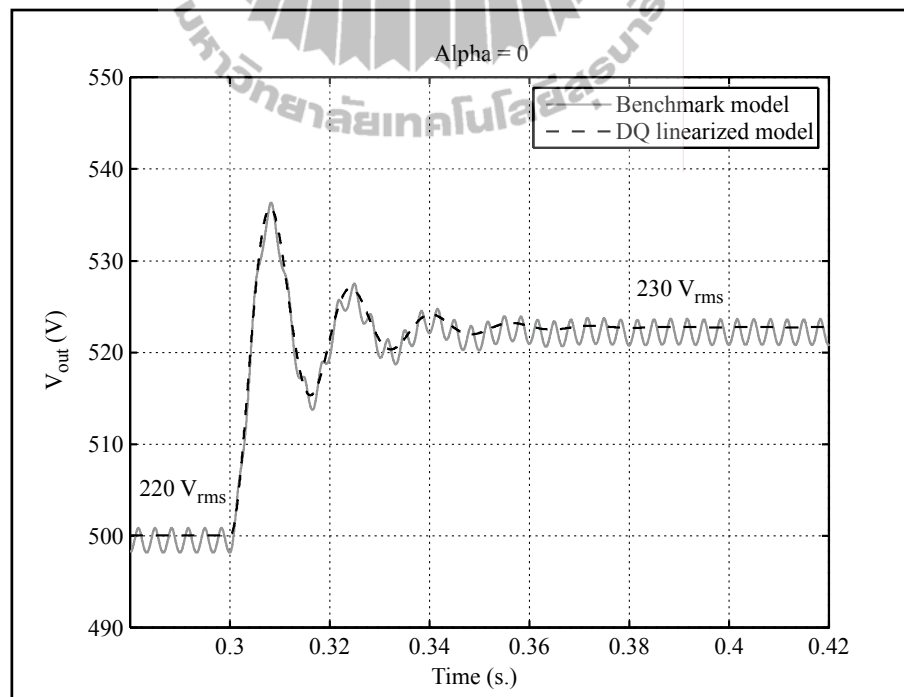
5.4 การตรวจสอบความถูกต้องและการจำลองสถานการณ์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (5.11) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 โดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกว่า Benchmark model โดยที่ Benchmark model ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 แสดงไว้ในภาคผนวก ก ในรูปที่ ก.4 ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์จะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งมีค่าแตกต่างจากพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ในบทที่ 4 เนื่องจากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้สามารถปรับค่ามุม α ซึ่งการปรับมุม α ให้มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสมีค่าลดลง ทำให้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ

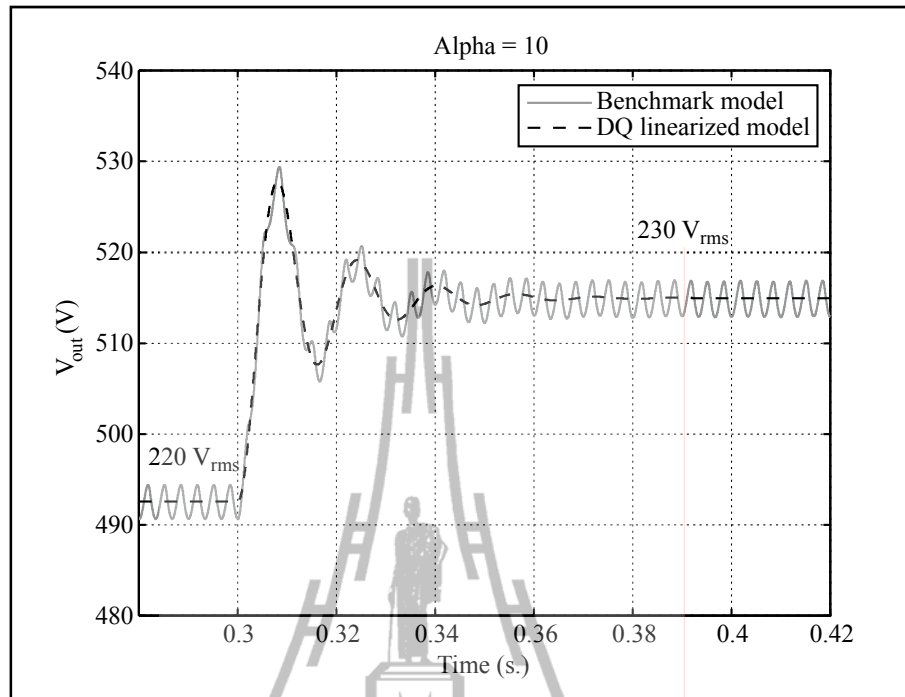
ควบคุมได้ง่ายต่อการทำงานในโหมดนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอยู่นอกเหนือสมมติฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ที่ค่า α ค่าต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5.9 ถึง 5.13

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของระบบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้กรณีไม่มีตัวควบคุม

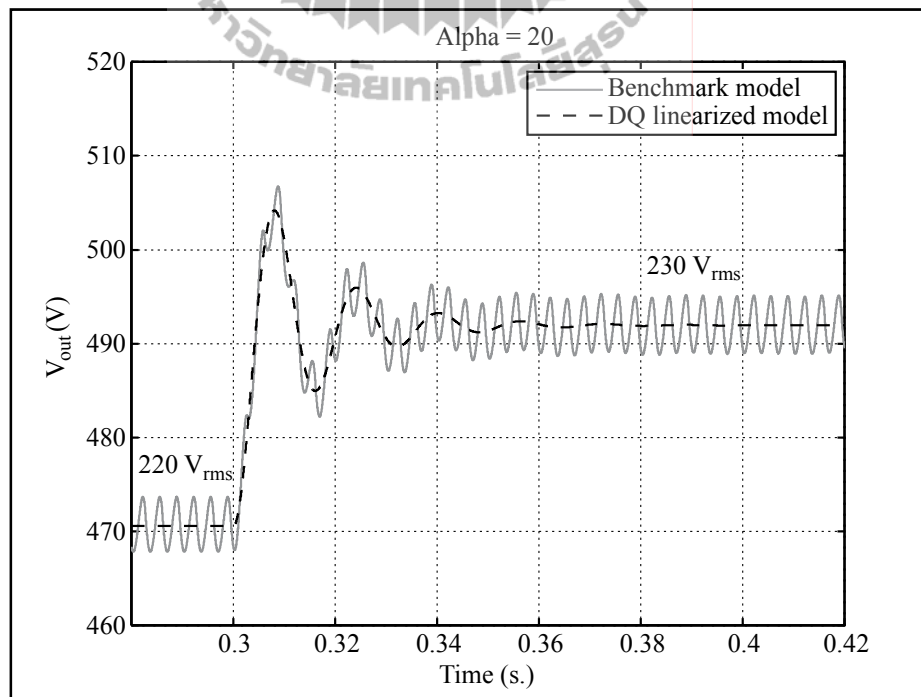
พารามิเตอร์	รายละเอียด
ω	$2\pi \times 50$ rad/s
R_{eq}	0.15 Ω
L_{eq}	30 μ H
C_{eq}	2 nF
r_F	0.3 Ω
L_F	6.5 mH
C_F	1000 μ F
R	20 Ω



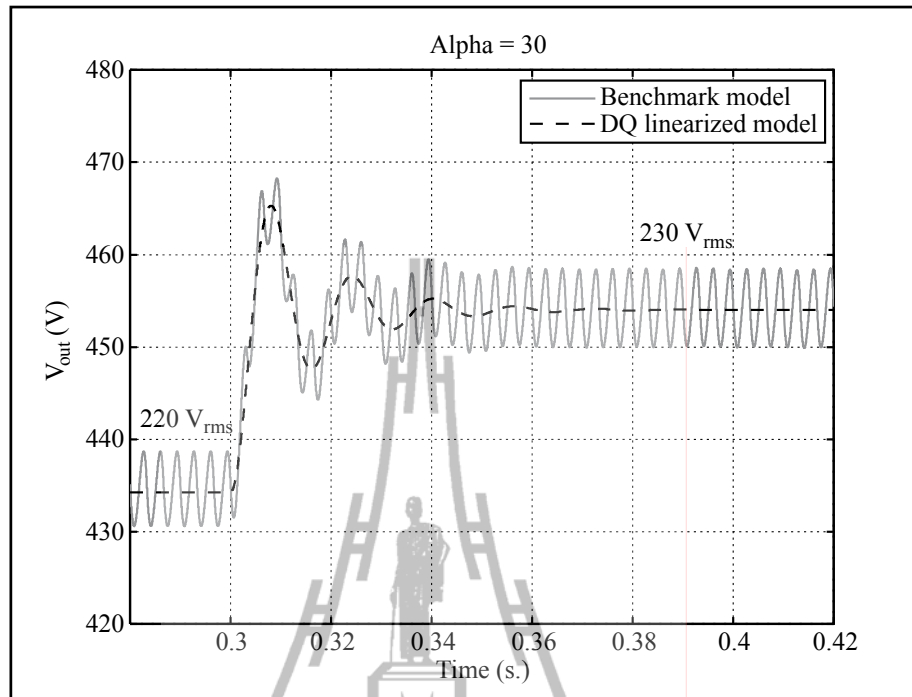
รูปที่ 5.9 การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V_{rms} เมื่อมุม $\alpha = 0$ องศา



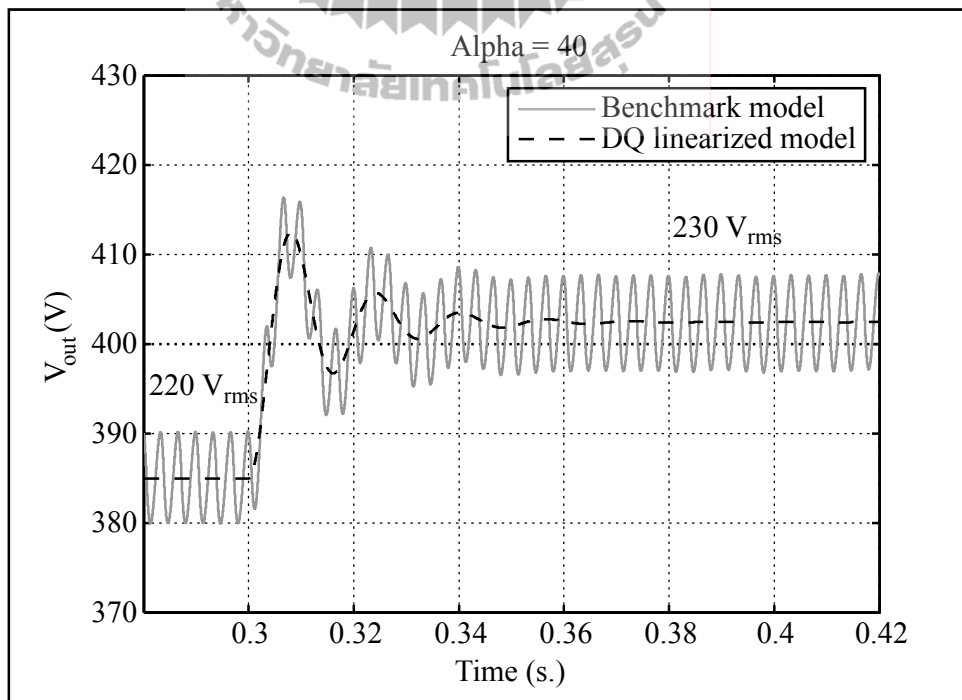
รูปที่ 5.10 การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V_{rms} เมื่อมุม $\alpha = 10$ องศา



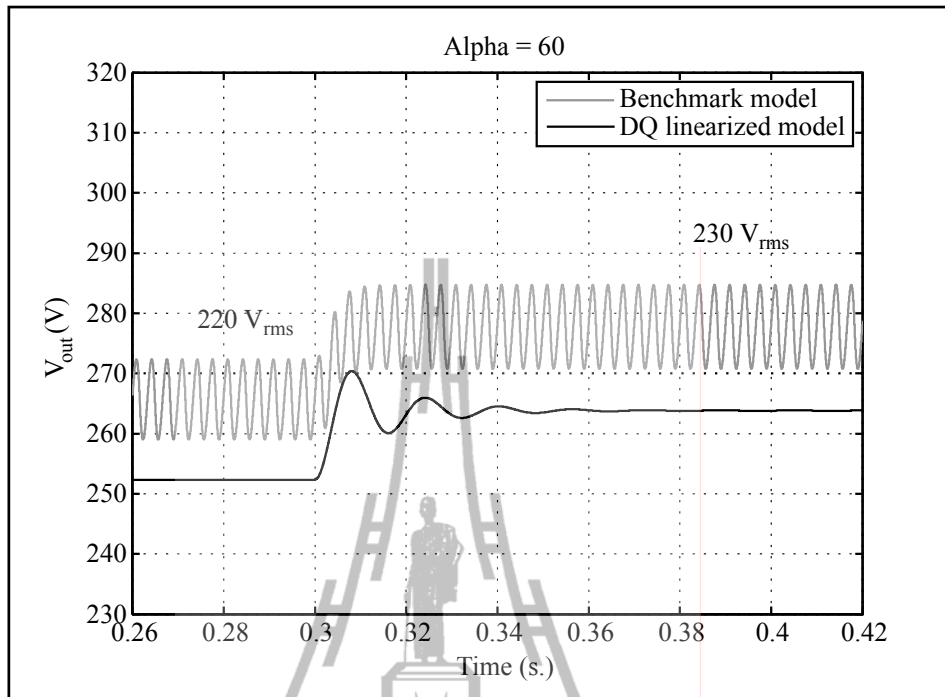
รูปที่ 5.11 การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V_{rms} เมื่อมุม $\alpha = 20$ องศา



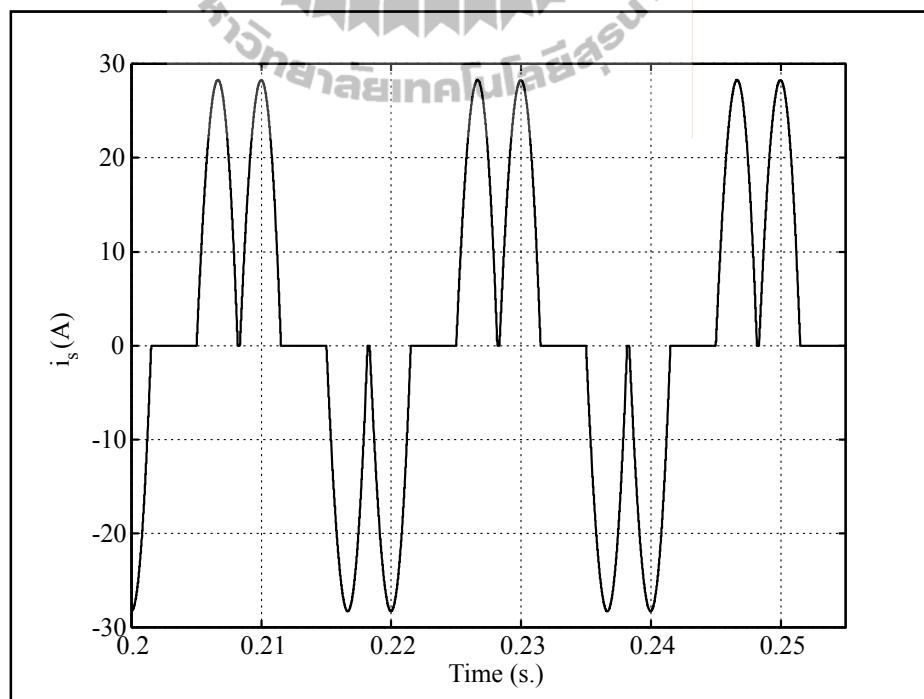
รูปที่ 5.12 การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V_{rms} เมื่อมุม $\alpha = 30$ องศา



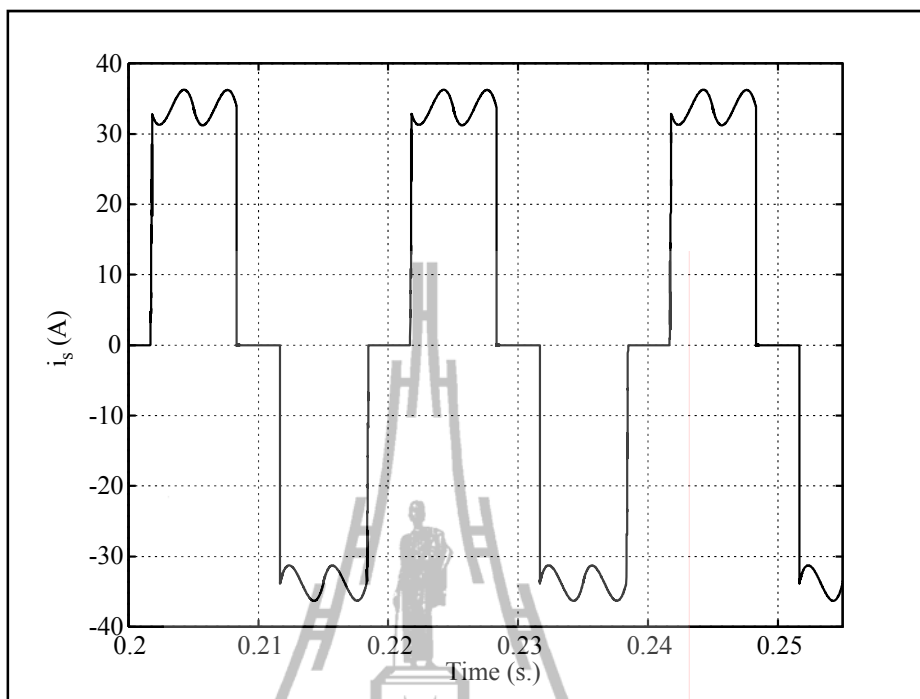
รูปที่ 5.13 การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V_{rms} เมื่อมุม $\alpha = 40$ องศา



รูปที่ 5.14 การเปลี่ยนแปลงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (V_s) จาก 220 เป็น 230 V_{rms} เมื่อมุม $\alpha = 60$ องศา



รูปที่ 5.15 กระแสไฟฟ้ากระแสสลับเฟส a ในโหมดนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง



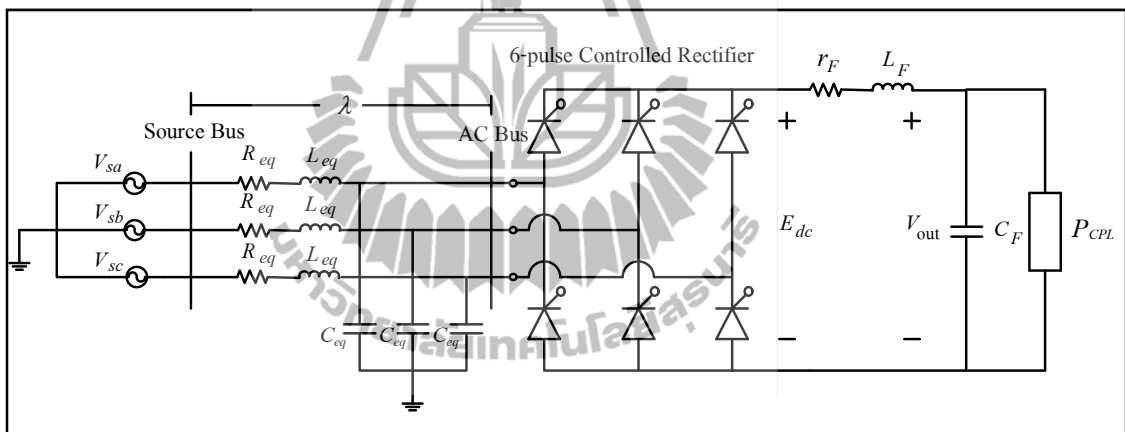
รูปที่ 5.16 กระแสไฟฟ้ากระแสสลับเฟส a ในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง

จากรูปที่ 5.9 ถึง รูปที่ 5.13 แสดงรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 ซึ่งจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (5.11) เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก $220 V_{\text{rms}}$ เป็น $230 V_{\text{rms}}$ ที่เวลา $t = 0.3$ วินาที สำหรับมุม α เท่ากับ 0 10 20 30 และ 40 องศา ตามลำดับ การดำเนินการเปลี่ยนค่าแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีการแปลงดีคิวมีความถูกต้องทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว ในกรณีที่มุม α มีค่ามากกว่า 40 องศา ซึ่งในที่นี้แสดงค่า α เท่ากับ 60 องศา จะมีผลไม่ตรงกับการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.14 เนื่องจากสถานะการทำงานดังกล่าว วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ จะมีการทำงานในโหมดนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous conduction mode : DCM) ซึ่งมีรูปสัญญาณของกระแสสามเฟส (สำหรับเฟส a) แสดงดังรูปที่ 5.15 สำหรับกรณีโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่องจะมีรูปสัญญาณของกระแสสามเฟส (กรณีเฟส a) แสดงดังรูปที่ 5.16

5.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียง

กระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุม

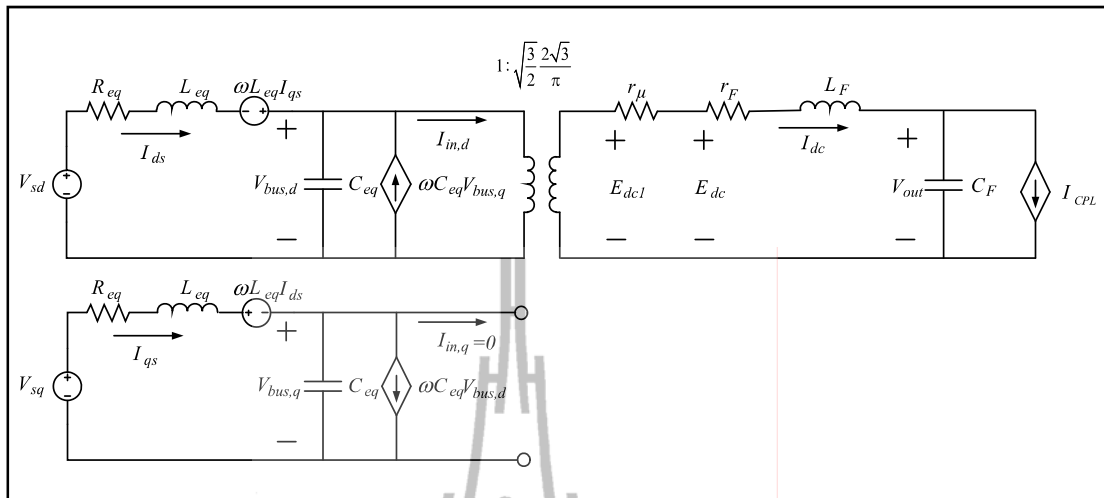
ระบบไฟฟ้าที่ศึกษาในตอนนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.17 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส สายส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งเชื่อมต่อกับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ และวงจรกรอง ซึ่งมีโหลดของระบบเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสเป็นแบบสมมูล R_{eq} L_{eq} และ C_{eq} เป็นพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า ส่วนพารามิเตอร์ของวงจรกรองแทนด้วย r_F L_F และ C_F ซึ่งมี E_{dc} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบควบคุมได้ และ V_{out} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบ ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_F ของวงจรกรอง โดยมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบออคติ P_{CPL} สำหรับมุมการเปลี่ยนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่าย (source bus) และบัสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC bus) แทนด้วยค่า λ



รูปที่ 5.17 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้กรณีไม่มีตัวควบคุมและโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ระบบไฟฟ้าที่ศึกษาในรูปที่ 5.17 สามารถแปลงเป็นวงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าบนแกน dq ได้ดังรูปที่ 5.18 เมื่อวงจรเรียงกระแสสามเฟสสามารถแทนได้ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.2 สำหรับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบออคติสามารถพิจารณาเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแสดงดังสมการที่ (5.21)

$$I_{CPL} = \frac{P_{CPL}}{V_{out}} \quad (5.21)$$



รูปที่ 5.18 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้บนแกน dq ในรูปแบบอย่างง่าย

5.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและการทำให้เป็นเชิงเส้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถวิเคราะห์ด้วยกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) กับวงจรสมมูลในรูปที่ 5.18 ซึ่งสามารถเขียนสมการอนุพันธ์ได้ดังสมการที่ (5.22) จากสมการอนุพันธ์แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบ พบว่าเป็นสมการอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากโพลก่าลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังนั้น ระบบสมการนี้อาจเรียกว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งทำให้การจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบมีความซับซ้อน จึงมีความจำเป็นต้องทำให้เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยการทำให้เป็นเชิงเส้นของเทย์เลอร์ ซึ่งพิจารณาเทอมแรกเท่านั้น ในลักษณะเช่นเดียวกับบทที่ 4 ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก หรือสมการอนุพันธ์เชิงเส้นที่พิจารณารอบจุดการทำงาน

$$\begin{aligned}
\bullet \quad I_{ds} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
\bullet \quad I_{qs} &= -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
\bullet \quad V_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
\bullet \quad V_{bus,q} &= -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\
\bullet \quad I_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_F} V_{bus,d} - \left(\frac{r_F}{L_F} + \frac{r_\mu}{L_F} \right) I_{dc} - \frac{1}{L_F} V_{out} \\
\bullet \quad V_{out} &= \frac{1}{C_F} I_{dc} - \frac{1}{C_F} \frac{P_{CPL}}{V_{out}}
\end{aligned} \tag{5.22}$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (5.22) เมื่อผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น แบบจำลองที่ทำให้เป็นเชิงเส้น สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\dot{\delta \mathbf{x}} &= \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\
\delta \mathbf{y} &= \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u}
\end{aligned} \tag{5.23}$$

เมื่อ $\delta \mathbf{x} = [\delta I_{ds} \quad \delta I_{qs} \quad \delta V_{bus,d} \quad \delta V_{bus,q} \quad \delta I_{dc} \quad \delta V_{out}]^T$

$$\delta \mathbf{u} = [\delta V_m \quad \delta P_{CPL}]^T, \quad \delta \mathbf{y} = [\delta V_{out}]$$

สำหรับรายละเอียดเมตริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{eq}} & 0 & -\left(\frac{r_F}{L_F} + \frac{r_\mu}{L_F}\right) & -\frac{1}{L_F} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_F} & \frac{P_{CPL}}{C_F V_{out,o}^2} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\cos(\lambda_o + \alpha)}{L_{eq}} & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sin(\lambda_o + \alpha)}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_F V_{out,o}} \end{bmatrix}_{6 \times 2}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]_{1 \times 6}$$

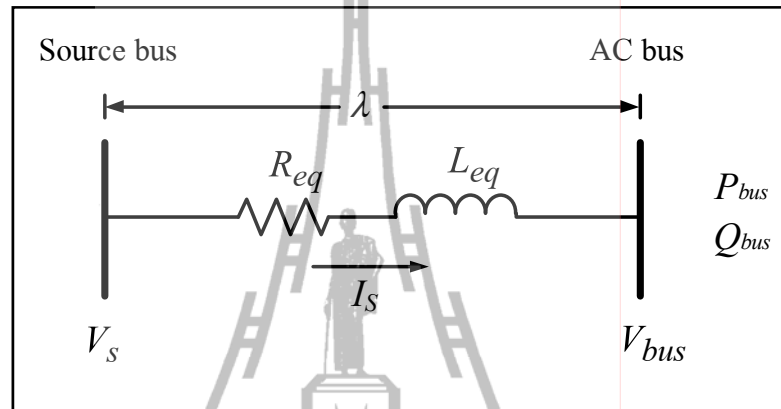
$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = [0 \ 0]_{1 \times 2} \quad (5.24)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (5.23) และ (5.24) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยการทำให้เป็นเชิงเส้นของเทย์เลอร์แล้ว สังเกตได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับจุดการทำงาน ซึ่งการระบุสถานะของจุดการทำงานจะขึ้นอยู่กับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ ในที่นี้คือค่า P_{CPL} และ มุม α ตามลำดับ

5.7 การคำนวณค่าในสถานะคงตัว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 5.6 เป็นแบบจำลองที่ได้มาจากการทำให้เป็นเชิงเส้นซึ่งพิจารณารอบจุดการทำงาน โดยต้องกำหนดค่า $V_{out,o}$ และ λ_o สำหรับการจำลองสถานการณ์

สัญญาณขนาดเล็กและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถนำมาคำนวณหาค่าในสภาวะคงตัวด้านไฟฟ้ากระแสสลับได้ วงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟสของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.17 สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.19 ตัวเก็บประจุในสายส่งกำลังไฟฟ้ามีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณาเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ



รูปที่ 5.19 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 5.19 สามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = P_{bus} \quad (5.25)$$

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus} \quad (5.26)$$

โดยที่
$$P_{bus} = \frac{(P_{CPL} + P_{loss})}{3}$$

$$Q_{bus} = \frac{(P_{CPL} + P_{loss})}{3} \tan(\alpha)$$

เมื่อ P_{CPL} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวที่โหลดของระบบ และ P_{loss} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจาก r_F จากสมการที่ (5.25) และ สมการที่ (5.26) สามารถคำนวณค่า $V_{bus,o}$ และ λ_o ที่สภาวะคงตัวได้ด้วยวิธีเชิงตัวเลขนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข $V_{out,o}$ สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (5.23) สามารถคำนวณได้จากค่า $V_{bus,o}$ และ λ_o สมการต่อไปนี้

$$V_{out,o} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot (\sqrt{2}V_{bus,o}) \cos(\alpha) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,o} - r_F I_{dc,o} \quad (5.27)$$

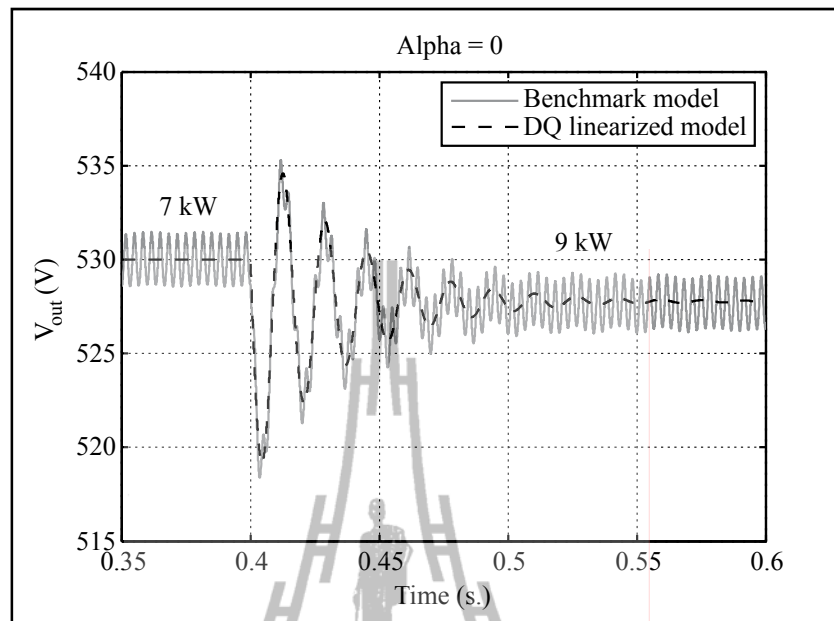
โดยที่

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

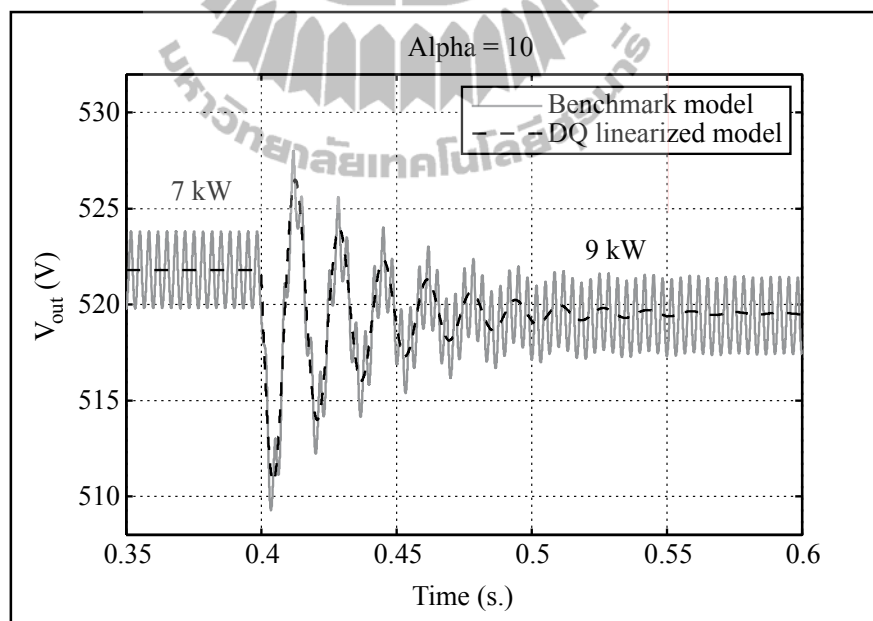
$$Z = \sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}, \quad \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \right)$$

5.8 การจำลองสถานการณ์

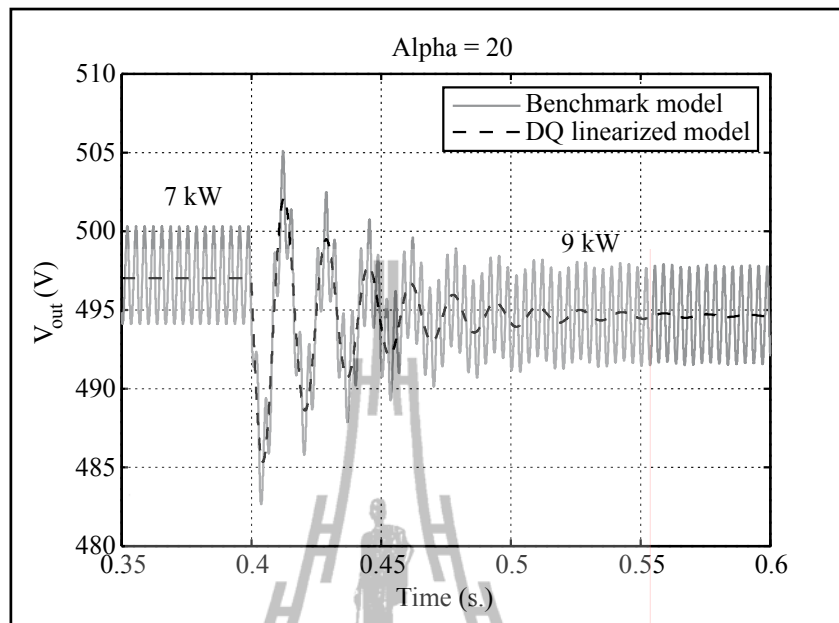
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (5.23) และ (5.24) เป็นแบบจำลองสำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.17 ซึ่งได้มาจากการพิสูจน์ด้วยวิธีการแปลงดีคิวและการทำให้เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกว่า Benchmark model โดยที่ Benchmark model ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.14 แสดงไว้ในภาคผนวก ก ในรูปที่ ก.5 ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบดังตารางที่ 5.1 โดยที่โหลดตัวต้านทานของระบบจะถูกแทนที่ด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และมีค่าแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเท่ากับ 230 V_{rms} ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของระบบจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการจำลองสถานการณ์สัญญาณขนาดเล็กของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุม ซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (5.24) เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ที่ค่า α ต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.20 ถึง 5.24 ดังนี้



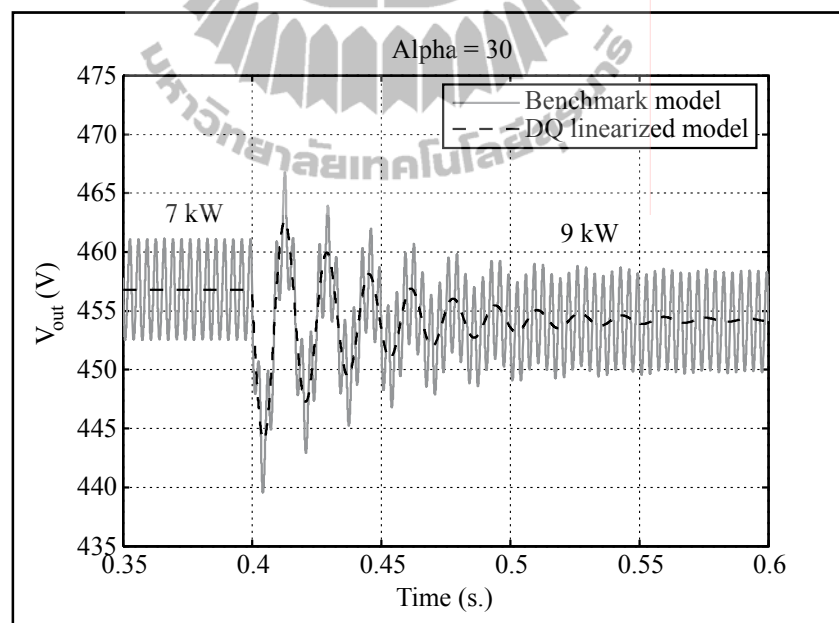
รูปที่ 5.20 การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 7 kW เป็น 9 kW เมื่อมุม $\alpha = 0$ องศา



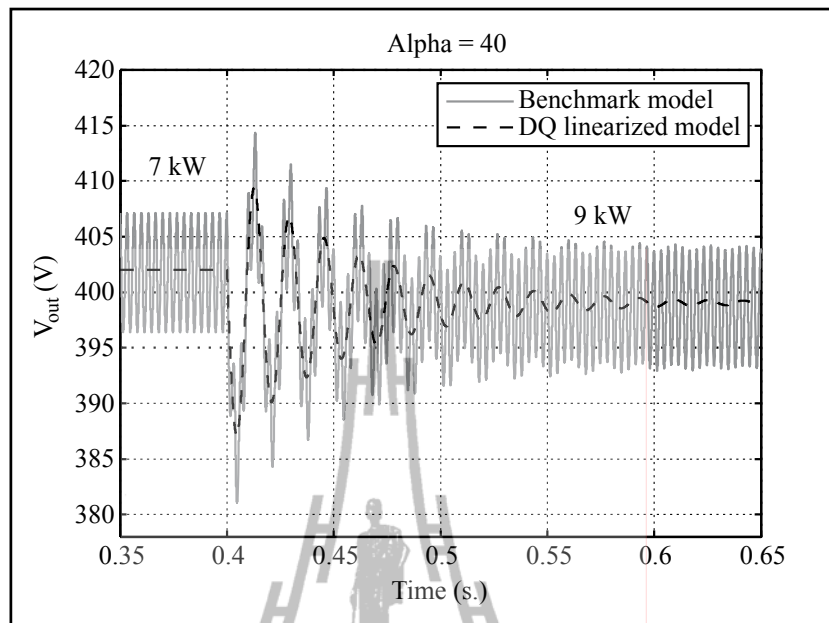
รูปที่ 5.21 การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 7 kW เป็น 9 kW เมื่อมุม $\alpha = 10$ องศา



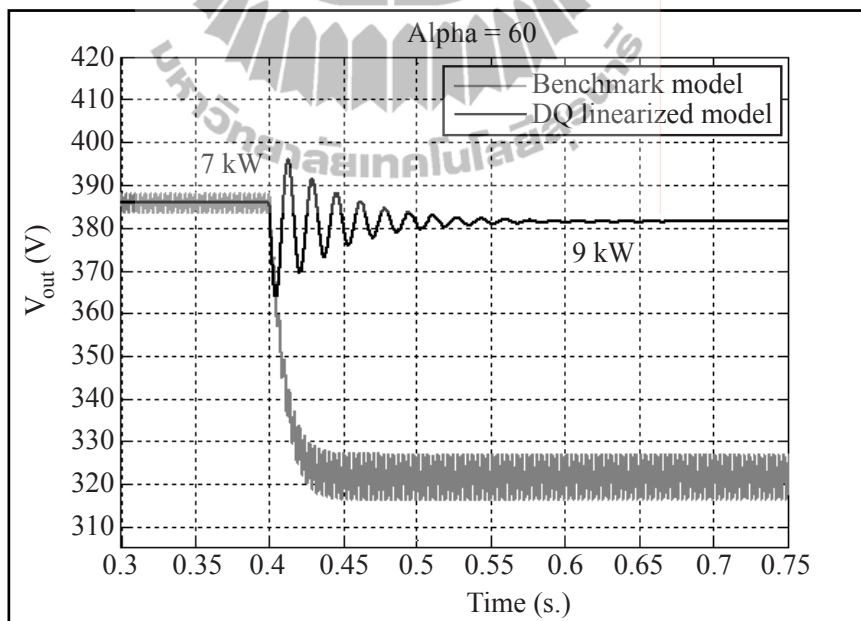
รูปที่ 5.22 การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 7 kW เป็น 9 kW เมื่อมุม $\alpha = 20$ องศา



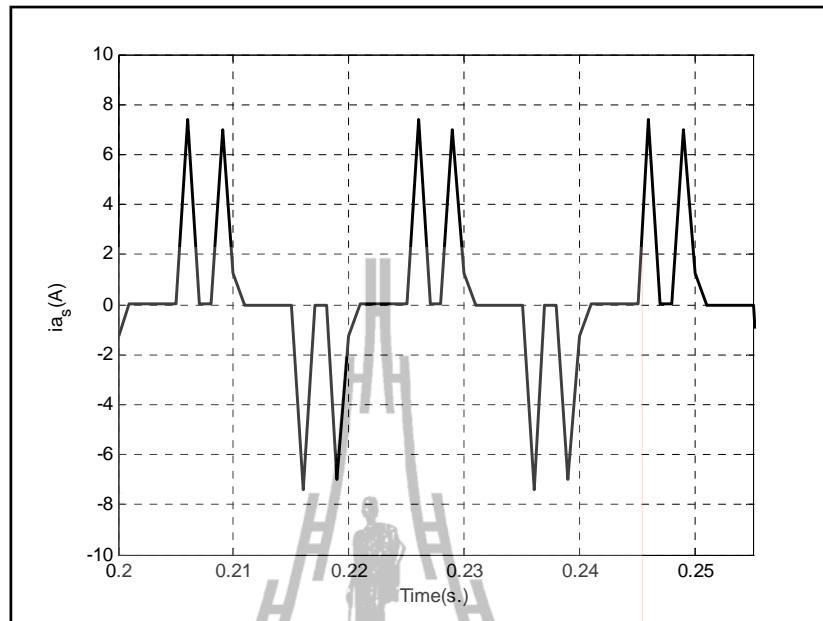
รูปที่ 5.23 การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 7 kW เป็น 9 kW เมื่อมุม $\alpha = 30$ องศา



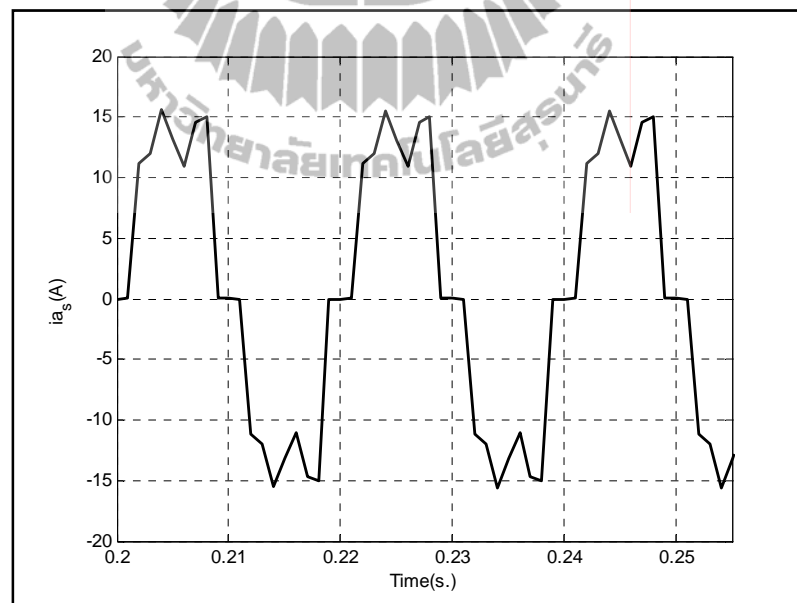
รูปที่ 5.24 การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 7 kW เป็น 9 kW เมื่อมุม $\alpha = 40$ องศา



รูปที่ 5.25 การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 1 kW เป็น 3 kW เมื่อมุม $\alpha = 60$ องศา



รูปที่ 5.26 กระแสไฟฟ้ากระแสสลับเฟส a ในโหมดนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 5.27 กระแสไฟฟ้ากระแสสลับเฟส a ในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง

จากผลการเปรียบเทียบสังเกตได้ว่าในช่วงเวลา 0-0.4 วินาที โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 7 kW ต่อมาที่ช่วงเวลาที่ $t = 0.4$ วินาที โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบ

ทันทีทันใดจาก 7 kW เป็น 9 kW ในกรณีมุม $\alpha = 0$ องศา สำหรับรูปที่ 5.20 และในทำนองเดียวกัน สำหรับรูปที่ 5.21 ถึง รูปที่ 5.24 แสดงรูปสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว มีการเปลี่ยนแปลงจาก 7 kW เป็น 9 kW สำหรับมุม α เท่ากับ 10 20 30 และ 40 องศา ตามลำดับ ในกรณีที่มีมุม α มากกว่า 50 องศา โดยในที่นี้แสดงค่า α เท่ากับ 60 องศา ผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าไม่ตรงกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.25 สถานะการทำงานดังกล่าววงจรเรียงกระแสจะทำงานในโหมดนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอยู่นอกเหนือสมมติฐานของแบบจำลอง โดยรูปสัญญาณของกระแสสามเฟส กรณีโหมดนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่องสำหรับเฟส a แสดงในรูปที่ 5.26 ซึ่งมีค่ามุม α เท่ากับ 60 องศา ส่วนกรณีโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง รูปสัญญาณของกระแสสามเฟสกรณีเฟส a แสดงดังรูปที่ 5.27 ซึ่งพิจารณาที่ค่ามุม α เท่ากับ 0 องศา จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะคงตัว ภายใต้สมมติฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุม และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้

5.9 การวิเคราะห์เสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.17 เนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีผลต่อเสถียรภาพของระบบซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 1 จึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เสถียรภาพ การวิเคราะห์จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.8 ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่รับการพิสูจน์ด้วยวิธีการแปลงดีคิวมา ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ (Areerak, Bozhko, Asher, and Thomas, 2008) โดยทฤษฎีบทการหาค่าเจาะจง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ตามสมการที่ (5.28)

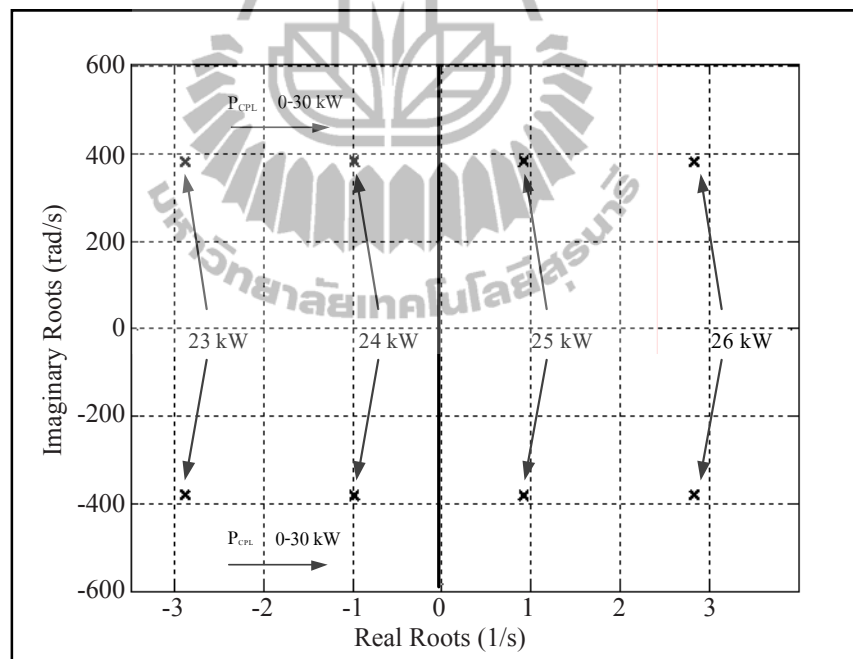
$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (5.28)$$

ระบบจะยังคงมีเสถียรภาพ ถ้า

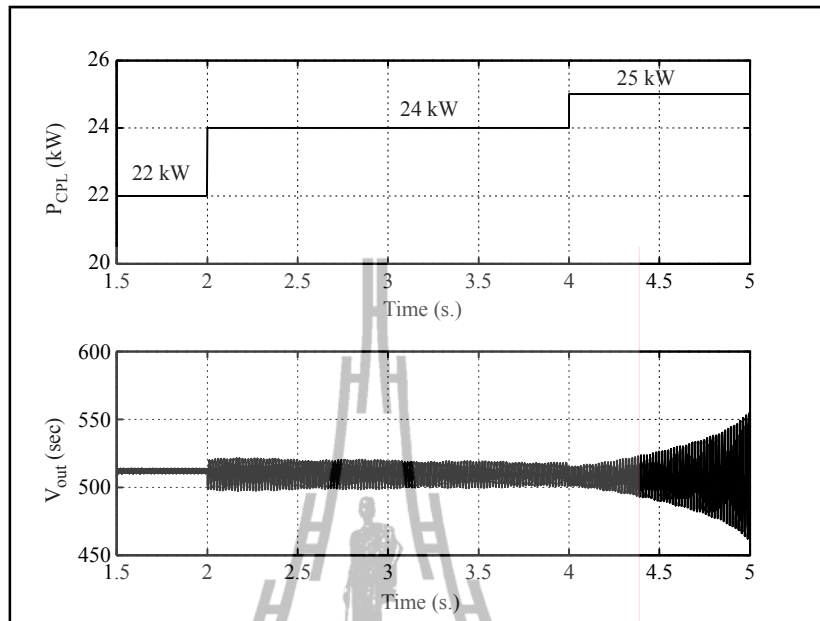
$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (5.29)$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ($n =$ จำนวนตัวแปรสถานะ)

การวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบในรูปที่ 5.17 จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งคำนวณค่าเจาะจงของเมตริกซ์ $A(x_0, u_0)$ โดยมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 5.1 สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าว พิจารณาให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเปลี่ยนค่าจาก 0 kW ถึง 30 kW ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกรณีมุม α เท่ากับ 0 องศา แสดงได้ดังรูปที่ 5.28 ซึ่งพบว่า ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 24 kW โดยผลการวิเคราะห์นี้จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ เช่น ความถี่ของระบบ ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรอง เป็นต้น ถ้าพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพก็จะเปลี่ยนเช่นกัน สำหรับรูปที่ 5.29 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การขาดเสถียรภาพ เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่คาดเดาจากทฤษฎี ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อ P_{CPL} มีค่าเท่ากับ 25 kW (มีค่ามากกว่า 24 kW) ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

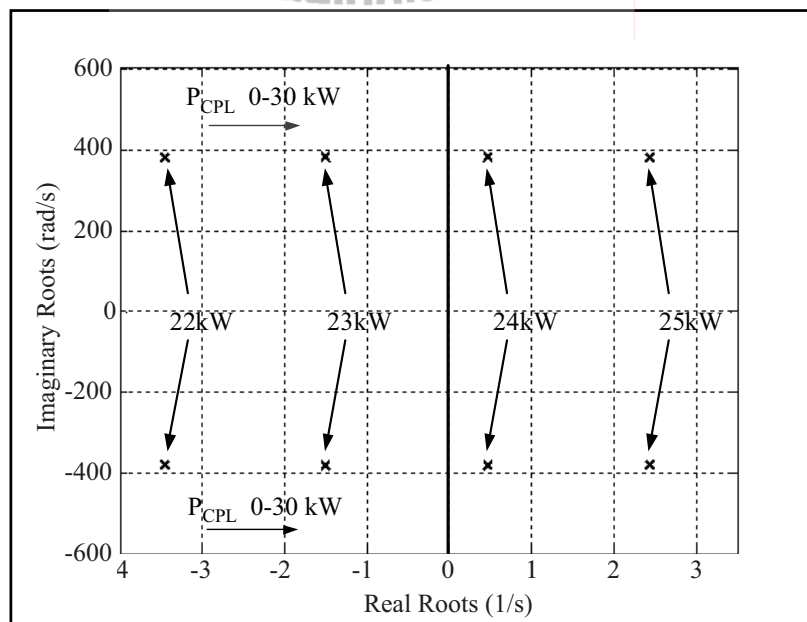


รูปที่ 5.28 ค่าเจาะจงกรณีมุม $\alpha = 0$ องศา

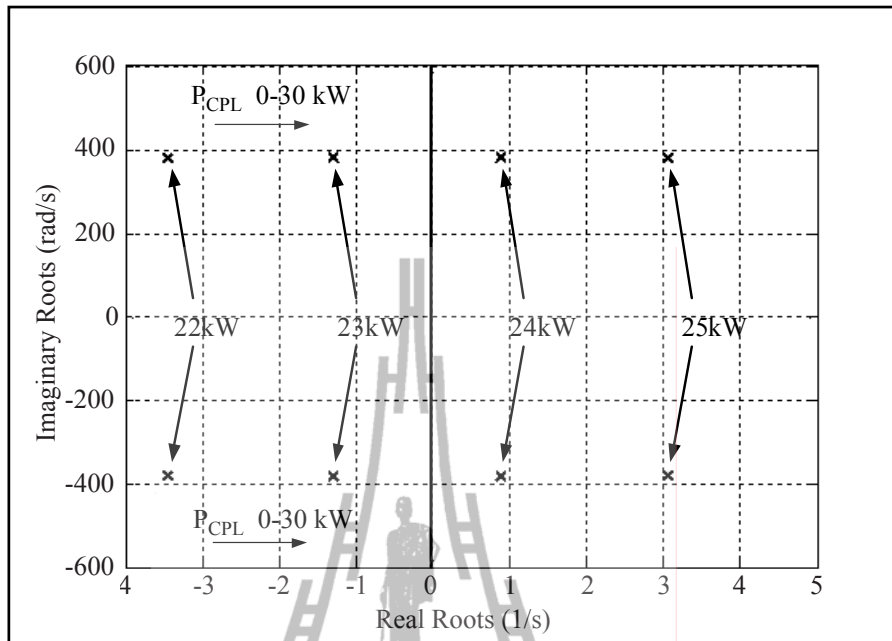


รูปที่ 5.29 ผลการจำลองการขาดเสถียรภาพกรณีมุม $\alpha = 0$ องศา

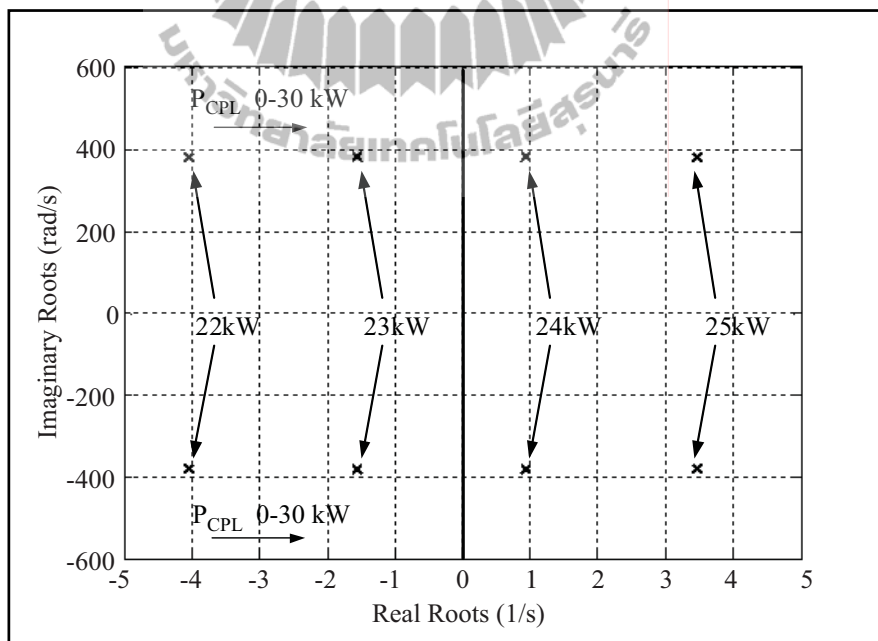
ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 5.30 ถึง 5.33 แสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยค่าเจาะจง สำหรับมุม α เท่ากับ 10 20 30 และ 40 องศา ตามลำดับ



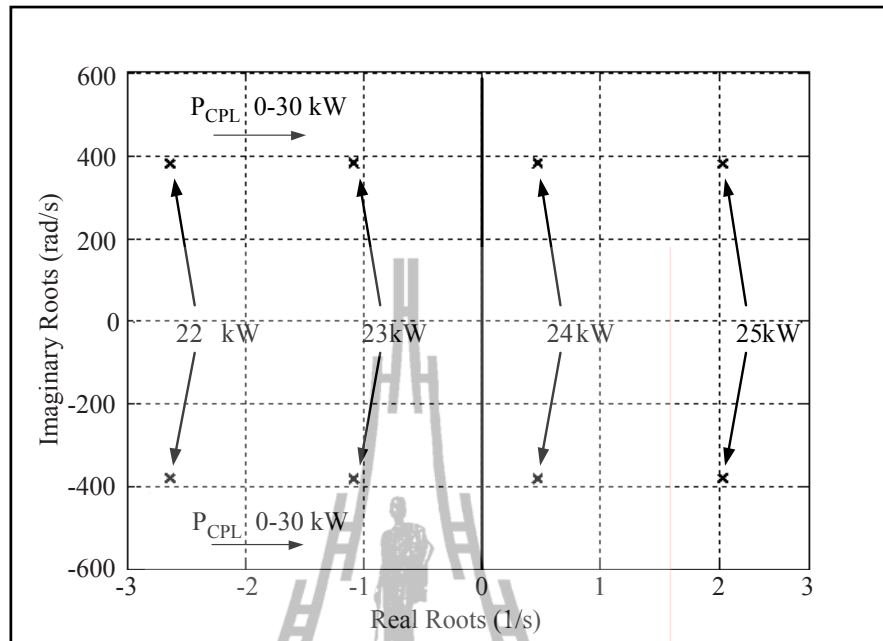
รูปที่ 5.30 ค่าเจาะจงกรณีมุม $\alpha = 10$ องศา



รูปที่ 5.31 ค่าเจาะจงกรณีมุม $\alpha = 20$ องศา

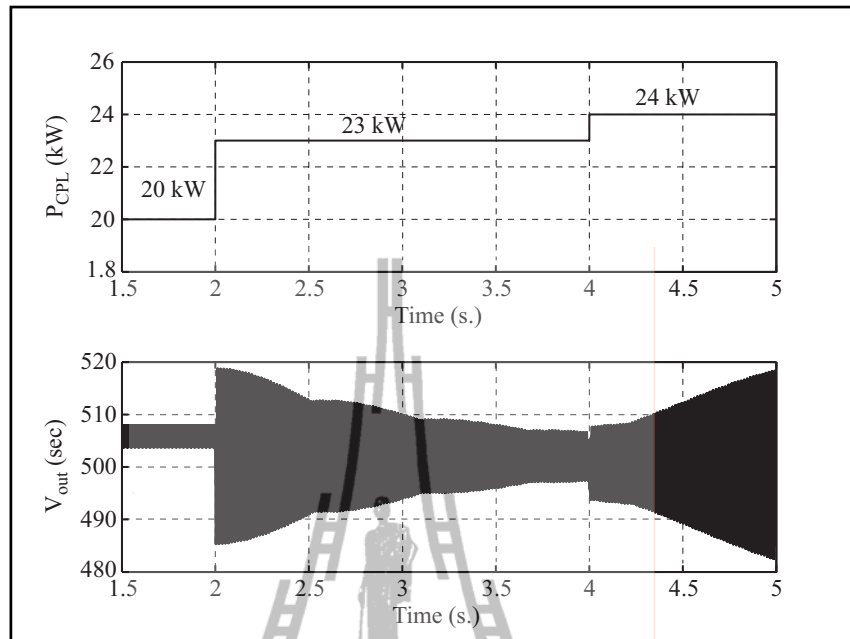


รูปที่ 5.32 ค่าเจาะจงกรณีมุม $\alpha = 30$ องศา

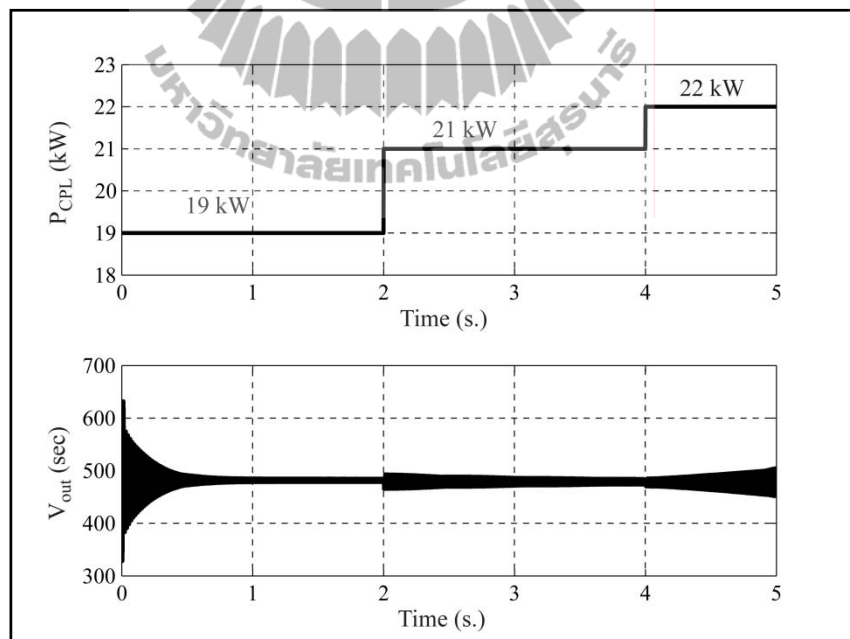


รูปที่ 5.33 ค่าเจาะจงกรณีมุม $\alpha = 40$ องศา

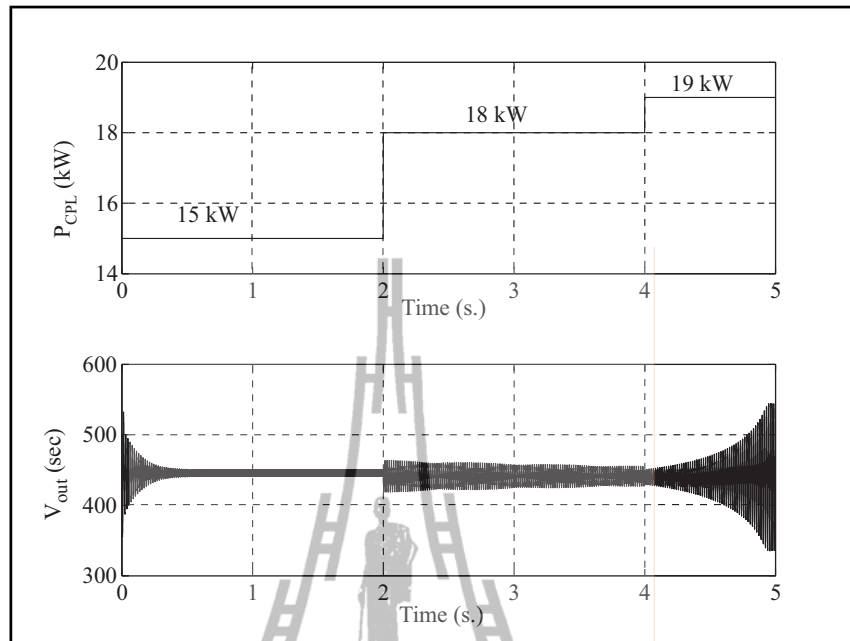
สำหรับรูปที่ 5.34 ถึง 5.37 แสดงผลการจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 5.30 ถึง 5.33 ตามลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีการแปลงดีคิวกสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ พบว่า เมื่อมุม α มีค่ามากขึ้นจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพลดลง ดังนั้น งานที่ใช้ระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.17 ซึ่งเป็นระบบที่ยังไม่มีการควบคุม ต้องคำนึงไว้เสมอว่าค่า α ที่สูงจะทำให้ระบบง่ายต่อการขาดเสถียรภาพ



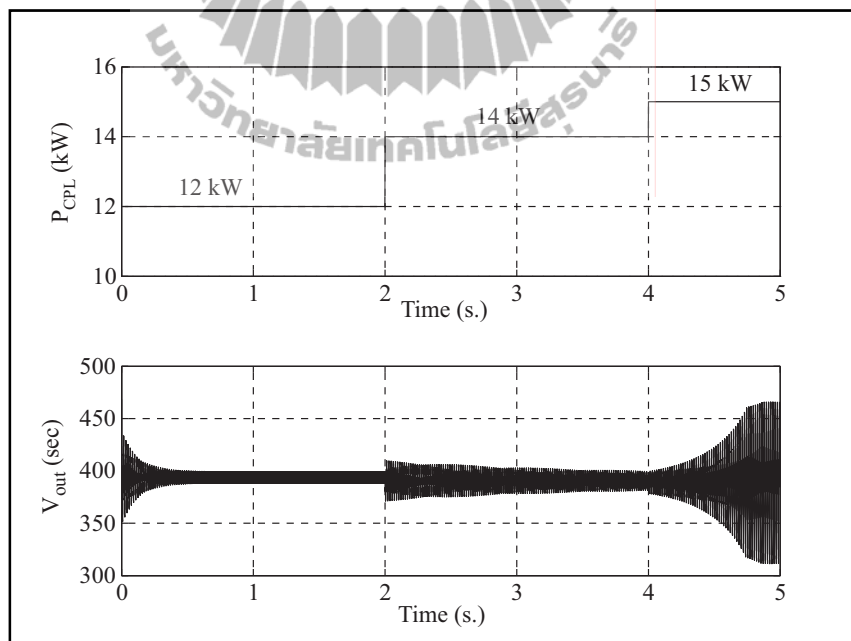
รูปที่ 5.34 ผลการจำลองการขาดเสถียรภาพกรณีมุม $\alpha = 10$ องศา



รูปที่ 5.35 ผลการจำลองการขาดเสถียรภาพกรณีมุม $\alpha = 20$ องศา



รูปที่ 5.36 ผลการจำลองการขาดเสถียรภาพกรณีมุม $\alpha = 30$ องศา



รูปที่ 5.37 ผลการจำลองการขาดเสถียรภาพกรณีมุม $\alpha = 40$ องศา

5.10 สรุป

เนื้อหาในบทนี้เป็นการนำเสนอ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุม โดยวิธีการแปลงดีคิว ซึ่งได้พิจารณาโหลดของระบบเป็น 2 กรณี คือ โหลดตัวต้านทาน และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สำหรับค่าในสถานะอยู่ตัวที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณได้จากทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอาศัยการเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาในกรณีที่ระบบมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเป็นสำคัญ เนื่องจากโหลดดังกล่าวมีผลต่อเสถียรภาพของระบบ จึงทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีการแปลงดีคิว และยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ พบว่า ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพมีความถูกต้อง ซึ่งสามารถทำนายจุดการทำงานของระบบที่จะเกิดการขาดเสถียรภาพได้นอกจากนี้ พบว่า เมื่อมุม α มีค่ามากขึ้นจะทำให้ระบบง่ายต่อการขาดเสถียรภาพ

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุม รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 ได้รับการตีพิมพ์แล้ว ดังนี้

- โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, กองพันธ์ อารีรักษ์, และ กองพล อารีรักษ์, “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานโดยวิธีดีคิว”, วิศวกรรมสาร มข., ปีที่ 38, ฉบับที่ 3, หน้า 325-334.

- K. Chaijarunudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, “Modeling of Three-phase Controlled Rectifier using a DQ method”, 2010 International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE 2010), Beijing, China: June 19-20, 2010, pp.56-59.

- K. Chaijarunudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, “Modeling and Stability Analysis of AC-DC Power System with Controlled Rectifier and Constant Power Loads”, WSEAS Transactions on Power Systems, April 2011, vol. 6, no. 2, pp. 31-41.

บทที่ 6

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้

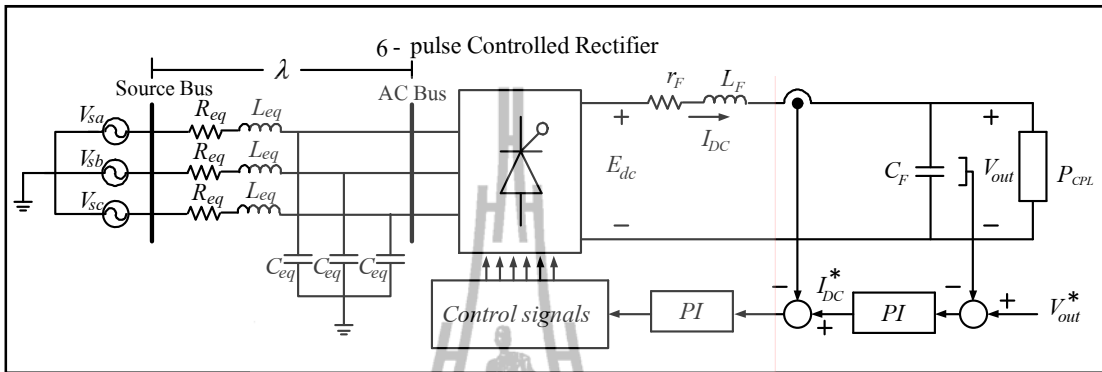
6.1 บทนำ

โหลดทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์กำลังในปัจจุบัน ส่วนใหญ่มักประพฤติตัวเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งพบได้มากในอุตสาหกรรมทั่วไป โหลดเหล่านี้มีผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรงในการลดความถี่เสถียรภาพของระบบอย่างมีนัย (Middlebrook, 1976) ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงมีความสำคัญมาก ซึ่งแบบจำลองของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยทั่วไปจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นกับเวลาทำให้มีความซับซ้อนในการวิเคราะห์และการออกแบบระบบ การกำจัดปัญหาดังกล่าวในปัจจุบันมีหลายวิธีด้วยกัน โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้วิธีการแปลงดีคิว ซึ่งวิธีดังกล่าวมีการใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ และในงานวิจัยในอดีตได้มีการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่พิสูจน์โดยวิธีการแปลงดีคิว (Areerak, Bozhko, Asher, and Thomas, 2008) อีกทั้งยังสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ สำหรับเนื้อหาที่จะนำเสนอในบทนี้ประกอบด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้โดยอาศัยวิธีการแปลงดีคิว การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว ผลการจำลองสถานการณ์ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ และการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ

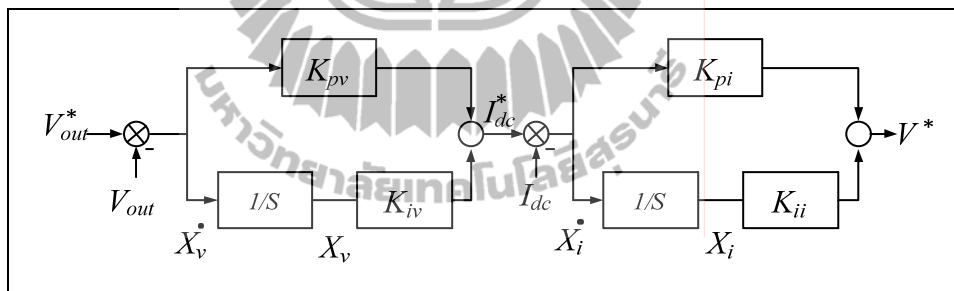
6.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษาในส่วนนี้แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ วงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรง และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สมมติฐานสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พิจารณา แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสเป็นแบบสมมูล R_{eq} , L_{eq} และ C_{eq} เป็นพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 6 ตัว ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ไม่พิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียและฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ r_F , L_F เป็นพารามิเตอร์ของวงจรกรอง และ C_F เป็นตัวเก็บ

ประจุของวงจรกรองที่เชื่อมต่อกับบัสไฟฟ้ากระแสตรง และจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติซึ่งแทนด้วย P_{CPL}



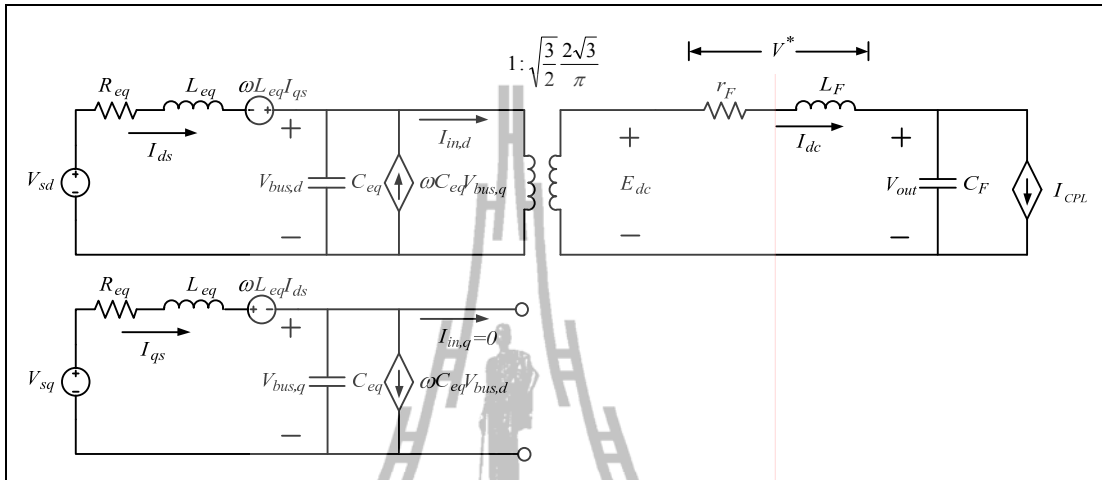
รูปที่ 6.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้เมื่อมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว



รูปที่ 6.2 โครงสร้างตัวควบคุมแบบพีไอของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.1

ตัวควบคุมของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.1 ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกรวมตัวเก็บประจุของวงจรกรองให้คงตัวที่ V_{out}^* ตามที่กำหนด โครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอแสดงในรูปที่ 6.2 โดยที่ K_{pv} , K_{iv} , K_{pi} และ K_{ii} เป็นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า สำหรับการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวจะได้รับการอธิบายในหัวข้อที่ 6.5 ต่อไป วิธีการแปลงดีคิวถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.1 ซึ่งสามารถแปลงเป็นวงจรสมมูลบนแกน dq ได้ดังรูปที่ 6.3 เมื่อวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้สามารถแทนด้วยแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยรายละเอียดของการแปลงดังกล่าวได้รับการอธิบายไว้แล้วในบทที่ 5 สำหรับโหลดกำลังไฟฟ้าคง

ตัวแบบอุดมคติสามารถพิจารณาเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ดังสมการที่ (5.21) ของบทที่ 5



รูปที่ 6.3 วงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้บนแกน dq

6.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น
จากรูปที่ 6.2 เอาต์พุต V^* ของตัวควบคุมแบบพีไอ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (6.1)

$$V^* = -K_{pi} I_{dc} - K_{pv} K_{pi} V_{out} + K_{iv} K_{pi} X_v + K_{ii} X_i + K_{pv} K_{pi} V_{out}^* \quad (6.1)$$

สมการอนุพันธ์ของ X_v และ X_i สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\dot{X}_v = -V_{out} + V_{out}^* \quad (6.2)$$

$$\dot{X}_i = -I_{dc} - K_{pv} V_{out} + K_{iv} X_v + K_{pv} V_{out}^* \quad (6.3)$$

จากรูปที่ 6.3 เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าในรูปแบบที่ 6.1 เมื่อวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ถูกควบคุมการสวิตซ์ผ่านทางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ไทรสเตอร์)

แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม r_F และ L_F จะมีค่าเท่ากับ V^* ด้วยเหตุนี้ แรงดันไฟฟ้างกล่าวสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6.4)

$$r_F I_{dc} + L_F \dot{I}_{dc} = V^* \quad (6.4)$$

แทน V^* ในสมการที่ (6.1) ลงในสมการที่ (6.4) ทำให้สามารถเขียนสมการอนุพันธ์ของ I_{dc} ได้เป็นดังสมการที่ (6.5)

$$\dot{I}_{dc} = -\left(\frac{r_F + K_{pi}}{L_F}\right) I_{dc} + \frac{K_{iv} K_{pi}}{L_F} X_v + \frac{K_{ii}}{L_F} X_i - \frac{K_{pv} K_{pi}}{L_F} V_{out} + \frac{K_{pv} K_{pi}}{L_F} V_{out}^* \quad (6.5)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) กับวงจรสมมูลในรูปที่ 6.3 ร่วมกับสมการที่ (6.2) และสมการที่ (6.3) ซึ่งทำให้ได้สมการอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ds} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\ \dot{I}_{qs} &= -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\ V_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\ \dot{V}_{bus,q} &= -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\ \dot{I}_{dc} &= -\left(\frac{r_F + K_{pi}}{L_F}\right) I_{dc} + \frac{K_{iv} K_{pi}}{L_F} X_v + \frac{K_{ii}}{L_F} X_i - \frac{K_{pv} K_{pi}}{L_F} V_{out} + \frac{K_{pv} K_{pi}}{L_F} V_{out}^* \\ \dot{V}_{out} &= \frac{1}{C_F} I_{dc} - \frac{1}{C_F} \frac{P_{CPL}}{V_{out}} \\ \dot{X}_v &= -V_{out} + V_{out}^* \\ \dot{X}_i &= -I_{dc} - K_{pv} V_{out} + K_{iv} X_v + K_{pv} V_{out}^* \end{aligned} \quad (6.6)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (6.6) ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีพื้นฐานได้ ดังนั้น การวิเคราะห์เสถียรภาพต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของเทย์เลอร์ ซึ่งพิจารณาเพียงเทอมแรกเท่านั้น ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น หรือสมการอนุพันธ์เชิงเส้นที่พิจารณารอบจุดการทำงานในสภาวะคงตัว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นของสมการที่ (6.6) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{\delta \mathbf{x}} &= \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} &= \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u}\end{aligned}\quad (6.7)$$

เมื่อ $\delta \mathbf{x} = [\delta I_{ds} \quad \delta I_{qs} \quad \delta V_{bus,d} \quad \delta V_{bus,q} \quad \delta I_{dc} \quad \delta V_{out} \quad \delta X_v \quad \delta X_i]^T$

$$\delta \mathbf{u} = [\delta V_m \quad \delta V_{out}^* \quad \delta P_{CPL}]^T, \quad \delta \mathbf{y} = [\delta V_{out}]$$

สำหรับรายละเอียดเมตริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ เป็นดังสมการที่(6.8)

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{(r_F + K_{pi})}{L_F} & -\frac{(K_{pv} K_{pi})}{L_F} & \frac{K_{iv} K_{pi}}{L_F} & \frac{K_{ii}}{L_F} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_F} & \frac{P_{CPL}}{C_F V_{out,o}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 \end{bmatrix}_{8 \times 8}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\cos(\lambda_o + \alpha_o)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sin(\lambda_o + \alpha_o)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{pv} K_{pi}}{L_F} & -\frac{1}{C_F V_{out,o}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & K_{pv} & 0 \end{bmatrix}_{8 \times 3}$$

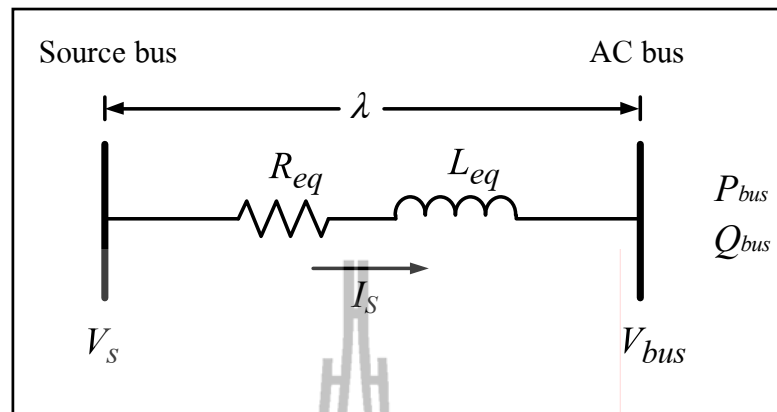
$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]_{1 \times 8}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = [0 \ 0 \ 0]_{1 \times 3} \quad (6.8)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นที่พิจารณารอบจุดการทำงานในสมการที่ (6.7) จะสังเกตได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับจุดการทำงาน ซึ่งการระบุสถานะของจุดการทำงานนั้นจะขึ้นอยู่กับโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัว

6.4 การคำนวณค่าในสถานะคงตัว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 6.3 ซึ่งได้รับการทำให้เป็นเชิงเส้นจนได้แบบจำลองเชิงเส้นที่พิจารณารอบจุดการทำงาน ซึ่งต้องกำหนดค่า λ_o , α_o และ $V_{out,o}$ ในสถานะคงตัวสำหรับการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่าในสถานะคงตัวด้านไฟฟ้ากระแสสลับได้ โดยมีแผนภาพวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.1 สำหรับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงไว้ในรูปที่ 6.4 ตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่พิจารณามีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาวิเคราะห์เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ



รูปที่ 6.4 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 6.4 สามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = P_{bus} \quad (6.9)$$

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus} \quad (6.10)$$

โดยมีค่าในสถานะคงตัว คือ $V_{bus,0}$ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ AC bus (rms) λ_0 เป็นมุมที่เปลี่ยนแปลงระหว่าง V_s กับ V_{bus} สำหรับ $Z \angle \gamma$ คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า ขณะที่กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปรากฏต่อเฟสที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ แสดงได้ตั้งสมการ

$$P_{bus} = V_{bus} I_{bus} \cos \alpha \quad (6.11)$$

$$Q_{bus} = V_{bus} I_{bus} \sin \alpha \quad (6.12)$$

เมื่อ

$$P_{bus} = \frac{(P_{CPL} + P_{loss})}{3} \quad (6.13)$$

$$Q_{bus} = \frac{(P_{CPL} + P_{loss})}{3} \tan(\alpha) \quad (6.14)$$

จากสมการที่ (6.13) P_{CPL} เป็นค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และ P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัวต้านทาน r_F นอกจากนี้ในสมการที่ (6.14) กำลังไฟฟ้าปฏิกิริยา Q_{bus} จะขึ้นอยู่กับมุมจุกขนวนของไตรสเตอร์ α ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.15)

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{\pi V_{out}^*}{3\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{bus})}\right) \quad (6.15)$$

แทนค่า α ในสมการที่ (6.15) ลงในสมการที่ (6.14) ทำให้ได้สมการในการคำนวณ Q_{bus} ดังนี้

$$Q_{bus} = \frac{(P_{CPL} + P_{loss}) \tan(\cos^{-1}(\frac{\pi V_{out}^*}{3\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{bus})}))}{3} \quad (6.16)$$

นำ P_{bus} ในสมการที่ (6.13) และ Q_{bus} ในสมการที่ (6.16) แทนลงในสมการที่ (6.9) และ (6.10) ตามลำดับ ดังนั้นทำให้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = \frac{(P_{CPL} + P_{loss})}{3} \quad (6.17)$$

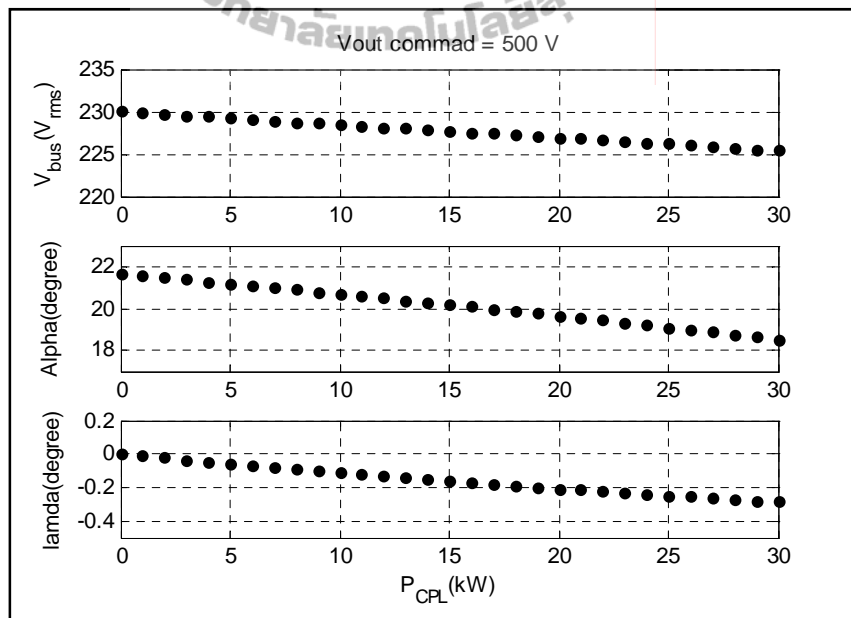
$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = \frac{(P_{CPL} + P_{loss}) \tan(\cos^{-1}(\frac{\pi V_{out}^*}{3\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{bus})}))}{3} \quad (6.18)$$

สมการที่ (6.17) และ (6.18) สามารถหาผลเฉลยของ $V_{bus,o}$ และ λ_o ที่สภาวะคงตัวได้จากวิธีเชิงตัวเลขนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ค สำหรับ $V_{out,o}$ และ α_o สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นในสมการที่ (6.7) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_{out,o} = V_{out}^* \quad (6.19)$$

$$\alpha_o = \cos^{-1}\left(\frac{\pi V_{out}^*}{3\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{bus,o})}\right) \quad (6.20)$$

จากสมการที่ (6.17) ถึง (6.20) ค่าในสภาวะคงตัวจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อจุดการทำงาน ของระบบเปลี่ยน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของ P_{CPL} ดังนั้น สามารถคำนวณค่าในสภาวะคงตัวในแต่ละจุดการทำงาน ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.1 โดยค่าในสภาวะคงตัวจากการหาผลเฉลยของสมการที่ (6.17) ถึง (6.20) เมื่อกำหนดให้ P_{CPL} เปลี่ยนค่าจาก 0 kW ถึง 30 kW ในขณะที่กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต $V_{out}^* = 500$ V โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบตัวอย่างเป็นดังตารางที่ 6.1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.5



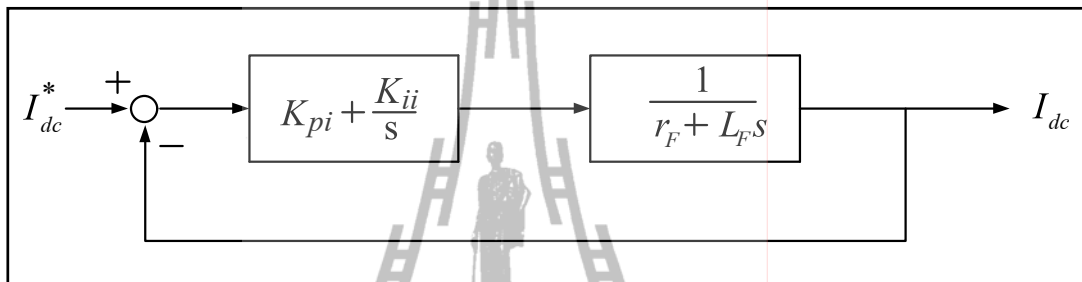
รูปที่ 6.5 กราฟผลเฉลยค่าในสภาวะคงตัวของ $V_{bus,o}$ α_o และ λ_o เมื่อ P_{CPL} เปลี่ยนแปลง

6.5 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิม

ในส่วนนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ด้วยวิธีดั้งเดิม โดยมีรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมดังต่อไปนี้

6.5.1 การออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า

โครงสร้างตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 6.1 แสดงได้ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 ระบบควบคุมกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.6 K_{pi} และ K_{ii} เป็นพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพีไอของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า ขณะที่ r_F และ L_F เป็นพารามิเตอร์ของวงจรกรองไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนของรูปที่ 6.6 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (6.21)

$$\frac{I_{dc}}{I_{dc}^*} = \frac{sK_{pi} + K_{ii}}{s^2 + \left(\frac{K_{pi} + r_F}{L_F}\right)s + \frac{K_{ii}}{L_F}} \quad (6.21)$$

ตัวหารของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดมีราก ซึ่งประกอบด้วย อัตราหน่วง ζ และความถี่ธรรมชาติ ω_n โดยที่รูปแบบมาตรฐานของระบบควบคุมอันดับ 2 มีสมการดังนี้

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (6.22)$$

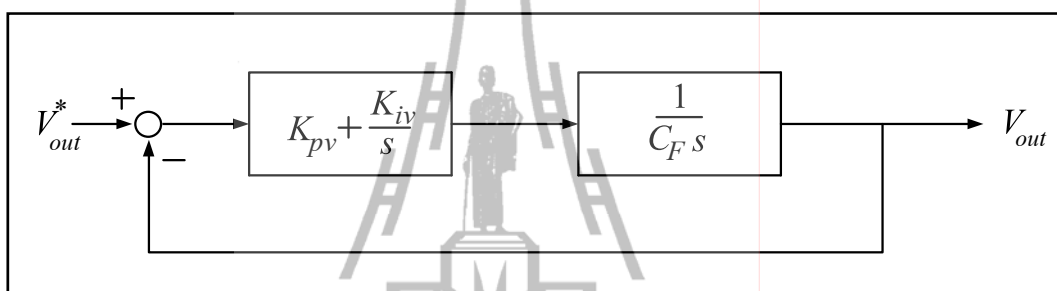
ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าสามารถออกแบบได้โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างตัวหารของสมการที่ (6.21) กับสมการที่ (6.22) ทำให้ได้สมการสำหรับการออกแบบดังนี้

$$K_{pi} = 2\zeta\omega_{ni}L_F - r_F \quad (6.23)$$

$$K_{ii} = \omega_{ni}^2 L_F \quad (6.24)$$

6.5.2 การออกแบบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า

โครงสร้างตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 6.1 แสดงได้ดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 ระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.7 K_{pv} และ K_{iv} เป็นพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพีไอของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า ขณะที่ C_F เป็นพารามิเตอร์ของวงจรถองไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนของรูปที่ 6.7 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (6.25)

$$\frac{V_{out}}{V_{out}^*} = \frac{sK_{pv} + K_{iv}}{s^2 + \frac{K_{pv}}{C_F}s + \frac{K_{iv}}{C_F}} \quad (6.25)$$

สำหรับตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถออกแบบได้โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างตัวหารของสมการที่ (6.25) กับสมการที่ (6.22) ทำให้ได้สมการสำหรับการออกแบบดังนี้

$$K_{pv} = 2\zeta\omega_{nv}C_F \quad (6.26)$$

$$K_{iv} = \omega_{nv}^2 C_F \quad (6.27)$$

การออกแบบตัวควบคุมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้สมการที่ (6.23) (6.24) (6.26) และ (6.27) ซึ่งพิจารณาให้ค่า ω_{ni} มีค่ามากกว่า ω_{nv} ประมาณ 5-10 เท่า (Tsang, and Chan, 2005) และจะสังเกตได้ว่าตัวควบคุมของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.1 จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณา อัตราส่วนของระบบควบคุม ζ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.8 ความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\omega_{ni} = 2\pi \times 70$ rad/s ส่วนความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้ากำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\omega_{nv} = 2\pi \times 10$ rad/s พารามิเตอร์ของระบบสำหรับออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ แสดงได้ดังตารางที่ 6.1

6.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและการวิเคราะห์เสถียรภาพ

การจำลองสถานการณ์สัญญาณขนาดเล็กระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.1 นำมาใช้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (6.7) โดยนำผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า Benchmark model ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก ในรูปที่ ก.6 สำหรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบตัวอย่าง แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ จะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ต้องทำงานในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง

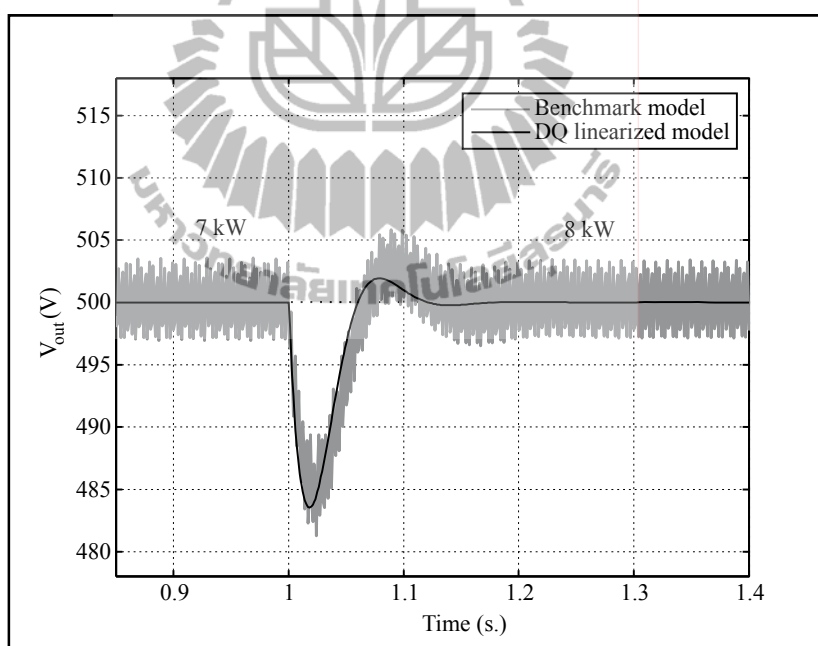
ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ของระบบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้

พารามิเตอร์	รายละเอียด
V_s	230 V _{rms/phase}
ω	$2\pi \times 50$ rad/s
R_{eq}	0.15 Ω
L_{eq}	30 μ H
C_{eq}	2 nF
r_F	0.03 Ω
L_F	6.5 mH
C_F	1000 μ F
K_{pv}	0.101
K_{iv}	3.948

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ของระบบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ (ต่อ)

พารามิเตอร์	รายละเอียด
K_{pi}	4.544
K_{ii}	1257.400
V_{out}^*	500 V

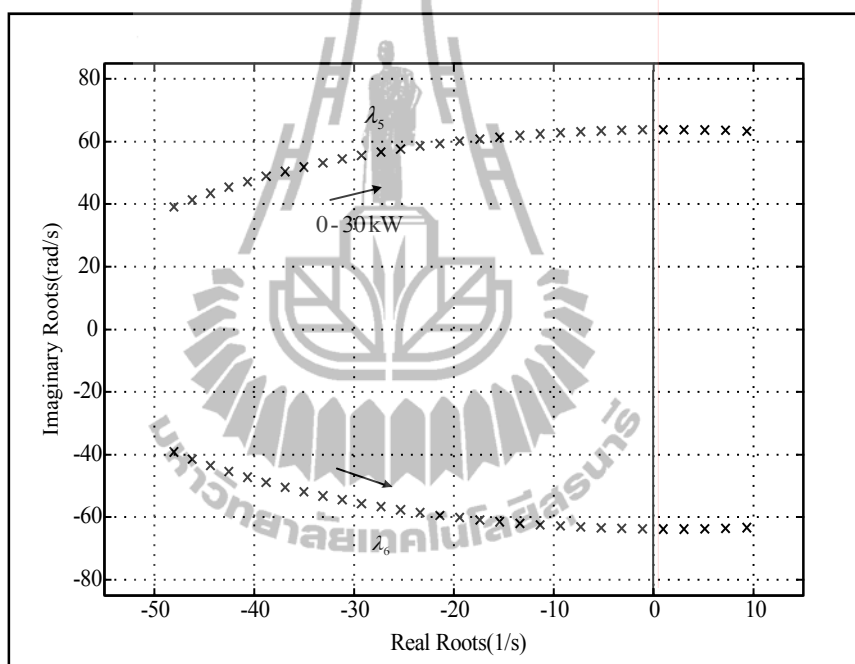
สำหรับรูปที่ 6.8 แสดงผลการจำลองสถานการณ์สัญญาณขนาดเล็กของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.1 ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งกำหนดให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 7 kW เป็น 8 kW ในขณะที่ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตถูกกำหนดไว้ที่ $V_{out}^* = 500$ V เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ภายใต้สมมติฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 6.8



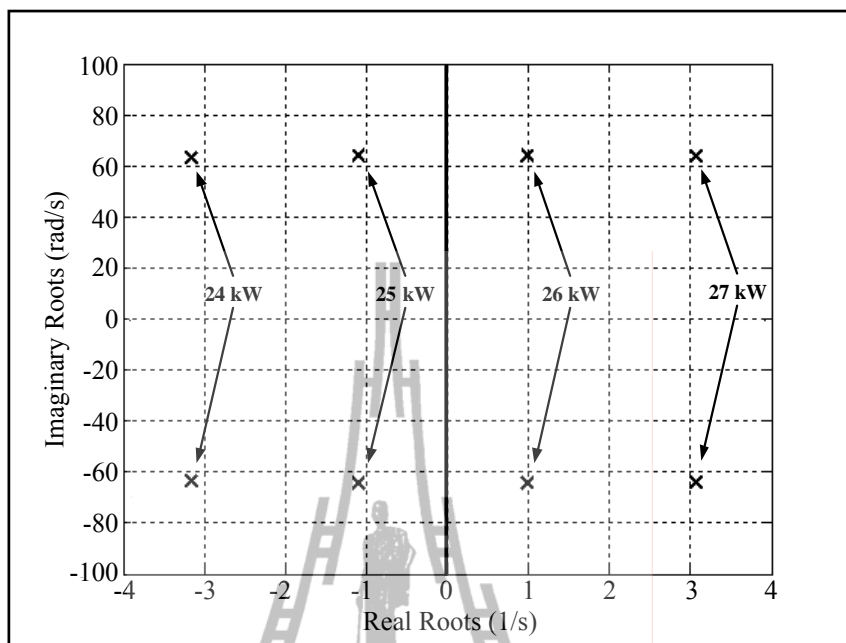
รูปที่ 6.8 การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 7 kW เป็น 8 kW เมื่อ $V_{out}^* = 500$ V

จากรูปที่ 6.8 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ด้วยตัวควบคุมพีไอ ที่ได้รับการพิสูจน์โดยวิธีการแปลงดีคิว มีความถูกต้องสามารถอธิบายผลตอบสนองพลวัตของระบบได้ ดังนั้น แบบจำลองนี้สามารถนำไปศึกษาเกี่ยวกับ

เสถียรภาพของระบบได้ เนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 1 สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น คำนวณค่าเงาจากเมตริกซ์ $A(x,u)$ ในสมการที่ (6.8) โดยมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ ดังตารางที่ 6.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าวจะพิจารณาให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว P_{CPL} เปลี่ยนค่าจาก 0 kW ถึง 30 kW ซึ่งแสดงในรูปที่ 6.9 สำหรับรูปที่ 6.10 แสดงภาพขยายส่วนที่สำคัญของค่าเงา ซึ่งพบว่า ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 25 kW สำหรับในกรณีศึกษา

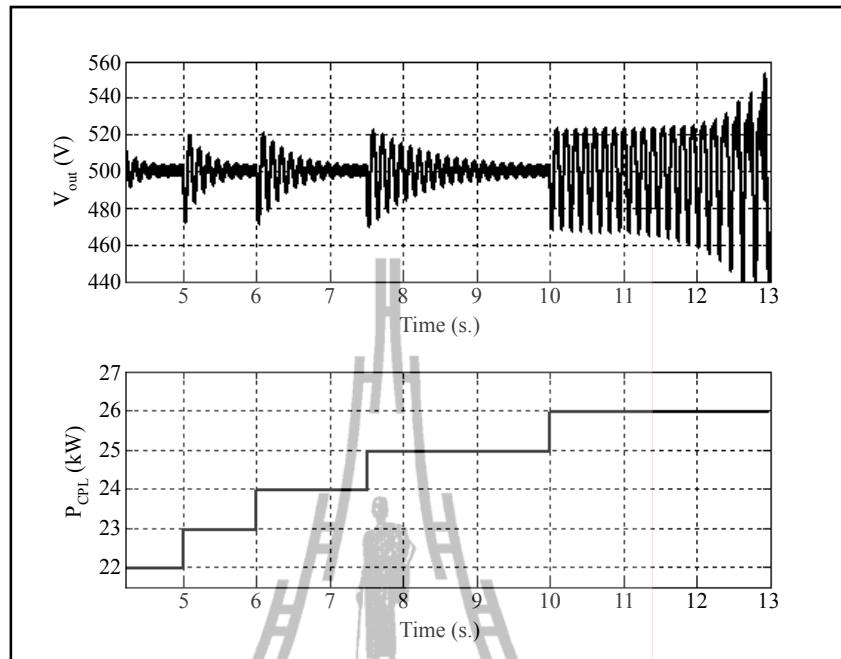


รูปที่ 6.9 ค่าเงาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 6.10 ภาพขยายส่วนที่สำคัญจากรูปที่ 6.9

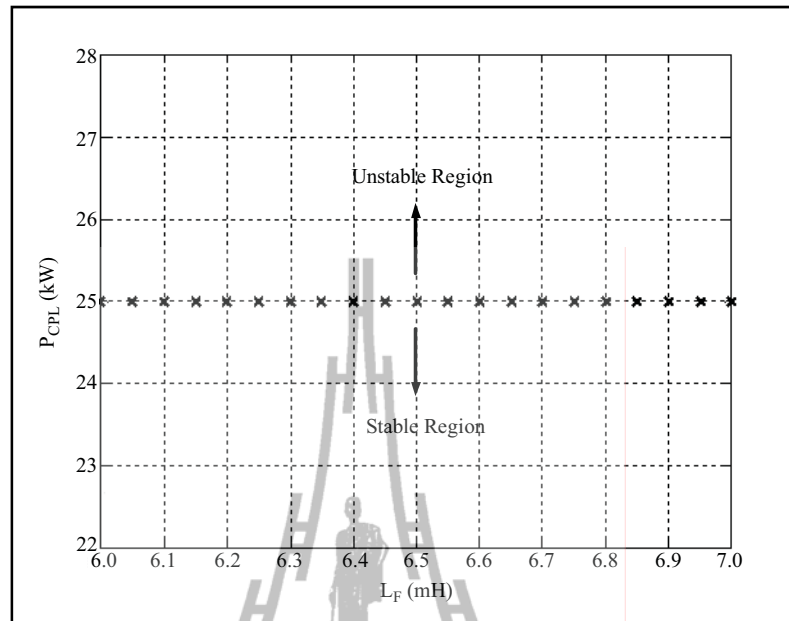
สำหรับรูปที่ 6.11 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การขาดเสถียรภาพของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากทฤษฎี สำหรับภาพด้านบนแสดงผลตอบสนองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบ ส่วนภาพด้านล่างแสดงการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับ จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า ระบบเกิดสภาวะการทำงานที่ขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 26 kW ซึ่งมีค่ามากกว่า 25 kW ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากทฤษฎีค่าเจาะจงที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.11 ผลการจำลองสถานการณ์การขาดเสถียรภาพ

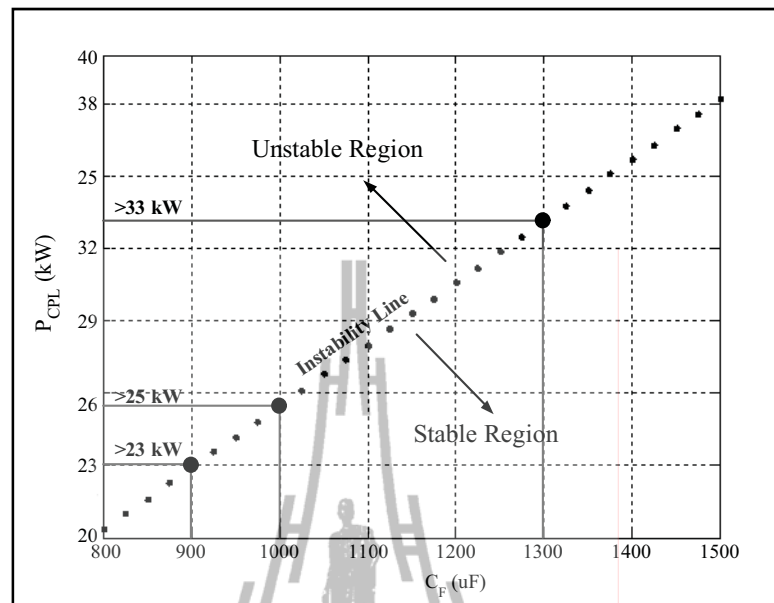
6.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบ

ในหัวข้อนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.1 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ L_F และ C_F ของวงจรกรอง รวมถึงความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า (ω_m) และความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (ω_n) ที่สามารถกำหนดได้ด้วยการออกแบบทางวิศวกรรม ดังนั้น จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีต่อเสถียรภาพของระบบ สำหรับรูปที่ 6.12 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_F ไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ

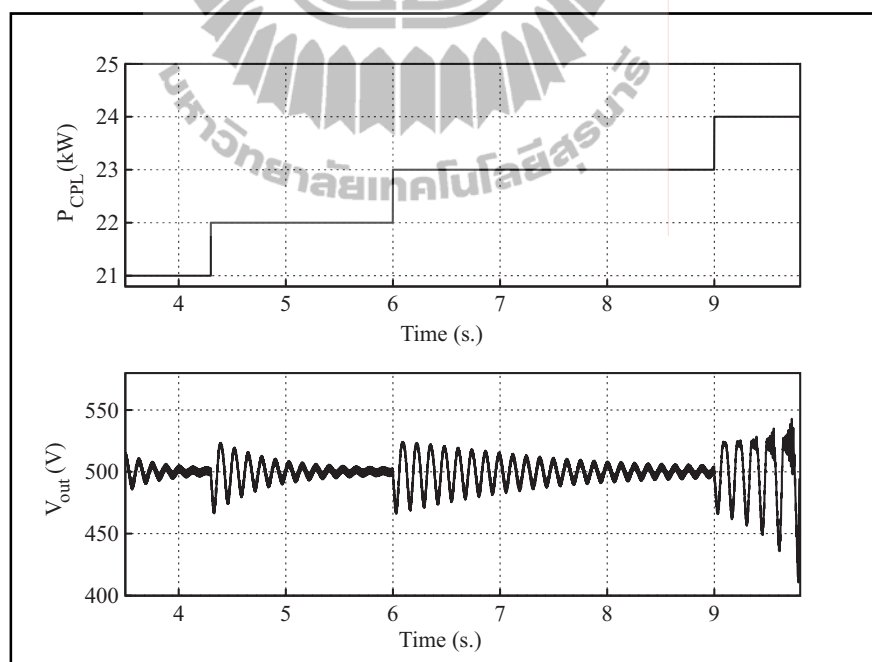


รูปที่ 6.12 ขอบเขตเสถียรภาพของระบบเมื่อ L_F เปลี่ยนแปลง

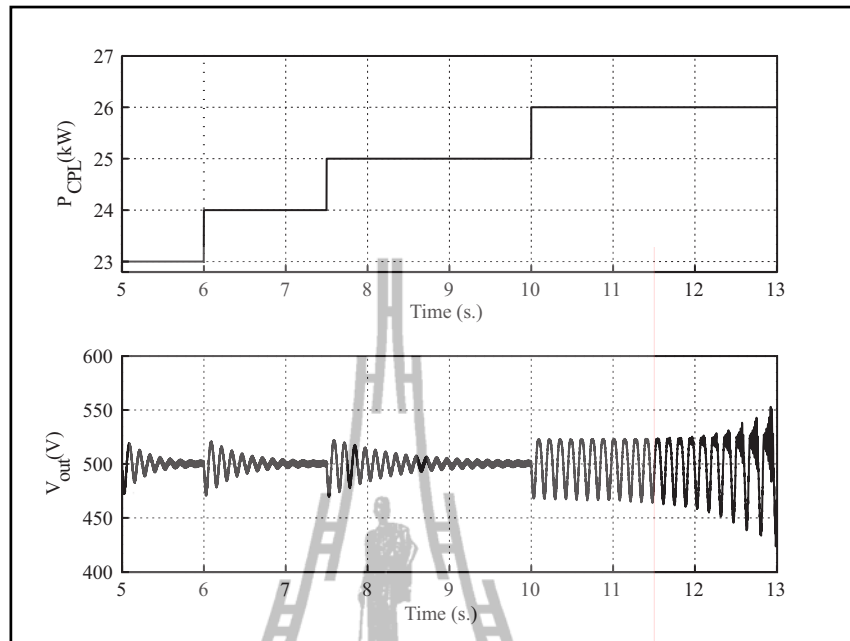
จากรูปที่ 6.13 แสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของ C_F ซึ่งจะเห็นว่า เสถียรภาพของระบบมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อ C_F มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการพิสูจน์และยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพได้พิจารณาที่ค่า C_F เท่ากับ 900 μF 1000 μF และ 1300 μF นำไปจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ และแสดงผลการจำลองดังกล่าวไว้ในรูปที่ 6.14 ถึง รูปที่ 6.16 ตามลำดับ ซึ่งในการจำลองสถานการณ์กำหนดให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว P_{CPL} มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ จากการจำลองสถานการณ์ แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพ และทำนายจุดการทำงานที่ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ยังสามารถแสดงขอบเขตเสถียรภาพของระบบเมื่อ C_F มีการเปลี่ยนแปลงได้อีกด้วย



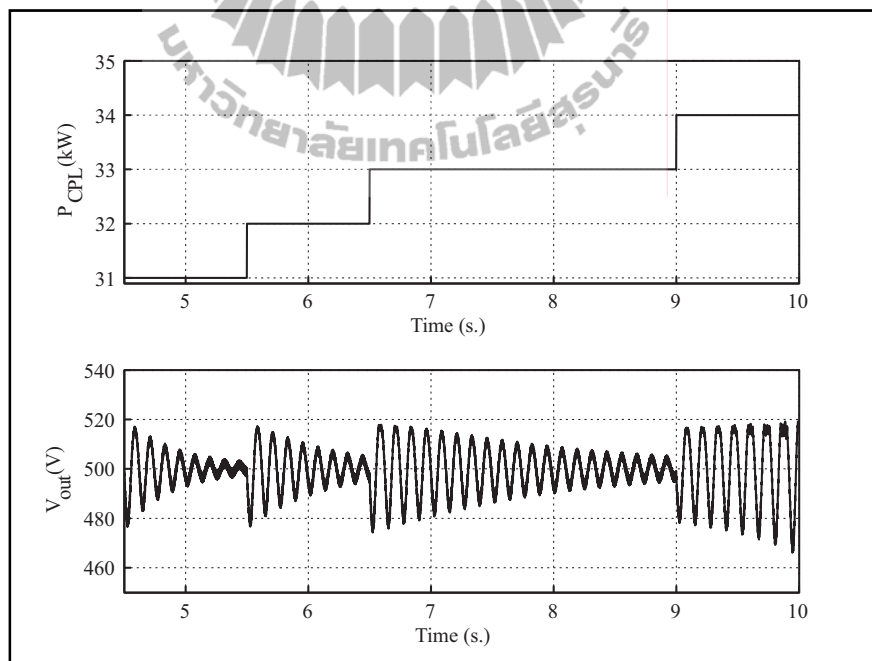
รูปที่ 6.13 ขอบเขตเสถียรภาพของระบบเมื่อ C_F เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.14 การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สำหรับ $C_F = 900 \mu\text{F}$

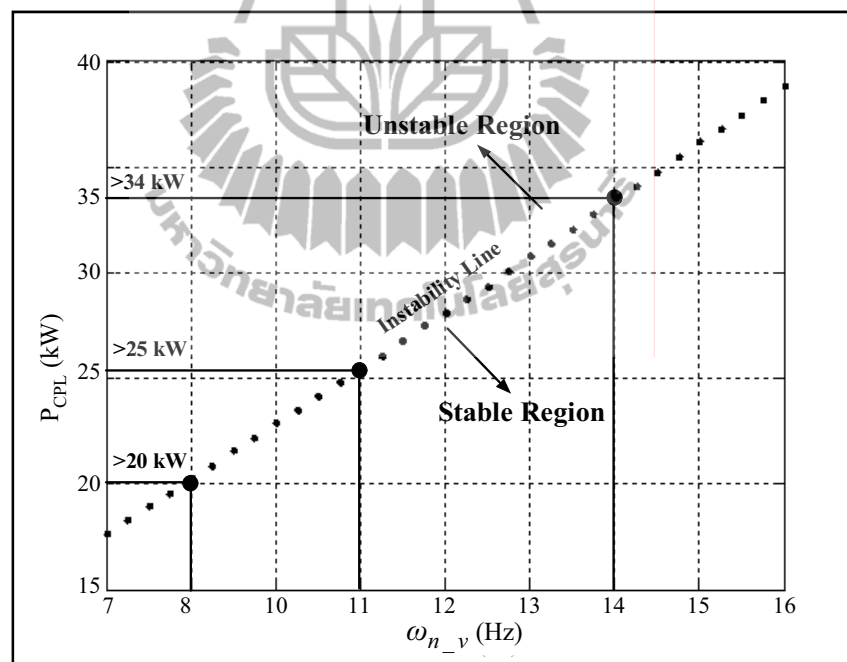


รูปที่ 6.15 การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สำหรับ $C_F = 1000 \mu\text{F}$

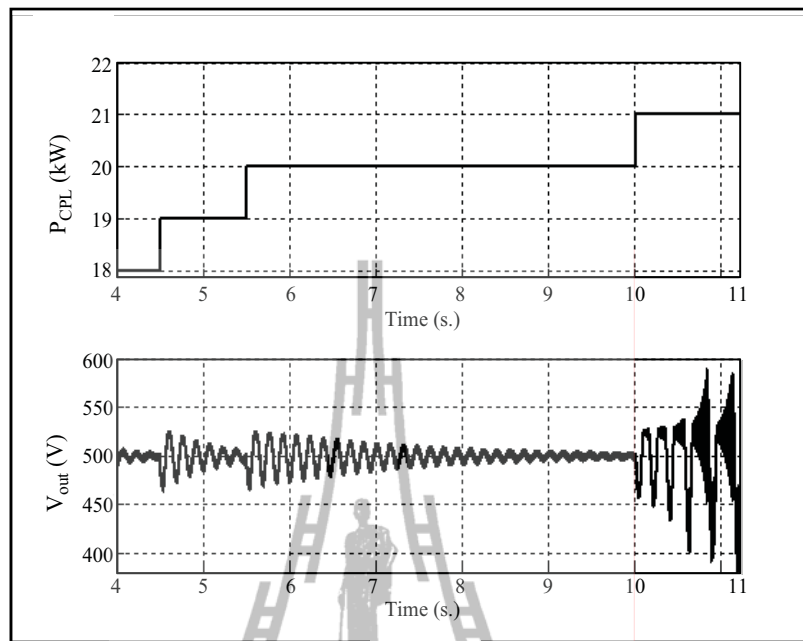


รูปที่ 6.16 การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สำหรับ $C_F = 1300 \mu\text{F}$

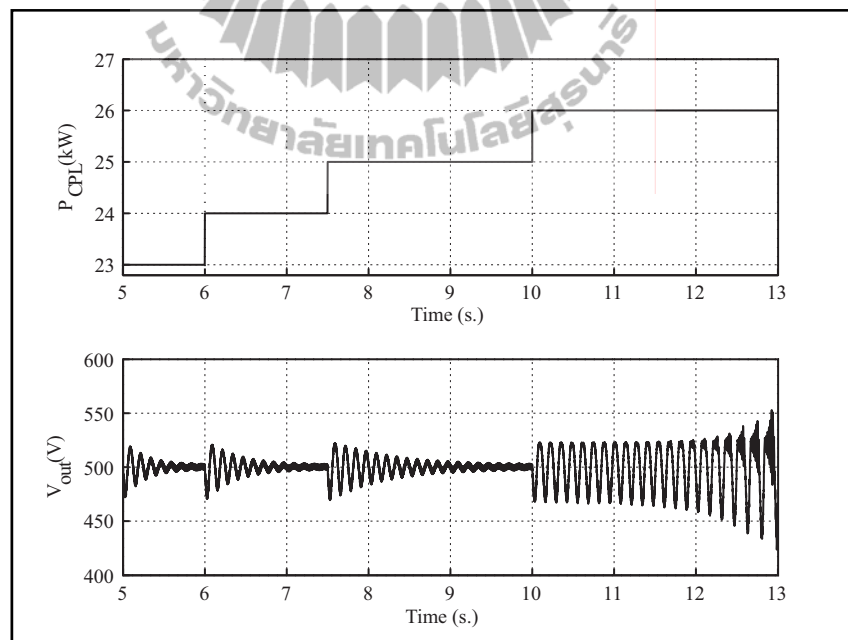
สำหรับระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบพีไอ ซึ่งมีการกำหนดค่าความถี่ธรรมชาติต่าง ๆ ถูกลำนำวิเคราะห์ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 6.17 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (ω_n) เปลี่ยนแปลง โดยได้รับการยืนยันผลการวิเคราะห์ดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 6.18 ถึง รูปที่ 6.20 กราฟด้านบนแสดงการเปลี่ยนแปลงของโพลค่าตั้งไฟฟ้าคงตัว ส่วนกราฟด้านล่าง แสดงผลการตอบสนองสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบ เมื่อมีความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จากผลการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถคาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้อง และยังแสดงให้เห็นว่า ความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะทำให้ระดับของกำลังไฟฟ้าที่จะเกิดการขาดเสถียรภาพเพิ่มขึ้นหรืออีกความหมายหนึ่งก็คือ ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อเสถียรภาพของระบบอย่างมีนัยสำคัญ



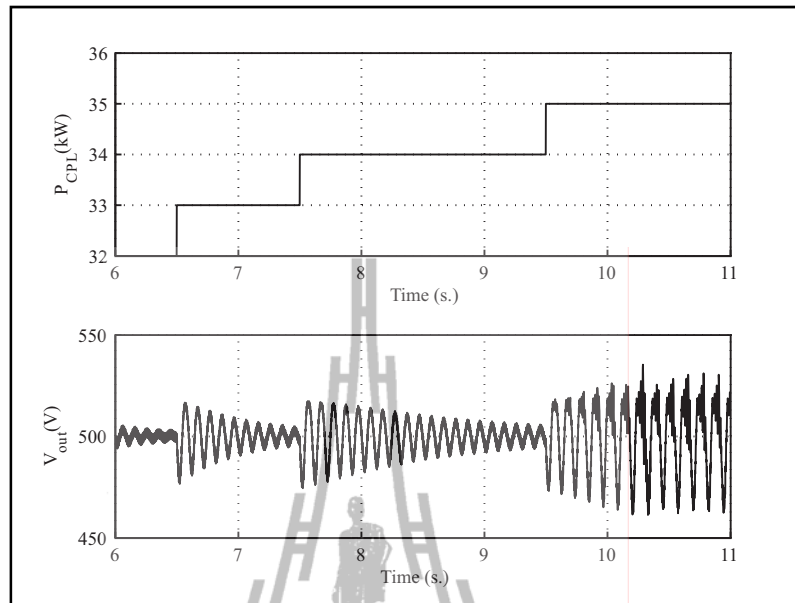
รูปที่ 6.17 ขอบเขตเสถียรภาพของระบบเมื่อ ω_n เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.18 การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สำหรับ $\omega_{nv} = 2\pi \times 8$ rad/s

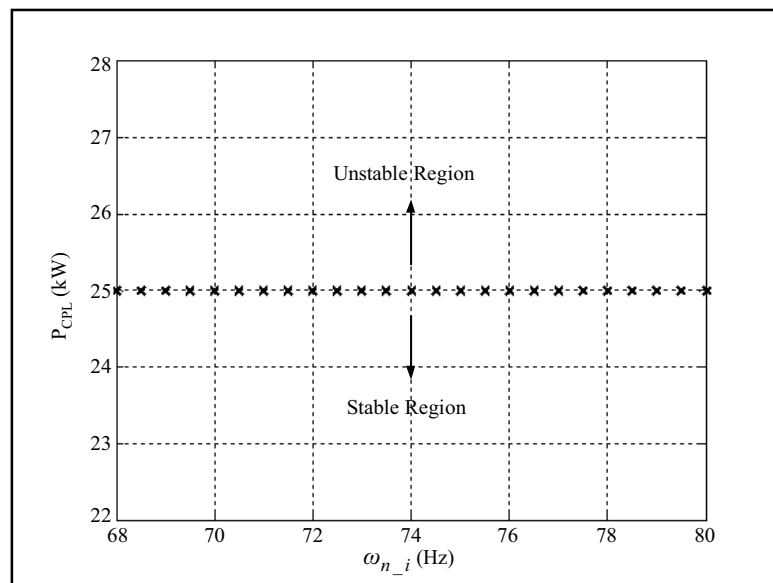


รูปที่ 6.19 การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สำหรับ $\omega_{nv} = 2\pi \times 10$ rad/s



รูปที่ 6.20 การจำลองสถานการณ์ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สำหรับ $\omega_w = 2\pi \times 13$ rad/s

สำหรับรูปที่ 6.21 แสดงขอบเขตเสถียรภาพของระบบเมื่อค่าความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า (ω_{ni}) เปลี่ยนแปลง ซึ่งผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ พบว่า ความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมกระแส ไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ



รูปที่ 6.21 ขอบเขตเสถียรภาพของระบบเมื่อ ω_{ni} เปลี่ยนแปลง

6.8 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยวิธีการแปลงดีคิว และการทำให้เป็นเชิงเส้นของเทย์เลอร์ จึงทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ที่พิจารณารอบจุดการทำงาน สำหรับค่าในสถานะคงตัวที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอาศัยการเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ในบทนี้ได้นำเสนอ วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง ซึ่งคำนวณค่าเจาะจงโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น รวมถึงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อเสถียรภาพของระบบ โดยการเพิ่มค่าความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มค่า C_F ของวงจรกรองยังมีส่วนช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบด้วยเช่นกัน โดยได้รับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และจากผลการจำลองสถานการณ์ แสดงให้เห็นว่า ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบมีความถูกต้อง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ สามารถคาดเดาจุดการทำงานของระบบที่อาจจะก่อให้เกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างแม่นยำ

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ดังที่นำเสนอไว้ในบทที่ 6 ได้รับการตีพิมพ์แล้ว ดังนี้

- Koson Chaijarumudomrung, Kongpan Areerak, and Kongpol Areerak, "The Stability Study of AC-DC Power System with Controlled Rectifier Including Effect of Voltage Control", European Journal of Scientific Research, October 2011, vol. 62, no. 4, pp. 463-480.

บทที่ 7

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

7.1 บทนำ

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ให้มีสมรรถนะในการควบคุมการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญต่อการนำวงจรดังกล่าวไปใช้งานอุตสาหกรรม ในบทนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว โดยนำเสนอแนวทางใหม่สำหรับการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสม โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่พิสูจน์จากวิธีการแปลงดีคิว เนื่องจากการจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์นานมาก ดังนั้น การประยุกต์วิธีการปัญญาประดิษฐ์สำหรับระบบดังกล่าวจึงยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบมาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์แทนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งการนำเสนอในบทนี้ ถือเป็น การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกลักษณะหนึ่งที่นอกเหนือจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังที่ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 6 วัตถุประสงค์ในการออกแบบ คือ เพื่อให้ตัวควบคุมแบบพีไอสามารถควบคุมการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้มีสมรรถนะดียิ่งขึ้น ผลการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวจะนำไปเปรียบเทียบกับ การออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม นอกจากนี้ในบทนี้มีการอธิบายกระบวนการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ขอบเขตการค้นหา และการทดสอบพารามิเตอร์ รวมทั้งผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผลไว้ในบทนี้ด้วยเช่นกัน

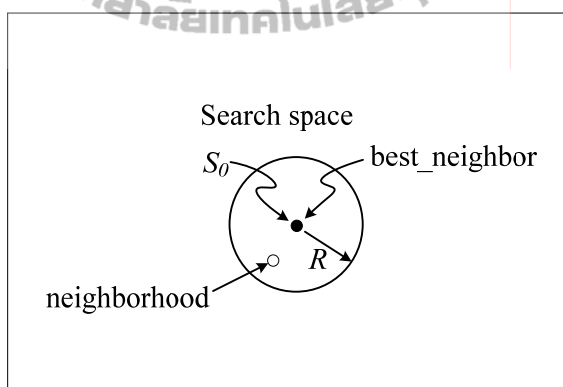
7.2 การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (adaptive tabu search: ATS) เป็นวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์วิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งอัลกอริทึมนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามู (tabu search: TS) โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูได้นำมาประยุกต์ใช้ในการ

แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization) ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวได้ถูกคิดค้นโดย Glover ปี 1989 (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2552) และต่อมาได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากเป็นอัลกอริทึมที่มีความสามารถในการหลีกเลี่ยงคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) และยังสามารถทำการค้นหาคำตอบจรรยาทั้งได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (near global solution) ต่อมาในปี พ.ศ. 2545 กองพัน อารีรักษ์ และ สราวุฒิ สุจิตจร ได้พัฒนาและปรับปรุงอัลกอริทึมดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพการค้นหาที่ดียิ่งขึ้น โดยการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในอัลกอริทึม สำหรับกลไกแรก คือ การเดินย้อนรอย (black-tracking) เป็นกลไกที่อนุญาตให้ระบบการค้นหาสามารถย้อนกลับไปค้นหาคำตอบบริเวณพื้นที่เดิมที่เคยถูกค้นหามาก่อน ซึ่งทำให้ระบบการค้นหามีโอกาสที่จะค้นหาคำตอบในบริเวณพื้นที่ใหม่ และหลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ กลไกที่สอง คือ การปรับรัศมีในการค้นหา (adaptive radius) ซึ่งจะทำการปรับลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง โดยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังนี้

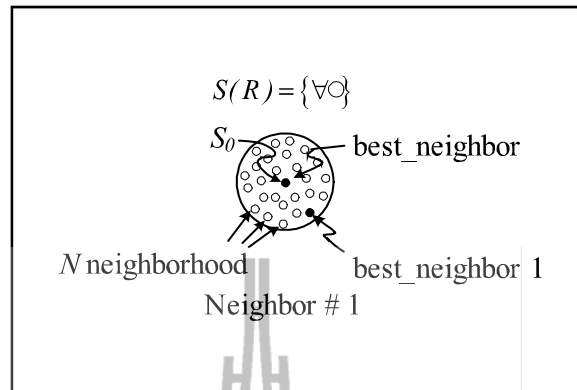
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น S_0 ภายในพื้นที่การค้นหา และให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 7.1



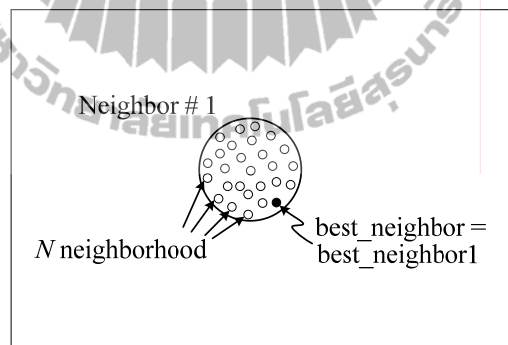
รูปที่ 7.1 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา

ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบ รอบ ๆ S_0 (neighborhood) ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง ดังรูปที่ 7.2

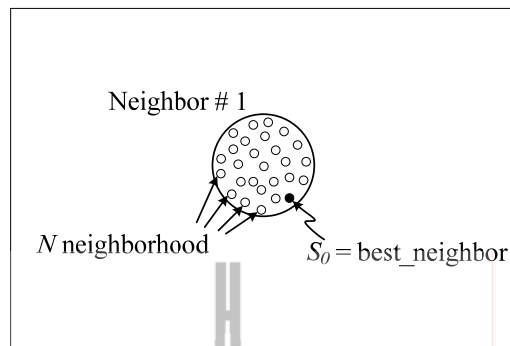
รูปที่ 7.2 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินค่าตอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ โดยกำหนดให้ S_1 เป็นคำตอบที่ดีที่สุด (best_neighbor1) ใน $S(R)$

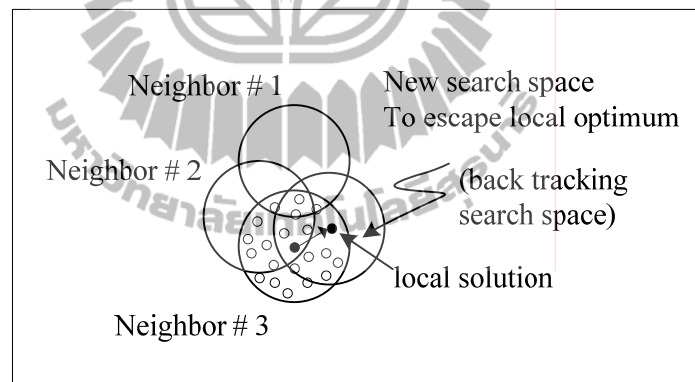
ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ ดังนั้นกำหนดให้ $S_0 = S_1$ และเก็บค่า S_0 ในรายการตามรูปร่างที่ 7.3 และรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.3 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่

รูปที่ 7.4 กำหนดค่า S_0 ใหม่

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า $count \geq count_{max}$ จะหยุดกระบวนการการค้นหา โดยที่ค่า S_0 คือ ค่าตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 และเริ่มกระบวนการใหม่อีกครั้งจนกระทั่งได้คำตอบที่พอใจ



รูปที่ 7.5 กลไกการเดินย้อนรอย

ขั้นตอนที่ 7 จะเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตามเพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังรูปที่ 7.5 ซึ่งใช้ค่า local solution ในรายการตามเป็นค่าเริ่มต้นการค้นหา

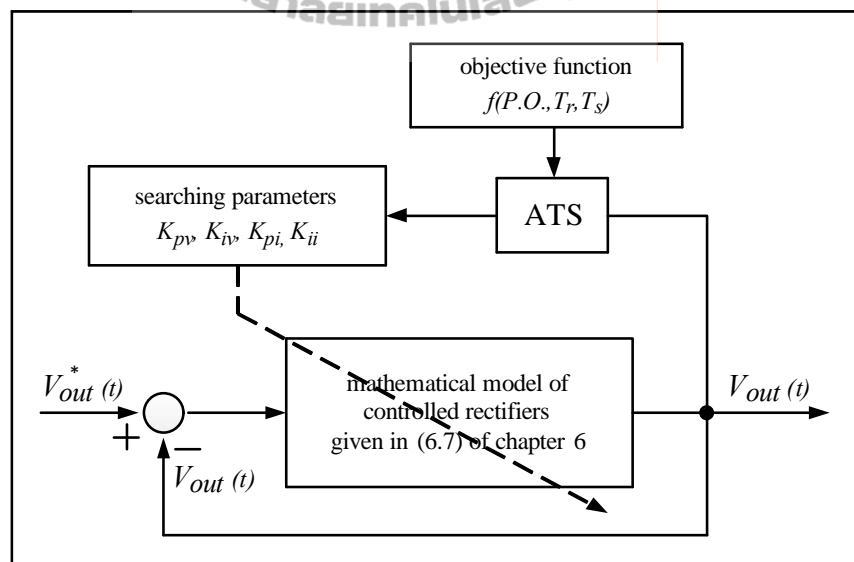
ขั้นตอนที่ 8 จะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7.1)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (7.1)$$

โดยที่ DF คือ ตัวประกอบปรับลดค่ารัศมี (decreasing factor)

7.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาชูเชิงปรับตัว

การปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ที่แสดงในรูปที่ 6.1 และ รูปที่ 6.2 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบพีไอ ในบทนี้จะดำเนินการ โดยการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ โดยใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า การค้นหาแบบตาชูเชิงปรับตัวตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 7.2 ซึ่งมีกระบวนการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอที่ใช้ในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาชูเชิงปรับตัว โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงไว้แล้วในสมการที่ (6.7) ของบทที่ 6 หลักการออกแบบตัวควบคุมที่อาศัยวิธีการค้นหาแบบตาชูเชิงปรับตัว แสดงได้ ดังรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.6 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีการค้นหาแบบตาชูเชิงปรับตัว

จากรูปที่ 7.6 กระบวนการปรับปรุงสมรรถนะตัวควบคุมแบบพีไอจะเริ่มทำการค้นหาพารามิเตอร์ K_{pv} , K_{iv} , K_{pi} และ K_{ii} ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าและตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า โดยนำไปจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ซึ่งได้รับการอธิบายไว้แล้วในบทที่ 6 หลังจากนั้นจะนำผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรดังกล่าว ซึ่งเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกนำไปคำนวณตัวชี้วัดด้วยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งใช้ค่า W เป็นชี้วัดคุณภาพของคำตอบในแต่ละของรอบการค้นหา ทั้งนี้ เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีไอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ให้สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ตามค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ซึ่งถ้าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีผลตอบสนองที่ดีจะส่งผลให้ค่า W มีค่าน้อย โดยที่ค่า W สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (7.2) และสมการที่ (7.3) ดังนี้

$$W(T_R, T_S, P.O.) = \sigma T_R + \alpha T_S + \gamma P.O. \quad (7.2)$$

โดยที่ $P.O.$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าพุ่งเกินของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (เปอร์เซ็นต์)
 T_R คือ ค่าเวลาขึ้นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (วินาที)
 T_S คือ ค่าเวลาสู่เข้าสู่สภาวะคงตัวของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (วินาที)

$$\sigma + \alpha + \gamma = 1 \quad (7.3)$$

เมื่อ σ , α และ γ คือค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการกำหนดนัยสำคัญของค่า T_R , T_S และ $P.O.$ ตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ค่า σ , α และ γ มีค่าเท่ากับ 0.33, 0.33 และ 0.34 ตามลำดับ ซึ่งหมายถึง การออกแบบจะให้ความสำคัญของค่า $P.O.$, T_R และ T_S เท่า ๆ กัน

7.3.1 การทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสำหรับการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้มีพารามิเตอร์ที่สำคัญทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ซึ่งได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง รัศมีเริ่มต้น และตัวปรับลดรัศมี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยมีขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดของพารามิเตอร์ K_{pv} , K_{iv} , K_{pi} และ K_{ii} เป็น [0.071-0.151] [1.934-8.883] [3.237-4.544] และ [641.524-1257.4] ตามลำดับ ซึ่งค่าเหล่านี้

คำนวณได้จากการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 6 หัวข้อที่ 6.5 ขอบเขตของพารามิเตอร์สามารถคำนวณได้โดยใช้ $\omega_{ni} = 2\pi \times 50$ rad/s ถึง $2\pi \times 70$ rad/s และ $\omega_{nv} = 2\pi \times 7$ rad/s ถึง $2\pi \times 15$ rad/s ซึ่งกำหนดให้ค่า ω_{ni} มีค่ามากกว่า ω_{nv} ประมาณ 5 ถึง 10 เท่า และ $\zeta = 0.8$ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (6.7) เป็นดังตารางที่ 6.1 ในบทที่ 6 โดยที่ ω_{ni} คือ ความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า และ ω_{nv} คือ ความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า การเลือกค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว จะใช้เกณฑ์การพิจารณาค่า W เฉลี่ย และค่าจำนวนรอบเฉลี่ยในการเปรียบเทียบควบคู่กันไป ซึ่งการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นของการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว สำหรับการออกแบบตัวควบคุมของวงจรเรียงกระแสแบบควบคุมได้ ได้ทำการทดสอบที่ค่า 5 10 15 และ 20 โดยกำหนด จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 5 และค่าตัวประกอบปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.1 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 7.1 จากตารางดังกล่าว สังเกตได้ว่า ที่ค่าจำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 และ 20 พบว่า ที่จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 และ 20 จะมีค่าทดสอบที่น้อยใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยจำนวนรอบการค้นหาที่พบคำตอบของทั้งสองกรณี พบว่า ที่จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่าเท่ากับ 10

ตารางที่ 7.1 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ค่าที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 5 คำตอบ						
ค่า W	1.5495	1.548	1.5393	1.5323	1.546	1.5430
จำนวนรอบ	11	15	10	44	24	20.8
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า W	1.529	1.5336	1.5432	1.5239	1.523	1.5305
จำนวนรอบ	4	3	3	11	14	4.81
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 15 คำตอบ						
ค่า W	1.5408	1.5486	1.5373	1.5461	1.5273	1.5400
จำนวนรอบ	5	27	8	8	4	10.4
จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า W	1.5481	1.5409	1.5395	1.533	1.5288	1.5381
จำนวนรอบ	4	6	4	9	4	5.4

การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างของการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว สำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 10 15 และ 20 เช่นกัน โดยกำหนด จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 10 ค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 5 และ ค่าตัวประกอบปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.1 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 7.2 จากตารางดังกล่าว เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย W พบว่า ที่จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 จะมีค่าน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยจำนวนรอบการค้นหาที่พบคำตอบ พบว่า มีค่าค่อนข้างมากกว่ากรณีอื่น ๆ แต่เนื่องด้วยผู้วิจัยพิจารณาที่ค่า W เป็นเกณฑ์สำคัญ ดังนั้น จึงเลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10

ตารางที่ 7.2 ผลการทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ครั้งที่ ค่าที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 5 คำตอบ						
ค่า W	1.541	1.5392	1.5384	1.5397	1.5323	1.5381
จำนวนรอบ	5	2	22	2	9	9.2
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ						
ค่า W	1.533	1.5203	1.5197	1.532	1.5344	1.5278
จำนวนรอบ	10	7	3	9	29	11.6
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 15 คำตอบ						
ค่า W	1.5255	1.5348	1.5197	1.5206	1.542	1.5285
จำนวนรอบ	2	2	3	4	3	2.8
จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 20 คำตอบ						
ค่า W	1.5393	1.5192	1.5323	1.5351	1.527	1.5305
จำนวนรอบ	3	2	3	2	2	2.4

การทดสอบจำนวนค่ารัศมีเริ่มต้นของการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว สำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 1 2 3 4 และ 5 โดยกำหนด จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 10 จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 10 และตัวประกอบปรับลดรัศมี เท่ากับ 1.1 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 7.3

จากตารางดังกล่าว เมื่อพิจารณาค่า W เฉลี่ย พบว่า กรณีค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1 จะให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุด ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1

ตารางที่ 7.3 ผลการทดสอบค่ารัศมีเริ่มต้น

ครั้งที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 0.5						
ค่า W	1.5091	1.525	1.5223	1.51	1.527	1.5186
จำนวนรอบ	11	7	5	3	16	8.4
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1						
ค่า W	1.5199	1.523	1.5093	1.511	1.5075	1.5141
จำนวนรอบ	36	20	8	11	27	20.4
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 2						
ค่า W	1.5231	1.519	1.5093	1.531	1.5175	1.5199
จำนวนรอบ	21	2	10	11	13	11.4
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 3						
ค่า W	1.5083	1.5369	1.526	1.5277	1.5175	1.5232
จำนวนรอบ	11	31	7	54	4	21.4
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 4						
ค่า W	1.514	1.5213	1.5286	1.5386	1.5075	1.5220
จำนวนรอบ	7	79	3	3	70	32.4
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 5						
ค่า W	1.5231	1.5358	1.535	1.509	1.513775	1.5233
จำนวนรอบ	34	4	12	2	2	10.8

การทดสอบจำนวนค่าปรับลดรัศมีของการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว สำหรับใช้ออกแบบตัวควบคุมฟิวเจอร์ของวงจรกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.1 1.2 1.3 1.4 และ 1.5 โดยกำหนด จำนวนคำตอบเริ่มต้น เท่ากับ 10 จำนวนคำตอบรอบข้าง เท่ากับ 10 และค่ารัศมีเริ่มต้น เท่ากับ 1 ซึ่งผลการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 7.4 จาก

ตารางดังกล่าว เมื่อพิจารณาที่ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 จะทำให้มีค่าเฉลี่ย W น้อยที่สุด ดังนั้นผู้วิจัย จึงเลือกใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

ตารางที่ 7.4 ผลการทดสอบค่าปรับลดรัศมี

ครั้งที่ทดสอบ \ ครั้งที่	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย
ค่ารัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1.1						
ค่า W	1.524	1.5252	1.5126	1.539	1.5035	1.5208
จำนวนรอบ	47	10	58	24	21	32
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2						
ค่า W	1.5083	1.5246	1.5222	1.517	1.5077	1.5159
จำนวนรอบ	5	11	31	56	8	22.2
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3						
ค่า W	1.5137	1.509	1.5133	1.5056	1.5105	1.5104
จำนวนรอบ	27	36	52	64	15	38.8
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4						
ค่า W	1.515	1.5121	1.5287	1.5132	1.5276	1.5193
จำนวนรอบ	8	20	85	28	72	42.6
ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.5						
ค่า W	1.501	1.5165	1.5185	1.519	1.5202	1.5150
จำนวนรอบ	31	56	55	73	17	46.4

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวทั้งหมดข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวสำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- เลือกใช้จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10
- เลือกใช้จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10
- เลือกใช้ค่ารัศมีเท่ากับ 1
- เลือกใช้ค่าปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

7.3.2 การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K_{pv} , K_{iv} , K_{pi} และ K_{ii} ของตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ โดยใช้การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว แสดงขั้นตอนการ ออกแบบและการกำหนดพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวได้ ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ K_{pv} เท่ากับ 0.071-0.151 K_{iv} เท่ากับ 1.934-8.883 K_{pi} เท่ากับ 3.237-4.544 และ K_{ii} เท่ากับ 641.524-1257.4

ขั้นที่ 2 กำหนดการสุ่มค่าตอบเริ่มต้นจำนวนเท่ากับ 10

ขั้นที่ 3 กำหนดการสุ่มค่าตอบรอบข้างภายในรัศมีการค้นหาจำนวนเท่ากับ 10

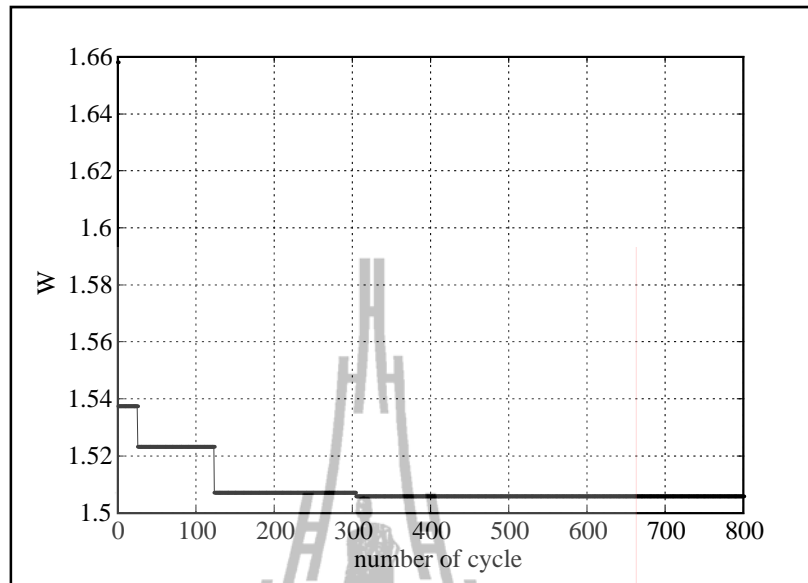
ขั้นที่ 4 กำหนดค่ารัศมีเริ่มต้นสำหรับการค้นหาเท่ากับ 1

ขั้นที่ 5 กำหนดค่าตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3

ขั้นที่ 6 กำหนดเงื่อนไขการเดินย้อนรอย โดยถ้าระบบการค้นหาไม่สามารถหลุด ออกจากคำตอบแบบท้องถิ่น (local solution) ได้เป็นจำนวน 100 รอบการค้นหา กำหนดให้มีการ เดินย้อนรอยเกิดขึ้น

ขั้นที่ 7 กำหนดจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด ($count_{max}$) เท่ากับ 800 รอบ

จากการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ภายใต้ขั้นตอนการออกแบบข้างต้น ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ แสดงได้ดังรูปที่ 7.7 ซึ่งแสดงการเข้าสู่ของ \mathcal{W} ที่ค่าเท่ากับ 1.4884 ในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 800 โดยในช่วงรอบการค้นหาที่ 124 ถึง 304 \mathcal{W} มีค่า เท่ากับ 1.5070 ซึ่งค่า \mathcal{W} ดังกล่าว เป็นคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่นอย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมการ ค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว สามารถค้นหาพบคำตอบที่ดีกว่าที่ค่าเท่ากับ 1.5058 ในรอบการค้นหา ที่ 305 ทั้งนี้เนื่องจากผลของการเดินย้อนรอยภายในอัลกอริทึม จึงทำให้ระบบการค้นหาสามารถ หลุดออกจากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นสู่บริเวณค้นหาที่ให้คำตอบที่ดีขึ้น สำหรับค่าพารามิเตอร์ของ ตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว คือ K_{pv} เท่ากับ 0.1502 K_{iv} เท่ากับ 8.5512 K_{pi} เท่ากับ 4.1352 และ K_{ii} เท่ากับ 1042.6

รูปที่ 7.7 การดูเข้าหาค่าตอบ W

7.4 ผลการจำลองสถานการณ์และการอภิปรายผล

เพื่อตรวจสอบสมรรถนะของระบบที่มีตัวควบคุมที่ผ่านการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SimPowerSystem ใน SIMULINK มาจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีตัวควบคุมซึ่งได้รับการออกแบบจากวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว จากนั้นผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลของระบบที่มีตัวควบคุมออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.5 ของบทที่ 6 โดยกำหนดค่า $\omega_{nv} = 2\pi \times 10$ rad/s และ $\omega_{ni} = 2\pi \times 60$ rad/s สำหรับผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุม และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟิวของวงจรรีจกกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้สามารถพิจารณาได้ดังตารางที่ 7.5

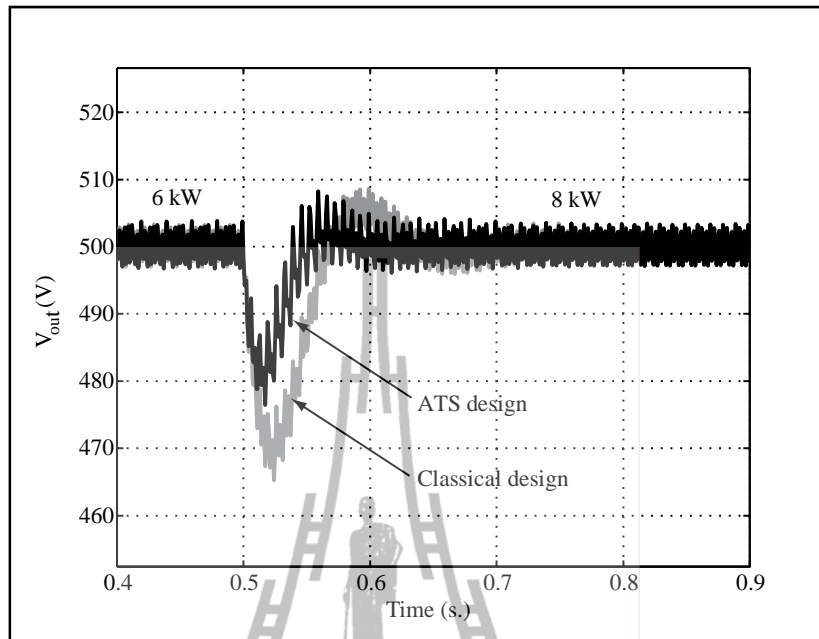
ตารางที่ 7.5 ผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

ตัวควบคุม	วิธีการออกแบบตัวควบคุม	
	วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	วิธีดั้งเดิม
K_{pv}	0.1502	0.101
K_{iv}	8.5512	3.948
K_{pi}	4.1352	3.891
K_{ii}	1042.6	923.795

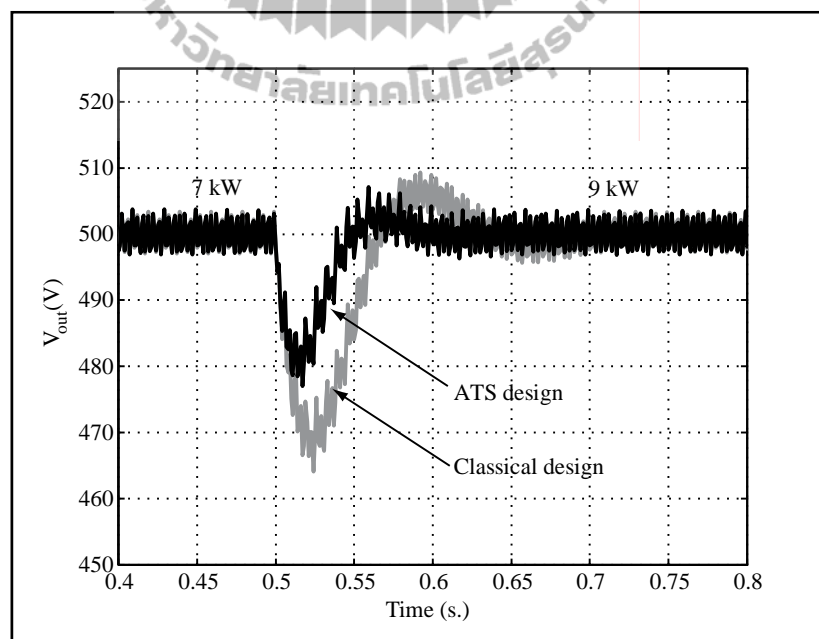
ตารางที่ 7.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม

สมรรถนะการควบคุม	วิธีการออกแบบตัวควบคุม	
	วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	วิธีดั้งเดิม
T_R	0.0390	0.0540
T_S	0.1290	0.2660
$P.O.$	4.2651	6.8002
W	1.5056	2.4177

สำหรับรูปที่ 7.8 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ที่อาศัยการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งแสดงผลตอบสนองของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 6 kW เป็น 8 kW ที่เวลา $t = 0.5$ s สำหรับกรณีแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิงกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 500 V และในทำนองเดียวกันรูปที่ 7.9 แสดงผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 7 kW เป็น 9 kW ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ที่ออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว จะมีผลตอบสนองที่ดีกว่าตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม



รูปที่ 7.8 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้
เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเปลี่ยนแปลงจาก 6 kW เป็น 8 kW



รูปที่ 7.9 ผลตอบสนองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้
เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเปลี่ยนแปลงจาก 7 kW เป็น 9 kW

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จะมีความรวดเร็วมากกว่าการใช้แบบจำลองทั่วไปในการจำลองสถานการณ์ของการค้นหาในแต่ละรอบ เนื่องจากแบบจำลองทั่วไป มักเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเป็นผลมาจากการสวิตชิงของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง นอกจากนี้หลังจากการออกแบบตัวควบคุมยังสามารถนำพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้อีกด้วย ดังที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6

7.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการค้นหาที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง การกำหนดขอบเขตของการค้นหา และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ให้เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการค้นหา หลังจากการทดสอบงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 รัศมีเริ่มต้นเท่ากับ 1 และ ตัวประกอบปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.3 ซึ่งส่งผลให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (f) ลดลง และจากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่า ตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว จะมีสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีตัวควบคุมแบบพีไอที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม จากผลการออกแบบในบทนี้แสดงให้เห็นถึงการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มาใช้งานร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งนำมาทำการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ได้สมรรถนะของสัญญาณเอาต์พุตที่ดีที่สุดและดีกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม การใช้ประโยชน์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการหาตัวควบคุมของระบบที่ดีที่สุดผ่านวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ คือ ประโยชน์อีกอย่างหนึ่งนอกเหนือจากการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในส่วนของการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ โดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ดังที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 7 ได้รับการตีพิมพ์แล้ว ดังนี้

- K. Chaijarunudomrung, K-N. Areerak, K-L. Areerak, and A. Srikaew, "The Controller Design of Three-Phase Controlled Rectifier Using an Adaptive Tabu Search Algorithm", The 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2011), 2011, pp. 605-608

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการอื่น เช่น วิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม วิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค และวิธีการค้นหาแบบฝูงผึ้งประดิษฐ์ โดยมีหลักการออกแบบเช่นเดียวกับเนื้อหาในบทที่ 7

- K. Chaijarunudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "The Controller Design of Three-Phase Controlled Rectifier using a Particle Swarm Optimization", European Journal of Scientific Research, vol. 59, no. 4, pp. 561-570

- Koson Chaijarunudomrung, Kongpan Areerak, and Kongpol Areerak, "The Controller Design of Three-Phase Controlled Rectifier Using an Artificial Intelligence Technique", European Journal of Scientific Research, vol. 62, no. 3, pp. 410-425

- K. Chaijarunudomrung, K-N. Areerak*, K-L. Areerak, and Umaporn Kwannetr, "Optimal Controller Design of Three-Phase Controlled Rectifier Using Artificial Intelligence Techniques", ECTI Transaction on Electrical Eng., Electronics, and Communication (ECTI-EEC) (รอการอนุมัติ)



บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เริ่มจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมาเกี่ยวกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังหรือวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าดังกล่าว มีความจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งจากการค้นคว้า พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีค่าเฉลี่ยทั่วไปปริภูมิสถานะ วิธีการแปลงดีคิว และวิธีค่าเฉลี่ยไม่เป็นเชิงเส้น เป็นต้น สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ โดยใช้วิธีการแปลงดีคิว และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าดังกล่าวด้วยทฤษฎีค่าเฉลี่ยจริง รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม และการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

วิธีการแปลงดีคิวเป็นการแปลงทางคณิตศาสตร์ที่สามารถลดความซับซ้อนของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสมมูลได้เป็นอย่างดี ซึ่งวิธีการแปลงดังกล่าว สามารถแปลงปริมาณทางไฟฟ้าจากแกนสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าสองเฟสที่อยู่บนแกน dq โดยรายละเอียดต่าง ๆ สำหรับวิธีการแปลงดีคิวไปประยุกต์ใช้กับสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส พร้อมทั้งแสดงวงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกน dq ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ โดยวิธีการแปลงดีคิว ซึ่งสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องของระบบได้ เพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์และการวิเคราะห์ระบบ โดยพิจารณาโหลดของระบบเป็น 2 กรณี คือ กรณีโหลดตัวต้านทาน และ กรณีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเป็นสำคัญ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ใช้วิธีการเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีการแปลงดีคิวมีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้ในการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าได้ อย่างแม่นยำ โดยรายละเอียดต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุม โดยอาศัยวิธีการแปลงดีคิว ซึ่งพิจารณาโหลดของระบบเป็น 2 กรณี คือ โหลดตัวต้านทานและโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อาศัยการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องทั้งสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว และเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีผลต่อเสถียรภาพของระบบอย่างมีนัยสำคัญ จึงดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการคำนวณค่าเจาะจง โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีการแปลงดีคิว และการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพมีความถูกต้อง สามารถทำนายจุดการทำงานจากระบบที่จะเกิดการขาดเสถียรภาพได้ถูกต้อง นอกจากนี้ พบว่า เมื่อมุม α มีค่ามากขึ้นจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพลดลง ดังนั้น การนำวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุม ไปใช้งาน ต้องคำนึงไว้เสมอว่าค่า α ที่สูง ๆ จำทำให้ระบบง่ายต่อการขาดเสถียรภาพ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยวิธีการแปลงดีคิว การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอาศัยการเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ และการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าว ซึ่งคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ จากการวิเคราะห์พบว่า ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อเสถียรภาพ โดยการเพิ่มค่าความถี่ธรรมชาติของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มค่า C_F ของวงจรกรองยังมีส่วนช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบด้วยเช่นกัน ซึ่งได้รับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ มีความถูกต้องและสามารถคาดเดาจุดการทำงานจากระบบที่จะก่อให้เกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างแม่นยำ โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 6

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอเพื่อปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยอาศัยวิธีการทาง

ปัญญาประดิษฐ์ คือ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ วงจรดังกล่าวเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาการจำลองสถานการณ์ และนอกจากนี้สิ่งสำคัญ ในการค้นหาด้วยวิธีดังกล่าว คือ การกำหนดขอบเขตของการค้นหา และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ ให้เหมาะสม นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธี แบบดั้งเดิม ซึ่งพบว่า กรณีตัวควบคุมที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว มี สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ดีกว่า วิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม รายละเอียดต่าง ๆ ของการออกตัวควบคุมแบบพีไอ สำหรับ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ นำเสนอไว้ในบทที่ 7

8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เป็นการพิจารณาภายใต้เงื่อนไขตัวควบคุมของโหลดดังกล่าวมีความไวมาก เพื่อให้เกิดความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น ควรพิจารณาพลวัตของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแทนการใช้โหลดแบบอุดมคติ จึงเป็น สิ่งที่น่าสนใจ

- การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อยู่ ภายใต้เงื่อนไข วงจรแปลงผันกำลังต้องทำงานในโหมดนำกระแสแบบต่อเนื่อง ดังนั้น เพื่อให้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะดำเนินการภายใต้ เงื่อนไขโหมดนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง

- การออกแบบตัวควบคุมของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ด้วยวิธีการค้นหา แบบตามูเชิงปรับตัว ในส่วนของการคำนวณค่าชี้วัดคุณภาพของคำตอบ (M) ควรพิจารณาหน่วยใน การคำนวณให้เหมือนกันทั้งหมด

รายการอ้างอิง

- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552).1. **ปัญญาเชิงคำนวณ**. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- 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.** : 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.
- Areerak, K.-N., Kulworawanichpong, T., and Sujitjorn., S. (2004). Moving Towards a New Era of Intelligent Protection through Digital Relaying in Power Systems. **Springer-Verlag Heidelberg.** : 1255-1261.
- Baghranian, A., and Forsyth, A.J. (2004). Averaged-value models of twelve-pulse rectifiers for aerospace applications. **Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives.** 1 : 220-225.
- Emadi, A. (2004). Modeling and analysis of multiconverter DC power electronic systems using the generalized state-space averaging method., **IEEE Transactions on Industrial Electronics.** 51(3) : 661-668.
- Emadi, A. (2004). Modeling of power electronic loads in AC distribution systems using the generalized State-space averaging method. **IEEE Transactions on Industrial Electronics.** 51(5) : 992-1000.

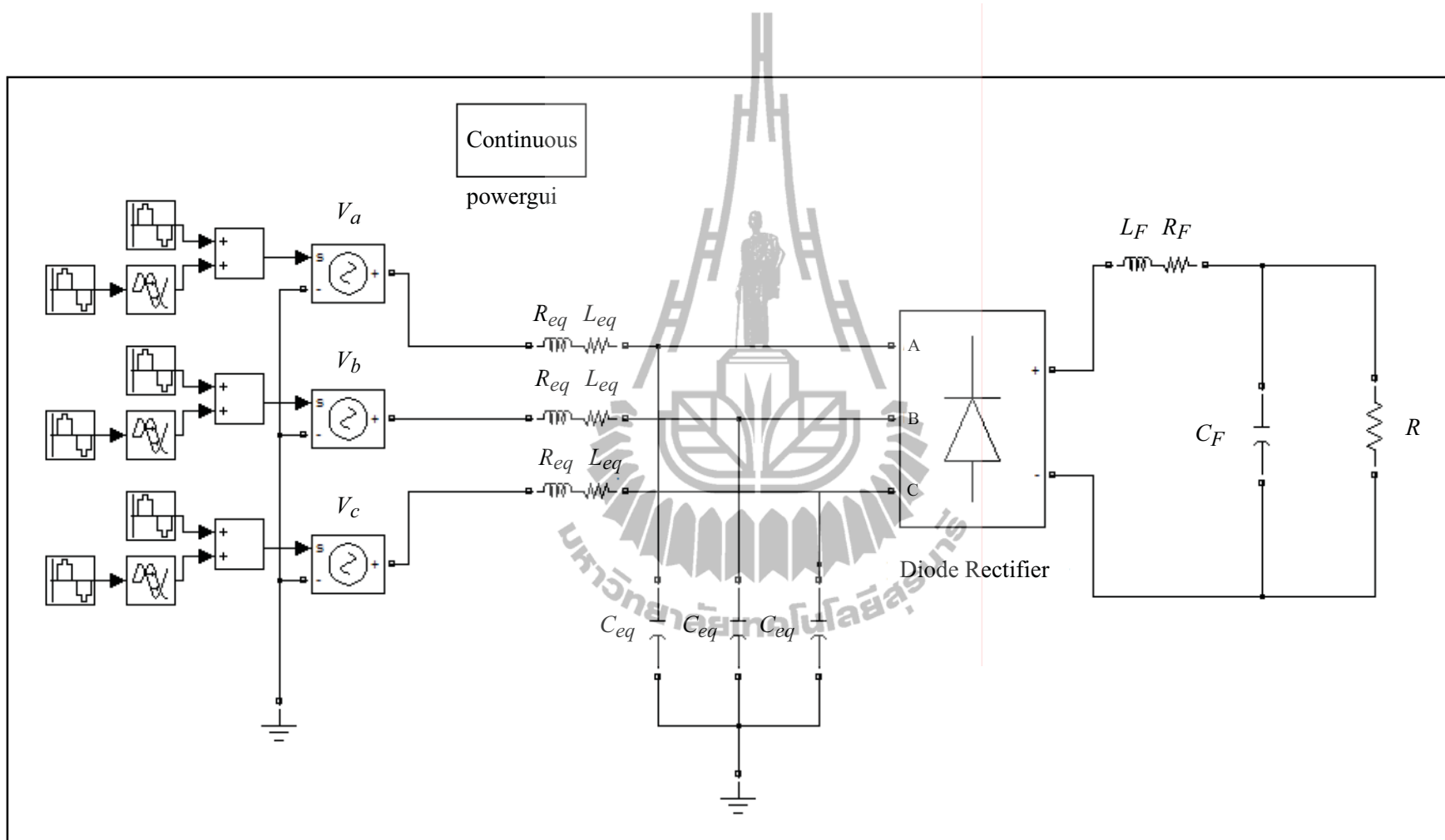
- Emadi, A., Fahimi, B., and Ehsani, M. (1999). On the Concept of Negative Impedance Instability in the More Electric Aircraft Power Systems with Constant Power Loads. **Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, August 1999.**
- Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A. (2006). Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives. **Vehicular Technology.** : 1112-1125.
- Griffo, A., and Jiabin Wang. (2009). Stability assessment of electric power systems for 'more electric' aircraft **13th European Conference on Power Electronics and Applications.** : 1-10.
- Grigore, V., Hatonen, J., Kyyra, J., and Suntio, T. (1998). Dynamics of a buck converter with a constant power load. **Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE.** : 72-78.
- Han, Liqiu, Wang, Jiabin, and Howe, David. (2006). Small-signal Stability Studies of a 270V DC More-Electric Aircraft Power System. **The 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives.** : 162-166.
- Hansen, S., Asiminoaei, L., and Blaabjerg, F. (2003). Simple and advanced methods for calculating six-pulse diode rectifier line-side harmonics. **38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications Conference.** 3 : 2056-2062.
- Hao Wang, Jinjun Liu, and Dan Hou. (2009). Piecewise Broken Line Approximation Method implementation in stability analysis of bidirectional Buck/Boost converters cascaded system. **Power Electronics and Motion Control Conference.** : 1317-1322.
- Jalla, M.M., Emadi, A., Williamson, G.A., and Fahimi, B. (2004). Modeling of multiconverter more electric ship power systems using the generalized state space averaging method. **30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society.** 1 : 508-513.
- Jusoh, A.B. (2004). The instability effect of constant power loads. **Power and Energy Conference, 2004. PECon 2004.** : 175-179.

- Kulworawanichpong, T., Areerak, K-L., Areerak, K-N., and Sujitjorn, S. (2004). Harmonic Identification for Active Power Filters Via Adaptive Tabu Search Method. **Springer-Verlag Heidelberg**. : 687-694.
- Liqiu Han , Jiabin Wang , and Howe, D. (2007). State-space average modelling of 6- and 12-pulse diode rectifiers. **2007 European Conference on Power Electronics and Applications**. : 1-10.
- Middlebrook, R.D. (1976). Input Filter Considerations in Design and Application of Switching Regulator. **IEEE Industry Applications Society Meeting Record**. : 336-382.
- Mohan, N., Underland, T.M., and Robbins., W.P. (2003). **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**. John Wiley & Son, USA, 2003.
- Ong, C-M, (2006). **Dynamic Simulation of Electric Machinery using MATLAB/Simulink**. Prentice Hall, 1998.
- Puangdownreong, D., Areerak, K.-N., Srikaew, A., Sujitjorn, S., and Totarong, P. (2002). System identification via Adaptive Tabu Search. **IEEE International Conference on Industrial Technology**. 2 : 915-920.
- Rahimi, A.M., and Emadi, A. (2009). Active Damping in DC/DC Power Electronic Converters: A Novel Method to Overcome the Problems of Constant Power Loads. **Industrial Electronics**. 56(5): 1428-1439.
- Rim, C.T., Choi, N.S., Cho, G.C., and Cho, G.H. (1994). A complete DC and AC analysis of three-phase controlled-current PWM rectifier using circuit D-Q transformation. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 9(4) : 390-396.
- 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. **Electric Ship Technologies Symposium**. : 313-320.
- Sakui, M., Fujita, H., and Shioya, M. (1989). A method for calculating harmonic currents of a three-phase bridge uncontrolled rectifier with DC filter. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 36(3) : 434-440.

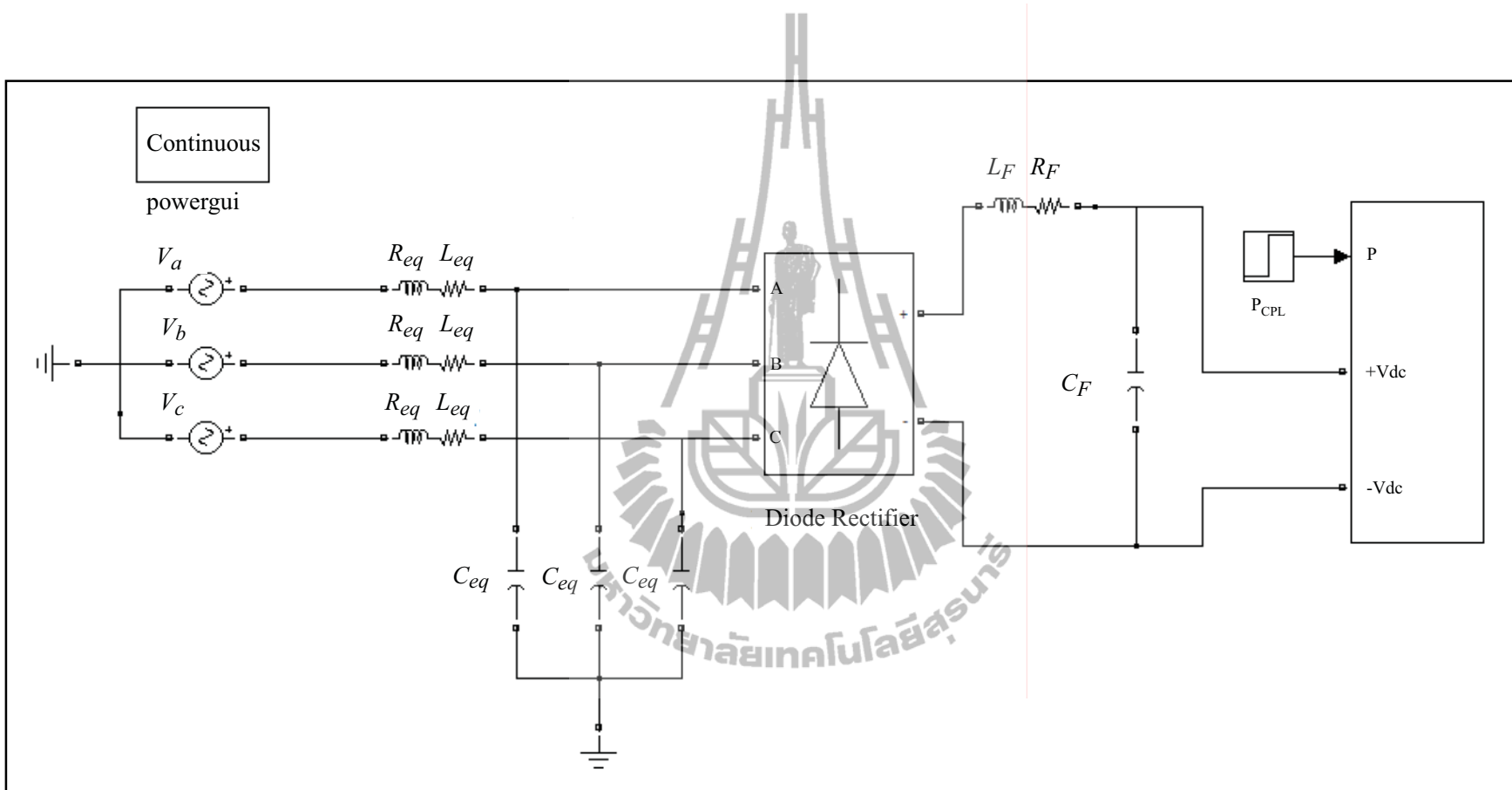
- Soo-Bin Han, Nam-Sup Choi, Chun-Taik Rim, and Gyu-Hyeong Cho. (1998). Modeling and analysis of static and dynamic characteristics for buck-type three-phase PWM rectifier by circuit DQ transformation. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 13(2): 323-336.
- Tsang, K.M., and Chan, W.L. (2005). Cascade controller for DC/DC buck converter. *IEE Proc.-Electr. Power* 152(4) : 827-831.



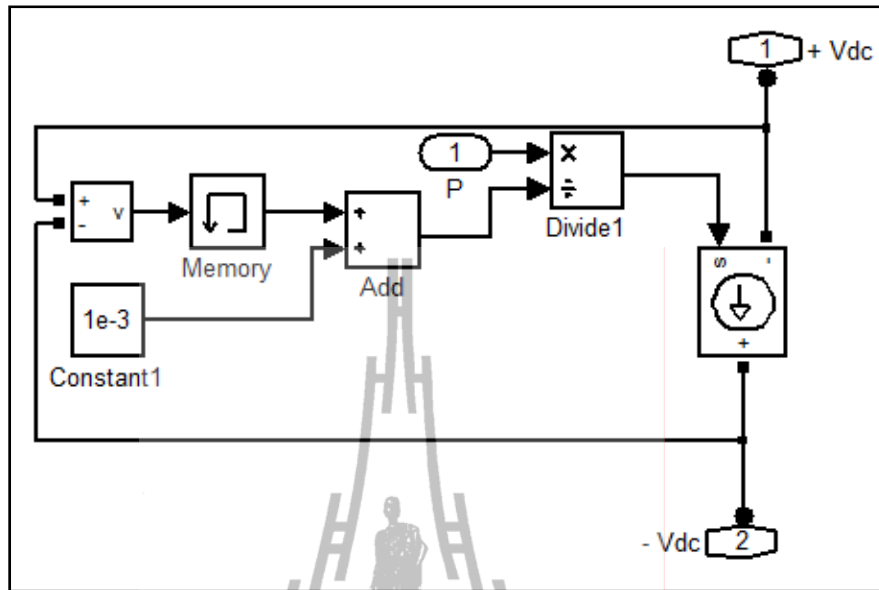




รูปที่ ก.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

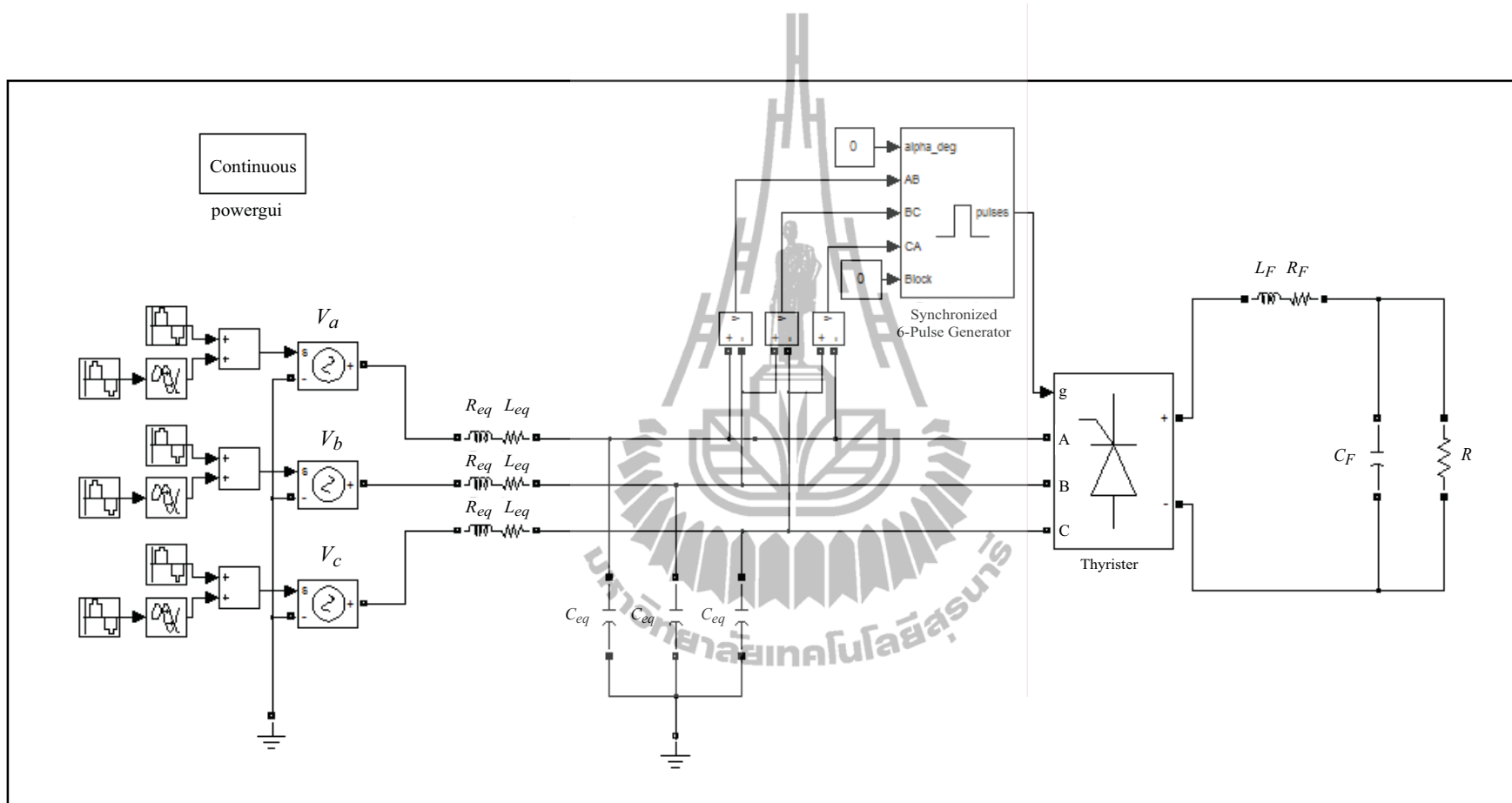


รูปที่ ก.2 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

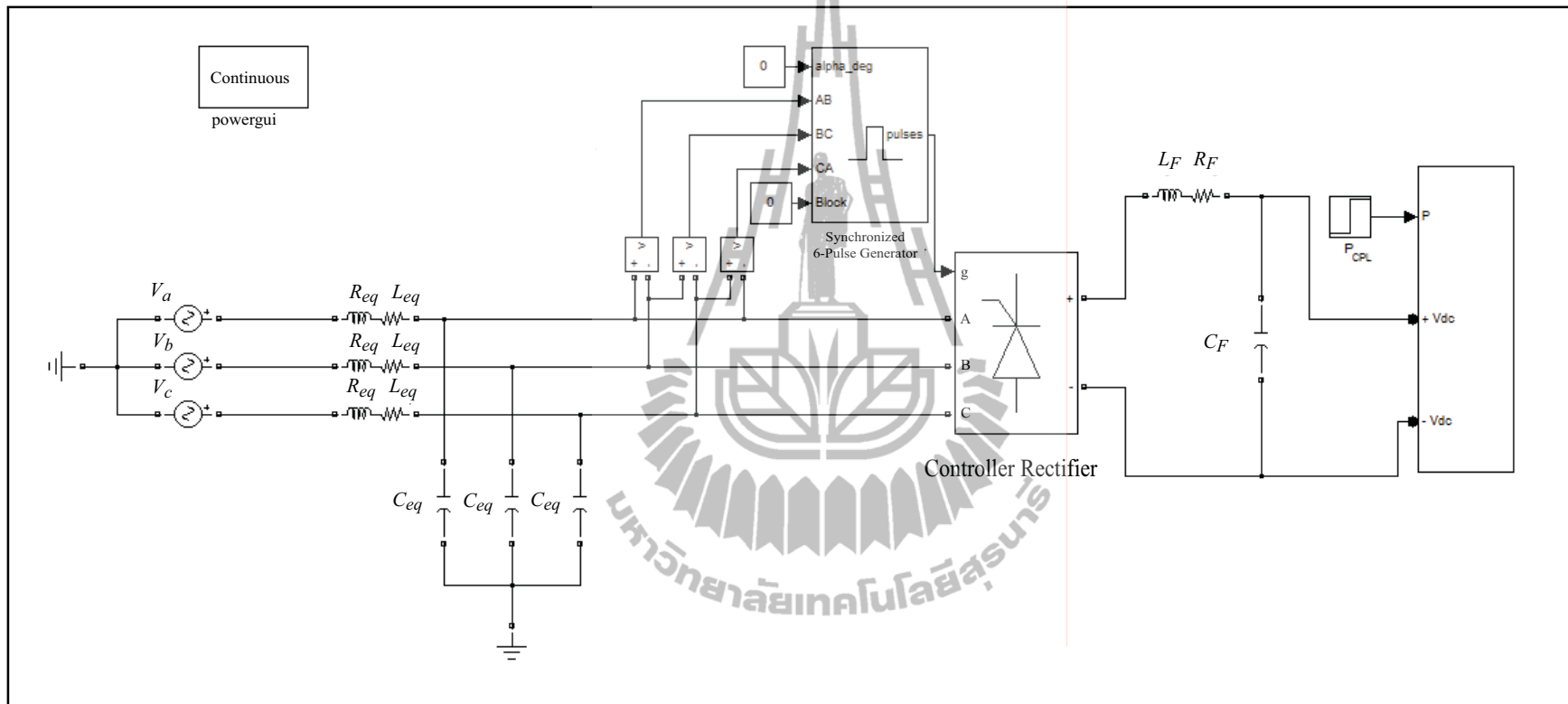


รูปที่ ก.3 โครงสร้างโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอูมคติ

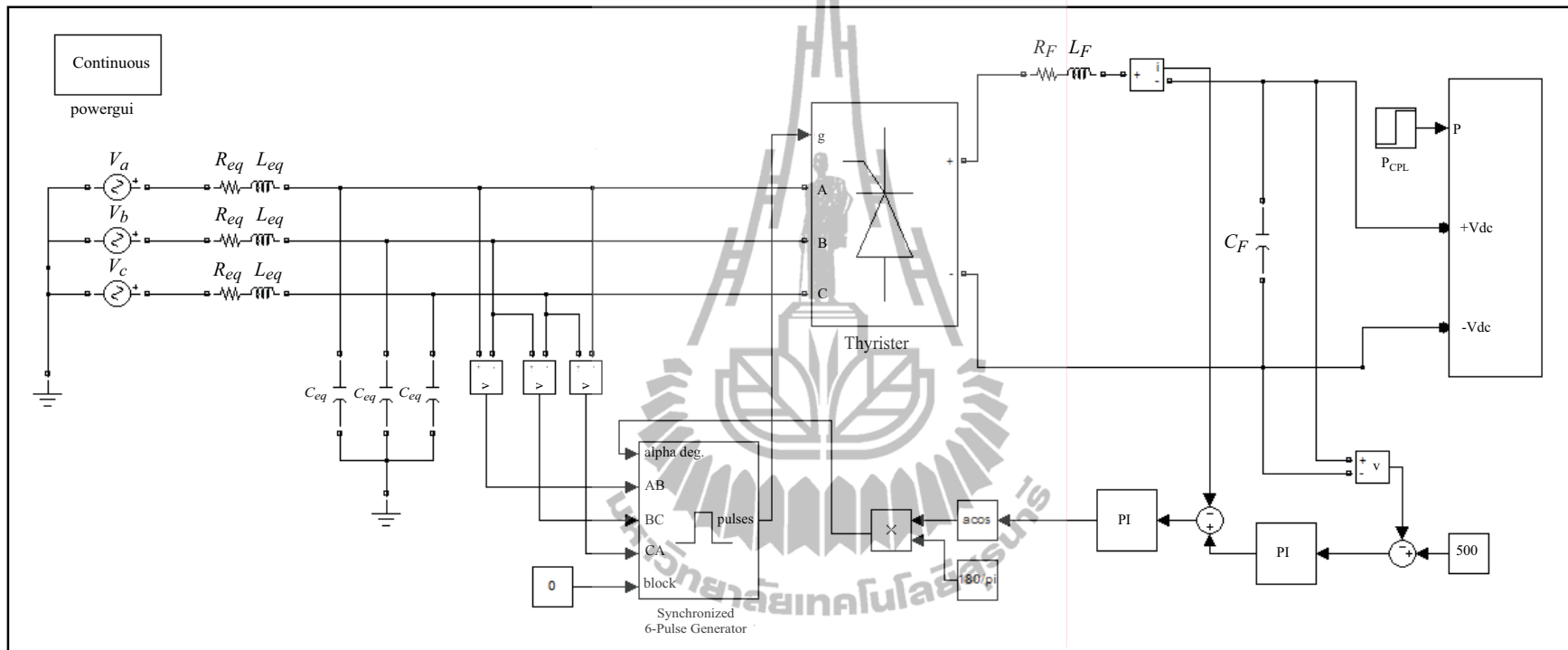




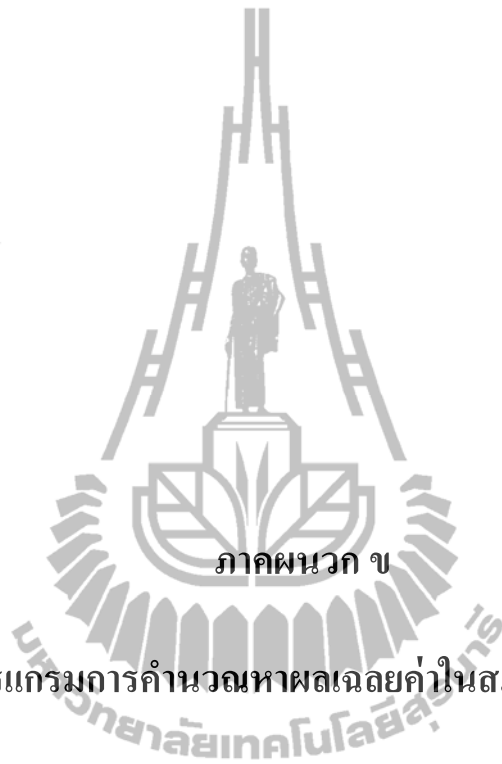
รูปที่ ก.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้กรณีไม่มีตัวควบคุมซึ่งมีโหลดเป็นตัวต้านทาน



รูปที่ ก.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้กรณีไม่มีตัวควบคุมซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว



รูปที่ ก.6 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้



ภาคผนวก ข

โปรแกรมการคำนวณหาผลเฉลยค่าในสภาวะคงตัว

```

*****
โปรแกรมการหาผลเฉลยค่าในสภาวะคงตัว
*****

โปรแกรม วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณีไม่มีตัวควบคุมที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน
Vs=220; % Vs คือ ค่าแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส
(Vrms)
alpha=0; % alpha คือ มุมจุดชนวนของไทรสเตอร์
w=2*pi*50; % w คือ ค่าความถี่ของระบบ (rad/s)
Req=0.15; % Req คือ ค่าความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า
Leq=30*10^(-6); % Leq คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า
Ceq=2*10^(-9); % Ceq คือ ค่าตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า
rf=0.3; % rf คือ ค่าตัวต้านทานในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
ru=3*Leq*w/pi; % ru คือ ค่าความต้านทานมุมเคลื่อน
r=atand(w*Leq/Req); % r คือ ค่ามุมของอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า
z=sqrt(Req^2+(w*Leq)^2); % z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า
R=20; % R คือ ค่าโหลดตัวต้านทาน
eaVbus=100; % eaVbus คือ ค่าความผิดพลาดเริ่มต้นของ Vbus
ealampda=100; % ealampda คือ ค่าความผิดพลาดเริ่มต้นของ lampda
es=1e-10; % es คือ ค่าความผิดพลาดของผลเฉลย
k=0; % เพื่อให้เงื่อนไขกำหนดค่าตอบเริ่มต้น

while eaVbus>=es & ealampda>=es
    if k~=0 % ถ้า k ไม่เท่ากับ 0

        du= Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*cosd(r)/Z-36*R*Vbus(k)/(pi^2*(ru+rf+R)^2)-
            36*rf*Vbus(k)*cosd(alpha)/(pi^2*(ru+rf+R)^2);
        DU=Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z;
        dv= Vs*sind(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*sind(r)/Z-(36*R*Vbus(k)
            *cosd(alpha))/(pi^2*(ru+rf+R)^2)- 36*rf*Vbus(k)
            *cosd(alpha)/(pi^2*(ru+rf+R)^2))*tand(alpha);
    end
end

```

```

DV=-Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z;
U= Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*cosd(r)/Z -
    18*R*Vbus(k)^2*cosd(alpha)^2/(pi^2*(ru+rf+R)^2)-
    18*rf*(Vbus(k)*cosd(alpha)/(pi*(ru+rf+R)))^2;
V= Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*sind(r)/Z-
    (18*R*Vbus(k)^2)*cosd(alpha)/(pi^2*(ru+rf+R)^2)-18*rf*(Vbus(k))
    *cosd(alpha)/(pi*(ru+rf+R))^2*tand(alpha);
    %คำนวณคำตอบของ Vbus และ λ โดย U คือ Vbus
    และ V คือ λ
Vbus(k+1)= Vbus(k)- (U*Dv-V*Du)/(du*Dv-Du*dv);
lampda(k+1)= lampda(k)- (V*du-U*dv)/(du*Dv-Du*dv);
    % คำนวณคำตอบใหม่สำหรับรอบต่อไปด้วย
    คำตอบเก่า
eaVbus=abs((Vbus(k+1)-Vbus(k))/Vbus(k+1))*100 ;
ealampda=abs((lampda(k+1)-lampda(k))/lampda(k+1))*100;
    %ตรวจสอบค่าความผิดพลาดของคำตอบ

V_bus=Vbus(k+1);           % เก็บค่าผลเฉลยของ Vbus
L=lampda(k+1);             % เก็บค่าผลเฉลยของ λ

else                         % ไม่เช่นนั้นแล้ว
    Vbus(k+1)=230;
    lampda(k+1)=0.0001;
end

                                % กำหนดคำตอบเริ่มต้น
k=k+1;
end

Lampda=L                    % ค่าผลเฉลยของ λ

```

โปรแกรมการคำนวณ สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ กรณี ไม่มีตัวควบคุม
ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

```

Vs=230; % Vs คือ ค่าแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส
(Vrms)
alpha=0; % alpha คือ มุมจุดชนวนของ ไทริสเตอร์
w=2*pi*50; % w คือ ค่าความถี่ของระบบ (rad/s)
Req=0.15; % Req คือ ค่าความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า
Leq=30*10^(-6); % Leq คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า
Ceq=2*10^(-9); % Ceq คือ ค่าตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า
rf=0.3; % rf คือ ค่าตัวต้านทานในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
Lf=6.5e-3; % Lf คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
Cf=1000e-6; % Cf คือ ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
ru=3*Leq*w/pi; % ru คือ ค่าความต้านทานมุมเคลื่อน
r=atand(w*Leq/Req); % r คือ ค่ามุมของอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า
z=sqrt(Req^2+(w*Leq)^2); % z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า

for P=0:1:20; %กำหนดการเปลี่ยนแปลงของ โหลดกำลัง ไฟฟ้าคงตัว
จาก 0 kW ถึง 20 kW
eaVbus=100; % eaVbus คือ ค่าความผิดพลาดเริ่มต้นของ Vbus
ealampda=100; % ealampda คือ ค่าความผิดพลาดเริ่มต้นของ lampda
es=5e-10; %ค่าความผิดพลาดของคำตอบ
k=0; % เพื่อให้เงื่อนไขกำหนดคำตอบเริ่มต้น
while eaVbus>=es & ealampda>=es
if k~=0

du= Vs*cosd(r-lampda(k))/z - 2*Vbus(k)*cosd(r)/z;
DU=Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/z;
dv= Vs*sind(r-lampda(k))/z - 2*Vbus(k)*sind(r)/z;
DV=-Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/z;

```

```

U= Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/z - Vbus(k)^2*cosd(r)/z - (P*10^3+Idc(P+1)^2*rf)/3;
V= Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/z - Vbus(k)^2*sind(r)/z-(P*10^3*tand(alpha))/3;
                                %คำนวณคำตอบของ  $V_{bus}$  และ  $\lambda$  โดย U คือ  $V_{bus}$ 
                                และ V คือ  $\lambda$ 

Vbus(k+1)= Vbus(k)- (U*DV-V*DU)/(du*DV-DU*dv);
lampda(k+1)= lampda(k)- (V*du-U*dv)/(du*DV-DU*dv);
                                % คำนวณคำตอบใหม่สำหรับรอบต่อไปด้วย
                                คำตอบเก่า

eaVbus=abs((Vbus(k+1)-Vbus(k))/Vbus(k+1))*100 ;
ealampda=abs((lampda(k+1)-lampda(k))/lampda(k+1))*100;
                                %ตรวจสอบค่าความผิดพลาดของคำตอบ
V_bus(P+1)=Vbus(k+1);          % เก็บค่าผลเฉลยของ  $V_{bus}$  ในรอบการคำนวณที่ P
Lamda(P+1)=lampda(k+1);      % เก็บค่าผลเฉลยของ  $\lambda$  ในรอบการคำนวณที่ P

A=Vs-Vbus(k+1)*(cosd(lampda(k+1))-i*sind(lampda(k+1)));
B=z*(cosd(r)+i*sind(r));

Idc(P+1)=(pi/(sqrt(6)))*abs(A/B);

Vout(P+1)=(3*sqrt(6)*Vbus(k+1)/pi)*cosd(alpha) - 3*Leq*w*Idc(P+1)/pi - rf*Idc(P+1);

else                                % ไม่เช่นนั้นแล้ว
    Vbus(k+1)=230;
    lampda(k+1)=0.0001;
    Idc(P+1)=0;
end
                                % กำหนดคำตอบเริ่มต้น

```

```

    k=k+1;
end

N(P+1)=P;                                % เก็บค่า P ของรอบการคำนวณ
P=P+1
end

subplot(3,1,1)
plot(N,V_bus, '*')
hold on
grid on
title('230 V,400 Hz,Alpha = 0')
ylabel('V_b_u_s(V_r_m_s)')

subplot(3,1,2)
plot(N,Vout, '*')
hold on
grid on
ylabel('V_o_u_t(V)')

subplot(3,1,3)
plot(N,Lamda, '*')
ylabel('lamda(degree)')
xlabel('P_C_P_L(kW)')
hold on
grid on

% แสดงกราฟค่าผลเฉลย

```

โปรแกรมการคำนวณ สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้

```

Vs=230; % Vs คือ ค่าแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส
(Vrms)

w=2*pi*50; % w คือ ค่าความถี่ของระบบ (rad/s)

Req=0.15; % Req คือ ค่าความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า

Leq=30*10^(-6); % Leq คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า

Ceq=2*10^(-9); % Ceq คือ ค่าตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า

rf=0.03; % rf คือ ค่าตัวต้านทานในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

Lf=6.5e-3; % Lf คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

Cf=1000e-6; % Cf คือ ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

ru=3*Leq*w/pi; % ru คือ ค่าความต้านทานมุมเหลี่ยม

r=atand(w*Leq/Req); % r คือ ค่ามุมของอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า

z=sqrt(Req^2+(w*Leq)^2); % z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า

Vref=500; % Vref คือ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

Vo=Vref; % Vo คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

for P=0:1:30; % กำหนดการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
จาก 0 kW ถึง 30 kW

eaV_bus=100; % eaVbus คือ ค่าความผิดพลาดเริ่มต้นของ Vbus

ealamda=100; % ealambda คือ ค่าความผิดพลาดเริ่มต้นของ lambda

es=5e-10; % ค่าความผิดพลาดของคำตอบ

k=0; % เพื่อให้เงื่อนไขกำหนดคำตอบเริ่มต้น

while eaV_bus>=es & ealamda>=es
    if k~=0
        du= Vs*cosd(r-lamda(k))/z - 2*V_bus(k)*cosd(r)/z;
        DU=V_bus(k)*Vs*sind(r-lamda(k))/z;
        s1= Vo*0.4275/V_bus(k);
        s2=secd(acosd(s1))^2;
    end
end

```


$$s3=0.18275*Vo^2/V_bus(k)^2;$$

$$s4=0.4275*Vo/V_bus(k)^2;$$

$$dv= Vs*\text{sind}(r-\text{lamda}(k))/z - 2*V_bus(k)*\text{sind}(r)/z-s2*1/\text{sqrt}(1-s3)*s4;$$

$$DV=-V_bus(k)*Vs*\text{cosd}(r-\text{lamda}(k))/z;$$

$$U= V_bus(k)*Vs*\text{cosd}(r-\text{lamda}(k))/z - V_bus(k)^2*\text{cosd}(r)/z - (P*10^3+\text{Idc}(P+1)^2*rf)/3;$$

$$V= V_bus(k)*Vs*\text{sind}(r-\text{lamda}(k))/z - V_bus(k)^2*\text{sind}(r)/z-$$

$$(P*10^3*\text{tand}(\text{acosd}(0.4275*Vo/V_bus(k))))/3;$$

%คำนวณค่าตอบของ V_{bus} และ λ โดย U คือ V_{bus}
และ V คือ λ

$$V_bus(k+1)= V_bus(k)- (U*DV-V*DU)/(du*DV-DU*dv);$$

$$\text{lamda}(k+1)= \text{lamda}(k)- (V*du-U*dv)/(du*DV-DU*dv);$$

% คำนวณค่าตอบใหม่สำหรับรอบต่อไปด้วย
คำตอบเก่า

$$eaV_bus=\text{abs}((V_bus(k+1)-V_bus(k))/V_bus(k+1))*100 ;$$

$$ealamda=\text{abs}((\text{lamda}(k+1)-\text{lamda}(k))/\text{lamda}(k+1))*100;$$

%ตรวจสอบค่าความผิดพลาดของคำตอบ

$$Vbus(P+1)=V_bus(k+1); \quad \% \text{เก็บค่าผลเฉลยของ } V_{bus}$$

$$\text{Lamda}(P+1)=\text{lamda}(k+1); \quad \% \text{เก็บค่าผลเฉลยของ } \lambda$$

$$\text{Alpha}(P+1)=\text{acosd}(0.4275*Vo/V_bus(k+1));$$

% คำนวณค่าตอบของค่า α ของแต่ละรอบการคำนวณ

$$A=Vs-V_bus(k+1)*(\text{cosd}(\text{lamda}(k+1))-i*\text{sind}(\text{lamda}(k+1)));$$

$$B=z*(\text{cosd}(r)+i*\text{sind}(r));$$

$$\text{Idc}(P+1)=(\text{pi}/(\text{sqrt}(6)))*\text{abs}(A/B);$$

```

else                                     % ไม่เช่นนั้นแล้ว
    V_bus(k+1)=230;
    lamda(k+1)=0.0001;
    Idc(P+1)=0;
end

                                     % กำหนดคำตอบเริ่มต้น
k=k+1;
end
N(P+1)=P;                               % เก็บค่า P ในแต่ละรอบของการคำนวณ
P=P+1
end

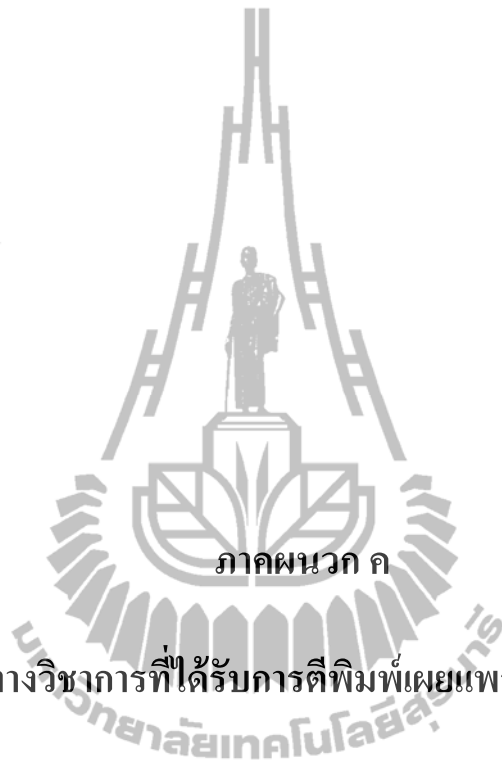
subplot(3,1,1)
plot(N,Vbus,')
hold on
grid on
title('Vout commad = 500 V')
ylabel('V_b_u_s(V_r_m_s)')

subplot(3,1,2)
plot(N,Alpha,')
hold on
grid on
ylabel('Alpha(V)')

subplot(3,1,3)
plot(N,Lamda,')
ylabel('lamda(degree)')
xlabel('P_C_P_L(kW)')
hold on
grid on

                                     % แสดงกราฟค่าผลเฉลยของค่า  $V_{bus}$ ,  $\alpha$  และ  $\lambda$ 

```



บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, กองพัน อารีรักษ์, และ กองพล อารีรักษ์. (2554). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานโดยวิธีดีคิว. วิศวกรรมสาร มข., ปีที่ 38, ฉบับที่ 3, หน้า 325-334. (สงวนลิขสิทธิ์)
- 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. (สงวนลิขสิทธิ์)
- Chaijarunudomrung, K., Areerak, K-N., and Areerak, K-L. (2011). **Modeling and Stability Analysis of AC-DC Power System with Controlled Rectifier and Constant Power Loads.** WSEAS Transactions on Power Systems. : 31-41.
- Chaijarunudomrung Koson , Areerak Kongpan, and Areerak Kongpol. (2011). **The Stability Study of AC-DC Power System with Controlled Rectifier Including Effect of Voltage Control.** European Journal of Scientific Research. : 463-480. (สงวนลิขสิทธิ์)
- Chaijarunudomrung, K., Areerak, K-N., Areerak, K-L., and Srikaew, A. (2011). **The Controller Design of Three-Phase Controlled Rectifier Using an Adaptive Tabu Search Algorithm.** The 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2011). : 605-608. (สงวนลิขสิทธิ์)
- Chaijarunudomrung, K., Areerak, K-N., and Areerak, K-L. (2011). **The Controller Design of Three-Phase Controlled Rectifier using a Particle Swarm Optimization.** European Journal of Scientific Research. : 561-570. (สงวนลิขสิทธิ์)
- Chaijarunudomrung Koson , Areerak Kongpan, and Areerak Kongpol. (2011). **The Controller Design of Three-Phase Controlled Rectifier Using an Artificial Intelligence Technique.** European Journal of Scientific Research. : 410-425. (สงวนลิขสิทธิ์)

Modeling and Stability Analysis of AC-DC Power System with Controlled Rectifier and Constant Power Loads

K. CHAIJARURNUDOMRUNG, K.-N. AREERAK*, and K.-L. AREERAK

School of Electrical Engineering
Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, 30000
THAILAND

*corresponding author: kongpan@sut.ac.th

Abstract: -Power converters with their controls normally behave as a constant power load. This load can significantly degrade the system stability. Therefore, the system dynamic model is very importance because it can be used for stability analysis. It is well known that power converter models are time-varying because of their switching behaviours. This paper presents the DQ modeling method to eliminate the switching action to achieve time-invariant model for the stability analysis. The power system studied is the AC distribution system. The small-signal model of the power system is obtained by using a linearization technique. The small-signal simulations are used to validate the DQ linearized model. The reported model is then used for the stability analysis via the classical control theory. The results show that an excellent agreement between the mathematical model and the three-phase benchmark model is achieved.

Key- Words: - Constant power loads, DQ method, simulation, modeling, controlled rectifier, stability analysis

1 Introduction

Electrical loads based on power electronic converters are widely used in many applications. Unfortunately, power electronic driven loads often behave as a constant power load (CPL). The CPL can significantly degrade the system stability [1]-[4]. Therefore, the dynamic model of the power system with CPLs is very importance.

It is well known that the power converter model is time-varying because of the switching behaviour. Several approaches are commonly used for eliminating the switching actions to achieve time-invariant model. Then, the classical linear control theory can be easily applied to the model for a system analysis and design. The first method is the generalized state-space averaging (SSA) modeling method. This method has been used to analyze many power converters in DC distribution systems [5]-[7], as well as uncontrolled and controlled rectifiers in single-phase AC distribution systems [8],[9] and 6- and 12- pulse diode rectifiers in three phase systems [10]. The second is an average-value modeling method, which has been used for 6- and 12- pulse diode rectifiers in many publications [11]-[13], as well as generators with line-commutated rectifiers [14]-[18]. These rectifiers can be modeled with good accuracy as a constant DC voltage source. However, this method is not easily applicable to the analysis of the stability of the

general AC power system with multi-converter power electronic systems.

Another technique widely used for AC system analysis is that of DQ-transformation theory [19]-[21], in which power converters can be treated as transformers. The DQ modeling method can also be easily applied for modeling a power system comprising vector-controlled converters where the SSA model and the average-value model are not easily applicable. Moreover, the resulting converter models can be easily combined with models of other power elements expressed in terms of synchronously rotating frames such as generators, front-end converters, and vector-controlled drives. The DQ models of three-phase AC-DC power systems have been reported in the previous works [19]-[21]. But these do not include a constant power load (CPL). Applying the DQ modeling approach for stability studies of the power system including a CPL has been addressed in [22]-[24]. The DQ method for modeling the three-phase uncontrolled and controlled rectifier has been reported in [22] and [25], respectively. This paper extends the work in [25] with the eigenvalue theorem to analyze the stability of the system due to a CPL. The stability results from the theory will be supported by using the intensive time domain simulation. The paper is structured as follows. In Section 2, the power system definition and assumptions are explained

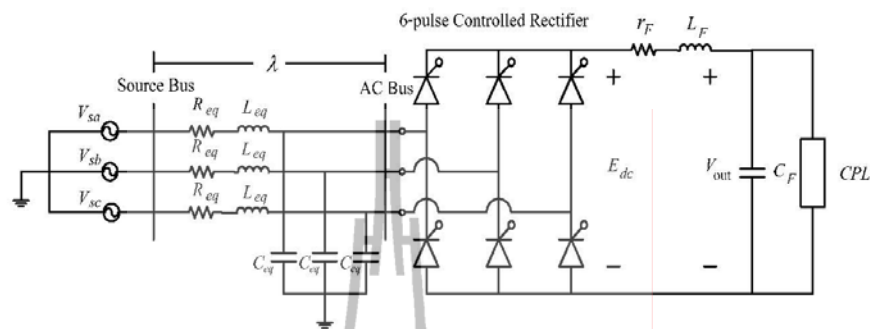


Fig.1 The power system studied

The DQ dynamic model of the system from [25] is explained again in Section 3. The steady-state value calculation for the small-signal model derived from the proposed method is presented in Section 4. In Section 5, the model validation using a small-signal simulation and stability analysis for each firing angle of controlled rectifier are shown. Finally, Section 6 concludes and discusses the advantages of the DQ method to model the power converter for stability analysis.

The effect of L_{eq} on the AC side causes an overlap angle μ in the output waveforms that causes as a commutation voltage drop. This drop can be represented as a variable resistance r_μ that is located on the DC side [22],[26] as shown in Fig.2. The r_μ can be calculated by:

$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (2)$$

where ω is the source frequency.

2 Power System Definition and Assumptions

The power system studied in this paper is depicted in Fig. 1. It consists of a three-phase voltage source, transmission line, 6-pulse controlled rectifier, DC-link filters, and an ideal CPL connected to the DC bus. The ideal CPL is used to represent actuator drive systems by assuming an infinitely fast controller action of the drive system. Hence, the ideal CPL can be considered as a voltage-dependent current source given by:

$$I_{CPL} = \frac{P_{CPL}}{V_{out}} \quad (1)$$

where V_{out} is the voltage across the CPL and P_{CPL} is the power level of CPL.

It is assumed that the three-phase voltage source is balanced. The equivalent parameters of a transmission line are represented by R_{eq} , L_{eq} , and C_{eq} . The DC-link filters are shown by elements r_F , L_F , and C_F . E_{dc} and V_{out} are the output terminal voltage of a controlled rectifier and the voltage across the DC-link capacitor C_F , respectively. A phase shift between the source bus and the AC bus is λ as shown in Fig.1.

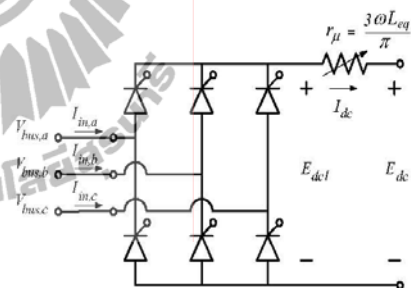


Fig.2 Three-phase controlled rectifier with overlap angle resistance

It can be seen from Fig.2 that E_{dc1} represents the output voltage from the switching signal without an overlap angle effect, while E_{dc} represents the voltage at the rectifier output terminal taking into account the voltage drop effect.

Since the commutation effect has been moved on to the DC side, the switching signals for 3-phase controlled rectifier can be applied without considering the effect of overlap angle. This is shown in Fig. 3 in which α is the firing angle of thyristors. The switching function of S_a in Fig.3 can be expressed by a Fourier series.

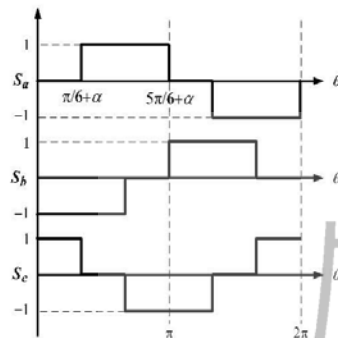


Fig.3 The controller rectifier switching signal

In this paper, neglecting the harmonics of the power system, the switching functions can be written for three phases as:

$$S_{abc} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \sin(\alpha\tau + \phi - \alpha) \\ \sin(\alpha\tau - \frac{2\pi}{3} + \phi - \alpha) \\ \sin(\alpha\tau + \frac{2\pi}{3} + \phi - \alpha) \end{bmatrix} \quad (3)$$

where ϕ is a phase angle of the AC bus voltage and α is the firing angle.

The relationship between input and output terminal of controlled rectifier is given by:

$$I_{in,abc} = S_{abc} I_{dc} \quad (4)$$

$$E_{dcl} = S_{abc}^T V_{bus,abc} \quad (5)$$

It can be seen from (4) that the fundamental input current is in phase with the switching signals. In addition, for a controlled rectifier, the fundamental input current lags the fundamental input voltage by α [26].

Equations (3)-(5) will be used to derive the model of controlled rectifier by using DQ modeling method in Section 3. The model assumptions in this paper are as follows:

- The rectifier is operated under a continuous conduction mode (CCM).
- The output DC current of the rectifier is constant.
- The amplitude of the three-phase source is constant and balanced.
- Only one commutation occurs at a time.
- All harmonics in the system are neglected.

3. DQ Dynamic Model of the System

In this section, the DQ modeling method is applied to derive a mathematical model of the system as depicted in Fig.1.

Firstly, the controlled rectifier is transformed into a two axis frame (DQ frame) rotating at the system frequency ω by means of:

$$T[\theta] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

where $\theta = \omega t - \frac{\pi}{2} + \phi_1$.

Combining equations (4)-(6) results in:

$$I_{in,dq} = S_{dq} I_{dc} \quad (7)$$

$$E_{dcl} = S_{dq}^T V_{bus,dq} \quad (8)$$

Secondly, the switching functions in (3) can be transformed into a DQ frame by means of (6) to give:

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi_1 - \phi + \alpha) \\ -\sin(\phi_1 - \phi + \alpha) \end{bmatrix} \quad (9)$$

The vector diagram for the DQ transformation is as shown in Fig. 4 where V_s is the peak amplitude phase voltage, I_{in} is the peak amplitude current, V_{bus} is the peak amplitude AC bus voltage, and S is peak amplitude of the switching signal, here equal to $2\sqrt{3}/\pi$ as shown in (3).

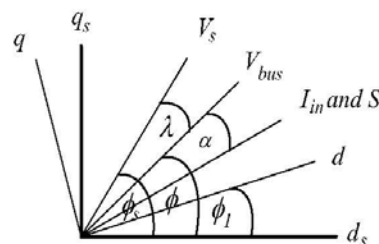
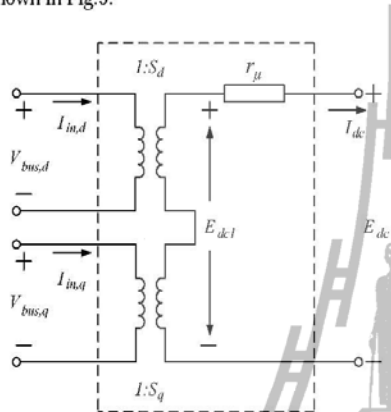


Fig.4 The vector diagram for DQ transformation

From (7)-(9), the controlled rectifier can be easily represented as a transformer having d and q-axis transformer ratio S_d, S_q that depend on the

phase of the DQ frame (ϕ), the phase of V_{bus} (ϕ), and the firing angle of thyristors (α). As a result, the equivalent circuit of the controlled rectifier in the DQ frame derived by using DQ modeling method is shown in Fig.5.



$$\begin{aligned}
 I_{ds} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq} V_{bus,d}} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
 I_{qs} &= -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
 V_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 V_{bus,q} &= -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\
 I_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_F} V_{bus,d} - \left(\frac{r_F}{L_F} + \frac{r_\mu}{L_F} \right) I_{dc} - \frac{1}{L_F} V_{out} \\
 V_{out} &= \frac{1}{C_F} I_{dc} - \frac{1}{C_F} \frac{P_{CPL}}{V_{out}}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Fig.5 The controlled rectifier equivalent circuit in the DQ frame

Finally, using (6), the cable section can be transformed into DQ frame [27]. The DQ representation of the cable is then combined with the controlled rectifier as shown in Fig.5. As a result, the equivalent circuit of the power system in Fig.1 can be represented in the DQ frame as depicted in Fig.6.

The equivalent circuit in Fig.6 can be simplified by fixing the rotating frame on the phase of the switching function ($\phi_i = \phi - \alpha$). This results in the circuit as shown in Fig.7.

Applying the Kirchhoff's voltage law (KVL) and the Kirchhoff's current law (KCL) to the circuit in Fig.7 obtains the set of nonlinear differential equations. We define:

State variables:

$$\mathbf{x} = [I_{ds} \ I_{qs} \ V_{bus,d} \ V_{bus,q} \ I_{dc} \ V_{out}]^T$$

Input:

$$\mathbf{u} = [V_m \ P_{CPL}]^T$$

Output:

$$\mathbf{y} = [V_{out}]$$

The set of nonlinear differential equations is given as follows:

The equation (10) is a nonlinear equation. It is well known that the linearized model can be used for a controller system design via a linear control theory. In addition, the linearized model can be also used to analyze the small-signal stability of the power system including a CPL [22]-[24]. Therefore, (10) is linearized using the first order terms of the Taylor expansion so as to achieve a set of linear differential equations around an equilibrium point. The DQ linearized model of (10) is then of the following form:

$$\delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{u} \tag{11}$$

$$\delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) \delta \mathbf{u}$$

where

$$\delta \mathbf{x} = [\delta I_{ds} \ \delta I_{qs} \ \delta V_{bus,d} \ \delta V_{bus,q} \ \delta I_{dc} \ \delta V_{out}]^T$$

$$\delta \mathbf{u} = [\delta V_m \ \delta P_{CPL}]^T$$

$$\delta \mathbf{y} = [\delta V_{out}]$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\cos(\lambda_o + \alpha)}{L_{eq}} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sin(\lambda_o + \alpha)}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_F V_{out,o} V_{bus,2}} \end{bmatrix}$$

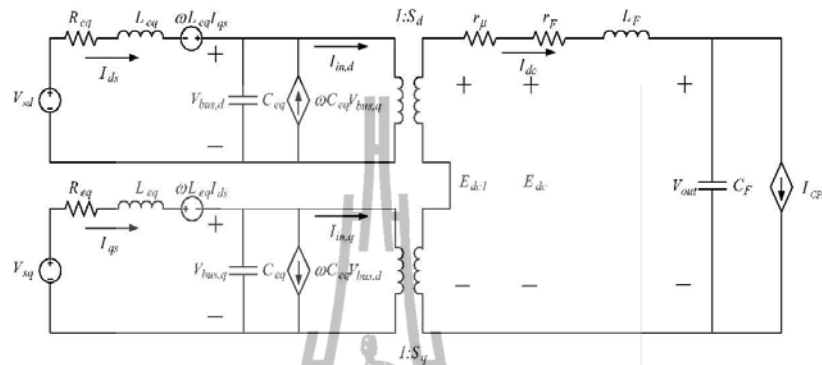


Fig.6 The equivalent circuit of the system in Fig.1 on DQ frame

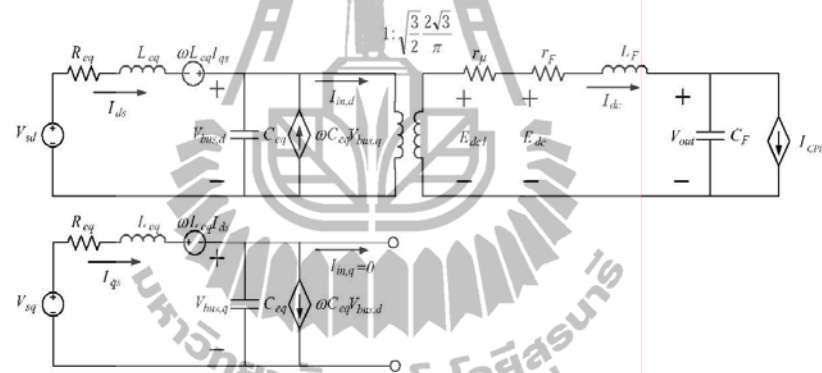


Fig.7 The simplified equivalent circuit of the power system

$$A(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{eq}} & 0 & -\left(\frac{r_F}{L_F} + \frac{r_F}{L_F}\right) & -\frac{1}{L_F} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_F} & \frac{P_{CPF}}{C_F V_{out,0}^2} \end{bmatrix}$$

$$C(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]_{1 \times 6}$$

$$D(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = [0 \ 0]_{1 \times 2}$$

4. Calculation the Steady-State Value

The DQ linearized model in (11) needs to define $V_{out,0}$ and λ_0 . The power flow equation can be applied to determine the steady state value at the AC side of the power system in Fig.1. This leads to a system of nonlinear equations:

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = P_{bus} \quad (12)$$

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus}$$

where the following steady-state values are: $V_{bus,0}$ - voltage at AC bus (rms), λ_0 - phase shift between V_s and V_{bus} as mentioned above. Note that $Z \angle \gamma$ is the transmission line impedance, while the active and

reactive power (per phase) at the AC bus is given by:

$$\begin{aligned} P_{bus} &= V_{bus} I_{bus} \cos \alpha = (P_{CPL} / 3) \\ Q_{bus} &= V_{bus} I_{bus} \sin \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

It can be seen from (13) that the P_{bus} and Q_{bus} depend on the firing angle of thyristors (α). Equation (12) can be solved by using a numerical method such as Newton Raphson to achieve $V_{bus,o}$ and λ_o at the steady-state conditions. Consequently, $V_{out,o}$ for DQ linearized model in (11) can then be calculated by:

$$V_{out,o} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{2} V_{bus,o} \cos(\alpha) - \frac{3I_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,o} - r_F I_{dc,o} \quad (14)$$

where

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

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

5. Small-signal Simulation and Stability Analysis

The DQ linearized model in (11) is simulated for small-signal transients against a corresponding three-phase benchmark circuit model in SimPowerSystems™ of SIMULINK. The set of parameters for the example system according to Fig.1 is given as follows: $V_s=230$ V_{rms/phase}, $f=50$ Hz, $R_{eq}=0.15\Omega$, $L_{eq}=30\mu$ H, $C_{eq}=2$ nF, $C_F=1000\mu$ F, $r_F=0.3\Omega$, and $L_F=6.5$ mH. Fig.8 shows the V_{out} response of the system in Fig.1 to a step change of P_{CPL} from 7 to 9kW that occurs at $t = 0.4$ s. ($\alpha = 0$ degrees). Similarly, Fig.9-Fig.13 are the responses to a step change of P_{CPL} from 7 to 9kW for α equal to 10, 20, 30, 40, and 50 degrees, respectively. Note that the firing angle cannot be allowed to exceed 60 degrees to obtain the positive output voltage of the rectifier on the DC side [26].

From the results in Fig.8-Fig.13, an excellent agreement between both models is achieved under small-signal simulation. It confirms that the mathematical model of the power system with a controlled rectifier derived from the DQ method

provide a high accuracy. Therefore, this model can then be used for stability analysis.

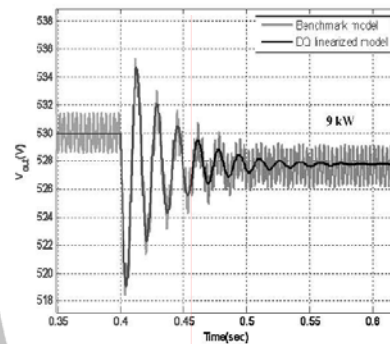


Fig.8 Model verification for changing P_{CPL} from 7 to 9kW ($\alpha = 0$ degree)

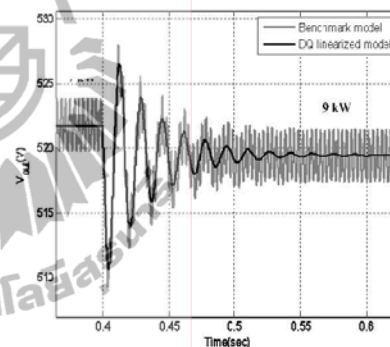


Fig.9 Model verification for changing P_{CPL} from 7 to 9kW ($\alpha = 10$ degrees)

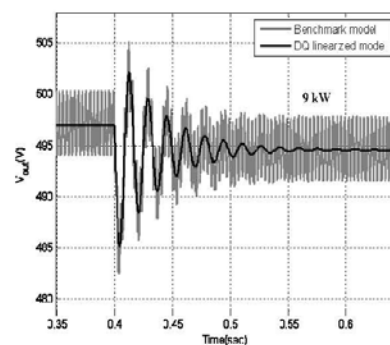


Fig.10 Model verification for changing P_{CPL} from 7 to 9kW ($\alpha = 20$ degrees)

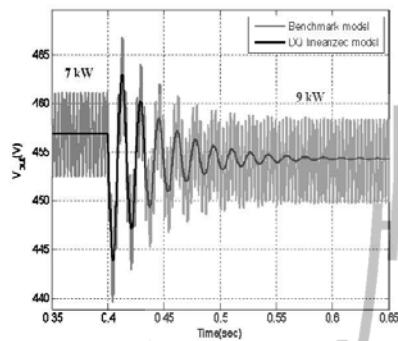


Fig.11 Model verification for changing P_{CPL} from 7 to 9kW ($\alpha = 30$ degrees)

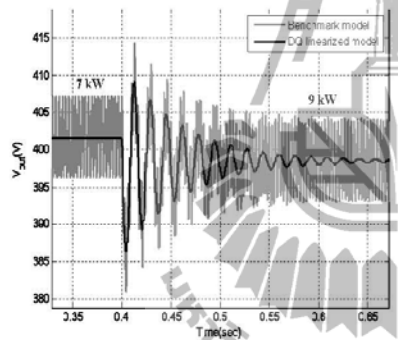


Fig.12 Model verification for changing P_{CPL} from 7 to 9kW ($\alpha = 40$ degrees)

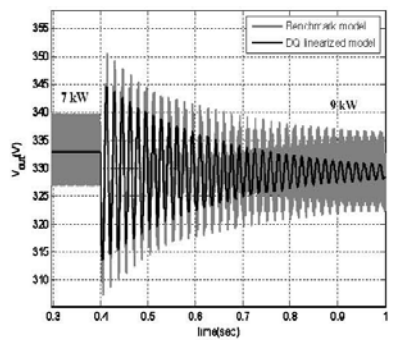


Fig.13 Model verification for changing P_{CPL} from 7 to 9kW ($\alpha = 50$ degrees)

In addition, it can be seen from Fig.8-Fig.13 that the harmonic components due to the switching actions are included in the responses that are

simulated by using the three-phase benchmark model, while the responses from the DQ linearized model provide only the fundamental component. However, it will be shown in the stability results that the mathematical model derived by considering only the fundamental component can correctly predict the unstable point of the system.

For stability analysis, the DQ linearized model in (11) is used with the eigenvalue theorem. The eigenvalue can be calculated from the Jacobian matrix $A(x_0, u_0)$ in (11) by:

$$\det[\lambda I - A] = 0 \quad (15)$$

and the system is stable if

$$\text{Re}\{\lambda_i\} < 0 \quad (16)$$

where $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (n = the number of state variables).

To investigate the instability condition of the power system in Fig.1 due to a CPL, the eigenvalues of the system with the given parameters are calculated from the Jacobian matrix when the P_{CPL} varies from 0 kW to 50 kW. The dominant root locus for α equal to 10 degrees is shown in Fig.14. According to (16), it can be seen that the system becomes unstable when the P_{CPL} exceeds ~22 kW. Note that the results depend on the system parameters, such as system frequency, DC-link filters etc. If the parameters are changed, the stability results will be changed. Fig.15 shows the time-domain simulations that support the theoretical results with instability occurring at P_{CPL} equal to 24 kW. This is greater than 22 kW for the unstable condition predicted from the theory.

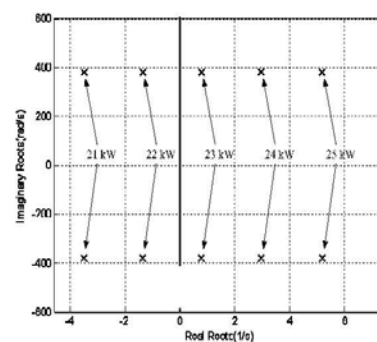


Fig.14 Eigenvalue plot of the system ($\alpha=10$ degrees)

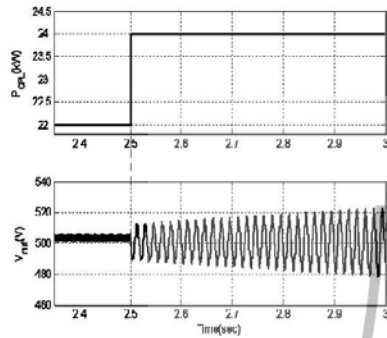


Fig.15 The simulation validation of Fig.14

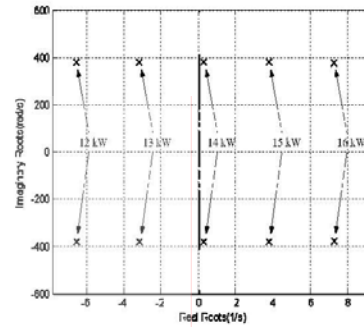


Fig.18 Eigenvalue plot of the system ($\alpha=40$ degrees)

Similarly, Fig.16-Fig.19 show the eigenvalue plot for α equal to 20, 30, 40, and 50 degrees, respectively. Fig.20-Fig.23 show the time-domain simulations that confirm the theoretical results of Fig.16-Fig.19, respectively. It can be seen that the mathematical model derived from the DQ method can be used to predict the unstable condition of the power system.

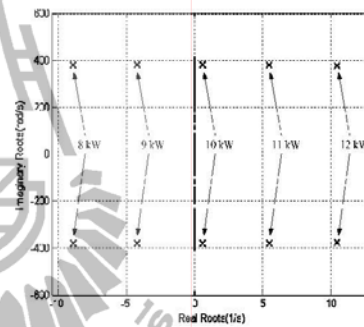


Fig.19 Eigenvalue plot of the system ($\alpha=50$ degrees)

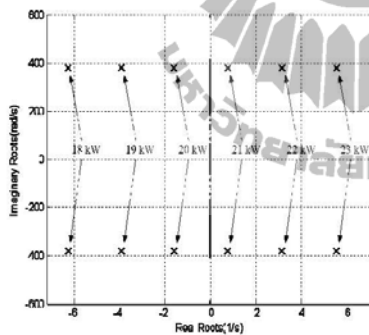


Fig.16 Eigenvalue plot of the system ($\alpha=20$ degrees)

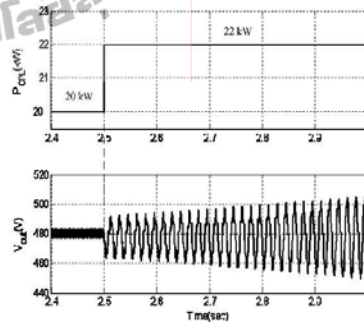


Fig.20 The simulation validation of Fig.16

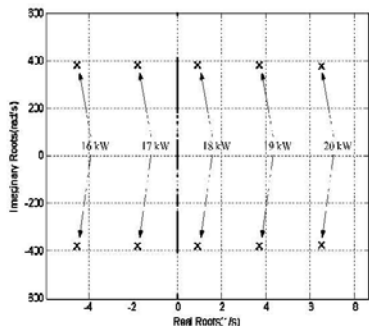


Fig.17 Eigenvalue plot of the system ($\alpha=30$ degrees)

In the future, the dynamic model will be used to predict the instability point for variations in system parameters such as system frequency, DC-link parameters etc. Moreover, the dynamic CPL explained in [24] can be also used with the DQ model of three-phase controlled rectifier from this paper instead of the ideal CPL. This is to investigate the effect of the dynamic CPL to the stability margin.

Recently, the artificial intelligence (AI) techniques are widely used in the power system application [28], [29]. Therefore, the mathematical model derived by using the DQ method from this paper can be also used as the objective function of the AI algorithm for the system design.

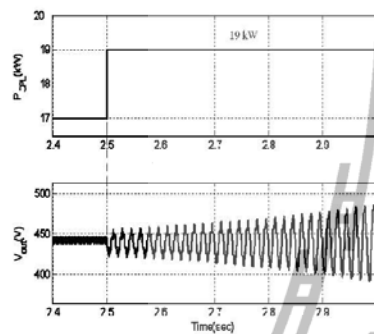


Fig.21 The simulation validation of Fig.17

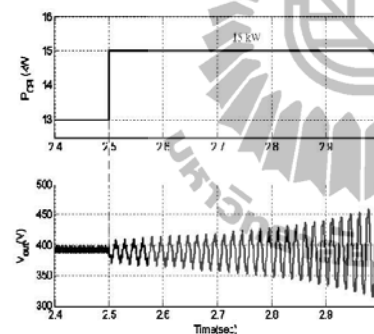


Fig.22 The simulation validation of Fig.18

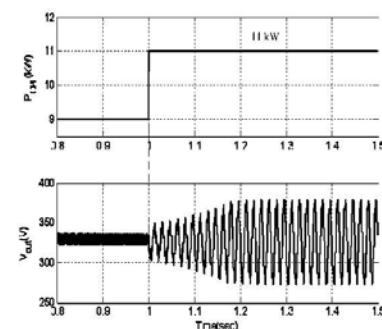


Fig.23 The simulation validation of Fig.19

6. Conclusion

In this paper, the DQ modeling method is presented for modeling a three-phase AC distribution system with a three-phase controlled rectifier, DC-link filters, and an ideal CPL connected to the DC bus. The proposed approach is very useful for modeling the AC distribution system and also concerning a phase shift between source bus and AC bus. Moreover, the resulting converter models can be easily combined with models of other power elements expressed in terms of synchronously rotating frames such as generators, front-end converters, and vector-controlled drives. This paper also presents the DQ linearized model that is used to analyze the system stability due to the CPL. The three-phase benchmark model is used to verify the stability results in the paper. The results show that the mathematical model derived from the DQ method can predict the instability point with a high accuracy. Therefore, electrical engineers can use the mathematical model to study the power system behaviour and to avoid the unstable condition. In the future, the dynamic model will be used to predict the instability point for variations in system parameters. Moreover, the mathematical model from this paper can be also used for the AI application to the power system design to achieve the best performance.

References:

- [1] R.D. Middlebrook, Input Filter Consideration in Design and Application of Switching Regulators, *IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, Chicago, Illinois, October 1976, pp. 366-382.
- [2] A. Emadi, B. Fahimi, and M. Ehsani, On the Concept of Negative Impedance Instability in the More Electric Aircraft Power Systems with Constant Power Loads, *Soc. Automotive Eng. Journal*, 1999, pp.689-699.
- [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, *IEEE Electric Ship Tech. Symposium.*, Philadelphia, PA USA, July 2005, pp.313-320.
- [4] 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. on Vehicular Tech.*, Vol. 55, No. 4, July 2006, pp.1112-1125.

- [5] 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, August 1997, pp.767-770.
- [6] A. Emadi, Modeling and Analysis of Multiconverter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method, *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, Vol. 51, No. 3, June 2004, pp. 661-668.
- [7] A. Emadi, M. Ehsani, and J.M. Miller, *Vehicular Electric Power Systems: Land, Sea, Air, and Space Vehicles*, Marcel Dekker, Inc, 2004.
- [8] 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, October 2004, pp. 992-1000.
- [9] K-H. Chao, Dynamic Modeling and Robust Control of Multi-Module Parallel Soft-Switching-Mode Rectifiers, *WSEAS Transactions on Systems*, Vol.8, Issue 5, 2009, pp.659-672.
- [10] L. Han, J. Wang, and D. Howe, State-space average modelling of 6- and 12-pulse diode rectifiers, *The 12th European Conf. on Power Elect. and Appl.*, Aalborg, Denmark, Sep. 2007.
- [11] S.F. Glover, Modeling and stability analysis of power electronics based systems, *Ph.D. dissertation*, Purdue University, May 2003.
- [12] A. Baghranian, and A.J. Forsyth, Averaged-Value Models of Twelve-Pulse Rectifiers for Aerospace Applications, *Power Electronics, Machines, and Drives (PEMD 2004)*, University of Edinburgh, UK, March-April 2004, pp.220-225.
- [13] A. Uan-Zo-li, R.P. Burgos, F. Lacaux, F. Wang, and D. Boroyevich, Assessment of Multi-Pulse Converter Average Models for Stability Studies Using a Quasi-Stationary Small-Signal Technique, *Power Electronics and Motion Control Conference 2004*, 2004, pp.1654-1658.
- [14] S.D. Sudhoff, and O. Wasynczuk, Analysis and Average-Value Modeling of Line-Commutated Converter-Synchronous Machine Systems, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 1, March 1993, pp. 92-99.
- [15] S.D. Sudhoff, Waveform Reconstruction from the Average-Value Model of Line-Commutated Converter-Synchronous Machine Systems, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 3, September 1993, pp. 404-410.
- [16] S.D. Sudhoff, Analysis and Average-Value Modeling of Dual Line-Commutated Converter-6-Phase Synchronous Machine Systems, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.8, No. 3, September 1993, pp. 411-417.
- [17] S.D. Sudhoff, K.A. Corzine, H.J. Hegner, and D.E. Delisle, Transient and Dynamic Average-Value Modeling of Synchronous Machine Fed Load-Commutated Converters, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, September 1996, pp.508-514.
- [18] I. Jadric, D. Borojevic, and M. Jadric, "Modeling and Control of a Synchronous Generator with an Active DC Load, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 15, No. 2, March 2000, pp.303-311.
- [19] C.T. Rim, D.Y. Hu, and G.H. Cho, Transformers as Equivalent Circuits for Switches: General Proofs and D-Q Transformation-Based Analyses, *IEEE Trans. on Indus. Appl.*, Vol. 26, No. 4, July/August 1990, pp. 777-785.
- [20] C.T. Rim, N.S. Choi, G.C. Cho, and G.H. Cho, A Complete DC and AC Analysis of Three-Phase Controlled-Current PWM Rectifier Using Circuit-D-Q Transformation, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 9, No. 4, July 1994, pp. 390-396.
- [21] S.B. Han, N.S. Choi, C.T. Rim, and G.H. Cho, Modeling and Analysis of Static and Dynamic Characteristics for Buck-Type Three-Phase PWM Rectifier by Circuit DQ Transformation, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 13, No. 2, March 1998, pp.323-336.
- [22] 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, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*, Cambridge, UK, 29 June-2 July 2008, pp. 19-24.
- [23] K.-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, DQ-Transformation Approach for Modelling and Stability Analysis of AC-DC Power System with Controlled PWM Rectifier and Constant Power Loads, *13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008)*, Poznan, Poland, 1-3 September 2008.
- [24] K.-N. Areerak, S. Bozhko, G. Asher, L.de Lillo, A. Watson, T. Wu, and D.W.P. Thomas, The Stability Analysis of AC-DC Systems including Actuator Dynamics for Aircraft Power Systems, *13th European Conference on*

- Power Electronics and Applications (EPE 2009)*, Barcelona, Spain, 8-10 September 2009.
- [25] K. Chaijarumudomrung, K.-N. Areerak, and K.-L. Areerak, Modeling of Three-phase Controlled Rectifier using a DQ method, *2010 International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE 2010)*, Beijing, China: June 19-20, 2010, pp.56-59.
- [26] N. Mohan, T.M. Underland, and W.P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, John Wiley & Son, USA, 2003.
- [27] C-M Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery using MATLAB/Simulink*, Prentice Hall, 1998.
- [28] K.-L. Areerak, and T. Narongrit, Shunt Active Power Filter Design using Genetic Algorithm Method, *WSEA Transactions on Systems*, Vol.9, Issue 4, 2010, pp.327-336.
- [29] L.-Y. Chang, and H.-C. Chen, Tuning of Fractional PID Controllers using Adaptive Genetic Algorithm for Active Magnetic Bearing System, *WSEA Transactions on Systems*, Vol.8, Issue 1, 2009, pp.158-167.



ประวัติผู้เขียน

นายโกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง เกิดเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรม ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ และปฏิบัติการระบบควบคุม โดยมีความสนใจในด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งจากการทำวิจัย วิทยานิพนธ์นี้มีผลงานตีพิมพ์ปรากฏดังภาคผนวก ก.

