

การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นตีสี่ที่มีโหลดเป็น  
อิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกันด้วยวิธีอาร์วีซี



นายกษมา รุ่งรัตน์วิชชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2564

STABILIZATION OF AC-DC POWER SYSTEM FEEDING PARALELLED  
POWER ELECTRONIC LOADS USING REFERENCE-VOLTAGE-BASED  
ACTIVE COMPENSATOR METHOD



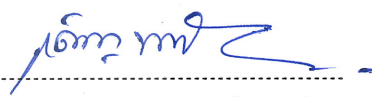
KASAMA RUNGRATTAWATCHAI

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

การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดิจิทัลที่มีไหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลัง  
ขนานกันด้วยวิธีอาร์วีซี

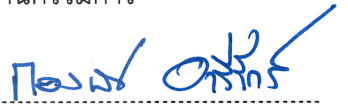
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



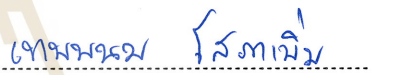
(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ




(รศ. ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.เทพพนม โสกาพิมพ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

กรรมการ



(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)


กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติชูชาญงูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กษมา รุ่งรัตน์ธวัชชัย : การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น  
อิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกันด้วยวิธีอาร์วีซี ( STABILIZATION OF AC-DC POWER SYSTEM  
FEEDING PARALLELED POWER ELECTRONIC LOADS USING REFERENCE-VOLTAGE-  
BASED ACTIVE COMPENSATOR METHOD ) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์  
ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์ , 192 หน้า.

คำสำคัญ : การวิเคราะห์เสถียรภาพ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว วงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้ก แบบจำลอง  
ดีคิว แบบจำลองค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การสร้างเสถียรภาพ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ  
บริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้กขนานกัน วงจรแปลงผันที่มีการควบคุมดังกล่าวจะมี  
พฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า การขาดเสถียรภาพจะ  
ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการศึกษาการ  
สร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการสร้างสัญญาณชดเชยไปยังส่วนการควบคุมของ  
โหลด เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถควบคุมแรงดันบัสดีซีได้ โดย  
การศึกษาถึงผลของพารามิเตอร์ของตัวสร้างเสถียรภาพที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบสามารถทำได้  
ผ่านการวิเคราะห์เสถียรภาพ ซึ่งโดยทั่วไปแบบจำลองของระบบไฟฟ้างดังกล่าวจะเป็นแบบจำลองที่แปร  
ผันตามเวลา เนื่องจากการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในระบบ ซึ่งสามารถพิสูจน์หา  
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามเวลาโดยใช้วิธีดีคิว (DQ) ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ  
แบบทั่วไป (generalized state space averaging : GSSA) และทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์  
เลอร์อันดับ 1 เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วย  
ทฤษฎีค่าเจาะจง อีกทั้งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ยังสร้างชุดทดสอบจริงเพื่อยืนยันผลของการสร้าง  
เสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี จากผลการศึกษาผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ และการ  
ทดสอบจากชุดทดสอบจริง พบว่าการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสามารถทำให้ระบบที่ขาด  
เสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวกลับมามีเสถียรภาพได้ตลอดย่านการทำงาน

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา กษมา รุ่งรัตน์ธวัชชัย  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา เพ็ญ อารีรักษ์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม เทพพนม วิมลทิน



KASAMA RUNGRATTAWATCHAI : STABILIZATION OF AC-DC POWER SYSTEM FEEDING PARALLELED POWER ELECTRONIC LOADS USING REFERENCE-VOLTAGE-BASED ACTIVE COMPENSATOR METHOD. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPAN AREERAK , Ph.D. , 192 PP.

Keyword : Stability analysis/Constant power load/Buck Converter/DQ Modeling/GSSA Modeling/Stabilization

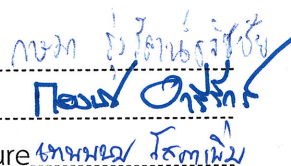
This thesis proposes stabilization method for three phase rectifier feeding paralleled controlled buck converter. These controlled converters behave as constant power loads (CPLs) which degrade stability of electrical system. These instability affects to control system performance. Therefore, studying stabilization is required. In this thesis the stabilization using Reference-Voltage-Based Active Compensator method (RVC) is considered. Studying the consequence of the RVC stabilizer for stability of electrical system has done through stability analysis. The proposed mathematical model is derived by the DQ and generalized state space averaging method. The eigenvalue theorem is applied with the proposed model for the stability analysis. The theoretical results are also compared with those from the simulation and experiment. The results show that a good agreement between theoretical, simulation, and experimental results is obtained. The RVC stabilization can stabilize the unstable system become back to the stable operation.

School of Electrical engineering  
Academic Year 2021

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

  
The signatures are handwritten in blue ink. The student's signature is at the top, followed by the advisor's signature, and the co-advisor's signature at the bottom. Each signature is written over a dotted line.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับการช่วยเหลือ ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร. กองพันธ์ อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัย อีกทั้งยังช่วยตรวจทาน และให้แนวทางสำหรับการแก้ไข ให้งานวิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากขึ้น รวมทั้งเป็นแบบอย่างที่ดีในหลาย ๆ ด้านทั้งด้านการงาน และการดำเนินชีวิตแก่ผู้วิจัย และคอยให้กำลังใจตลอดมา

ดร.เทพพนม โสภภาพิม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ คอยตรวจทาน และแก้ไขงานวิทยานิพนธ์ โปรแกรม และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเป็นแบบอย่างที่ดี และยังคงคอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษา และให้ความรู้ทางวิชาการตลอดมา

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยพีอีเอ็มซี ที่คอยให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ และอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่คอยให้ความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีต และปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

กษมา รุ่งรัตน์ธวัชชัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
<b>บทที่</b>	
<b>1. บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1    ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2    วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3    ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.4    ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6    การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
<b>2. ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1    บทนำ.....	5
2.2    งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	5
2.3    งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อ เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า.....	6
2.4    งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพและสร้างเสถียรภาพ สำหรับระบบไฟฟ้าที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว.....	10
2.5    สรุป.....	15
<b>3. วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์.....</b>	<b>16</b>
3.1    บทนำ.....	16
3.2    แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มี โหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุม.....	16
3.2.1    สมมติฐานและระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีตีควและวิธีค่าเฉลี่ย ปริภูมิสถานะทั่วไป .....	19
3.2.3 การหาค่าในสภาวะคงตัว.....	35
3.2.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ .....	37
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้กที่มีการควบคุม .....	40
3.3.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	40
3.3.2 การทำให้เป็นเชิงเส้น.....	42
3.3.3 การหาค่าในสภาวะคงตัว.....	45
3.3.4 การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบับค้ก .....	47
3.3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ .....	50
3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มี โหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้กที่มีการควบคุมและมีการสร้าง เสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี .....	52
3.4.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	52
3.4.2 หลักการการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี.....	53
3.4.3 การทำให้เป็นเชิงเส้น.....	56
3.4.4 การหาค่าในสภาวะคงตัว.....	58
3.4.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ .....	59
3.5 สรุป.....	61
<b>4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้กขนานกัน .....</b>	<b>62</b>
4.1 บทนำ.....	62
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มี โหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้กที่มีการควบคุมขนานกัน .....	62
4.2.1 สมมติฐานและระบบไฟฟ้าที่พิจารณา .....	62
4.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	64
4.2.3 การทำให้เป็นเชิงเส้น.....	68
4.2.4 การหาค่าในสภาวะคงตัว.....	70
4.2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ .....	71

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
4.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่มี การควบคุมขนานกัน และมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี.....	73
4.3.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	73
4.3.2	หลักการการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับวงจรเรียงกระแส สามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ขนานกัน .....	74
4.3.3	การทำให้เป็นเชิงเส้น.....	78
4.3.4	การหาค่าในสภาวะคงตัว.....	80
4.3.5	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ .....	81
4.4	สรุป.....	84
<b>5.</b>	<b>การวิเคราะห์เสถียรภาพ.....</b>	<b>85</b>
5.1	บทนำ.....	85
5.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ขนานกัน.....	85
5.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มี โหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ขนานกันและมีการสร้าง เสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี .....	91
5.4	สรุป.....	98
<b>6.</b>	<b>การสร้างชุดทดสอบ.....</b>	<b>99</b>
6.1	บทนำ.....	99
6.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรตัวต้านทาน .....	99
6.2.1	ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ .....	99
6.2.2	ผลการทดสอบและอภิปรายผล.....	101
6.3	วงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	102
6.3.1	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์.....	107
6.3.2	ผลการทดสอบและอภิปรายผล.....	112
6.4	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลัง แบบบัก์ขนานกัน .....	113
6.4.1	ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ .....	113
6.4.2	การทดสอบชุดวงจรตรวจจับ.....	114
6.4.3	การสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์.....	116

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.4.4 ผลการทดสอบและอภิปรายผล .....	118
6.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ ขนานกันที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี .....	119
6.5.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของชุดสร้างเสถียรภาพวิธีอาร์วีซี .....	119
6.5.2 วงจรสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี.....	120
6.5.3 การโปรแกรมชุดสร้างเสถียรภาพวิธีอาร์วีซี.....	122
6.5.4 การทดสอบการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี .....	123
6.6 สรุป.....	126
<b>7. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจริง .....</b>	<b>127</b>
7.1 บทนำ.....	127
7.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงกรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพ ด้วยวิธีอาร์วีซี .....	127
7.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงกรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพ ด้วยวิธีอาร์วีซี .....	127
7.2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพ ด้วยวิธีอาร์วีซี .....	131
7.3 การสร้างเสถียรภาพจากชุดทดสอบจริง.....	133
7.4 สรุป.....	136
<b>8. สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>137</b>
8.1 สรุป.....	137
8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	139
รายการอ้างอิง.....	140
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราฟสัน .....	147
ภาคผนวก ข. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK.....	154
ภาคผนวก ค. โปรแกรมภาษา C สำหรับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	158
ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา .....	171
ประวัติผู้เขียน.....	192



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการ วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง .....	7
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเสถียรภาพของระบบที่ขาดเสถียรภาพ เนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว .....	10
3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 .....	38
4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 .....	71
7.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริจด์ที่มี โหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่ใช้ในการทดสอบจริง. ....	128

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพสรุประดับแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพ ..... 9
2.2	แผนภาพสรุประดับแนวทางการสร้างเสถียรภาพ ..... 14
3.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุม ..... 17
3.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟสและความต้านทานมุมเหลือ ..... 17
3.3	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟส ..... 18
3.4	แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว ..... 21
3.5	วงจรสมมูลเรียงกระแสสามเฟสในรูปแกนหมุนดีคิว ..... 21
3.6	ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส ..... 22
3.7	วงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกนดีคิว ..... 23
3.8	ตัวเก็บประจุของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า ..... 23
3.9	วงจรสมมูลตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกนดีคิว ..... 25
3.10	วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว ..... 25
3.11	วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง ..... 26
3.12	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลัง ..... 31
3.13	สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส ..... 35
3.14	ผลตอบสนองของ $I_{dc}$ , $V_{dc}$ , $I_L$ และ $V_o$ ที่ Duty cycle = 40 ..... 39
3.15	ผลตอบสนองของ $I_{dc}$ , $V_{dc}$ , $I_L$ และ $V_o$ ที่ Duty cycle = 60 ..... 39
3.16	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม ..... 40
3.17	วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง ..... 41
3.18	แผนภาพบล็อกควบคุมแรงดันไฟฟ้า ..... 47
3.19	แผนภาพบล็อกควบคุมกระแสไฟฟ้า ..... 49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 การจำลองสถานการณ์โดยเปลี่ยน $V_o^*$ จาก 20 V เป็น 25 V .....	51
3.21 การจำลองสถานการณ์โดยเปลี่ยน $V_o^*$ จาก 25 V เป็น 30 V.....	52
3.22 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ที่มีการควบคุมและมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี .....	53
3.23 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	54
3.24 การจำลองสถานการณ์โดยเปลี่ยน $V_o^*$ จาก 20 V เป็น 25 V .....	60
3.25 การจำลองสถานการณ์โดยเปลี่ยน $V_o^*$ จาก 35 V เป็น 40 V .....	61
4.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ ที่มีการควบคุม 2 ชุด ขนานกัน.....	64
4.2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	64
4.3 การจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.4 โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง $V_{o1}^*$ และ $V_{o2}^*$ จาก 10 V เป็น 15 V.....	72
4.4 การจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง $V_{o1}^*$ และ $V_{o2}^*$ จาก 15 V เป็น 20 V.....	73
4.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ขนานกันที่มีการควบคุมและมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี.....	74
4.6 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	75
4.7 การจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.5 โดยเปลี่ยน $V_{o1}^*$ และ $V_{o2}^*$ จาก 10 V เป็น 15 V .....	82
4.8 การจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.5 โดยเปลี่ยน $V_{o1}^*$ และ $V_{o2}^*$ จาก 20 V เป็น 25 V .....	83
5.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีการควบคุม 2 ชุดต่อขนานกัน .....	86
5.2 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	87
5.3 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ .....	88
5.4 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพ กรณีวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 2 มีค่าคงที่ 110 W (33.17 V) .....	90
5.5 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ กรณีวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 2 มีค่าคงที่ 110 W (33.17 V) .....	91

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน ที่มีการควบคุมและมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี .....	92
5.7 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า $R_V$ ที่มีผลต่อเสถียรภาพโดยที่กำหนดให้ผลรวมของ วงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่า 150 W.....	93
5.8 การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพเมื่อผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้า ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 150 W .....	94
5.9 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า $R_V$ ที่มีผลต่อเสถียรภาพโดยที่กำหนดให้ผลรวม ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่า 190 W .....	95
5.10 การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพเมื่อผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าของวงจร แปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 190 W เมื่อเปลี่ยนแปลง $R_V$ จาก 0.6 เป็น 1.2 .....	96
5.11 การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพเมื่อผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าของวงจร แปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 190 W เมื่อเปลี่ยนแปลง $R_V$ จาก 0.6 เป็น 1.5 .....	97
6.1 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ .....	100
6.2 ภาพถ่ายชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ .....	101
6.3 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ).....	102
6.4 โครงสร้างโดยรวมวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน .....	103
6.5 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	103
6.6 มอดูลของมอสเฟตสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ .....	104
6.7 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ .....	105
6.8 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ .....	105
6.9 ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	106
6.10 ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA2560.....	106
6.11 โครงสร้างชุดทดสอบวงจรขยายแบบแยกโอดสัญญาณ.....	111
6.12 ผลการทดสอบการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 25% เป็น 35 .....	112
6.13 ผลการทดสอบการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 55% เป็น 45 .....	113
6.14 ชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ขนานกัน .....	114
6.15 ชุดวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า .....	115
6.16 การทดสอบของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.14 โดยเปลี่ยน $V_{o1}^*$ จาก 5 V เป็น 10 V และคงค่าแรงดัน $V_{o2}^*$ ที่ 5 V.....	118

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.17 การทดสอบของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.14 โดยเปลี่ยน $V_{d}^*$ จาก 10 V เป็น 5 V และคงค่าแรงดัน $V_{o2}^*$ ที่ 5 V.....	119
6.18 ชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชานกันที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี.....	120
6.19 ชุดวงจรสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี.....	121
6.20 การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า.....	124
6.21 ผลการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี.....	125
7.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชานกันที่มีการควบคุม 2 ชุดต่อชานกัน.....	128
7.2 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	129
7.3 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์.....	130
7.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชานกันที่มีการควบคุม และมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี.....	131
7.5 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า $R_v$ ที่มีผลต่อเสถียรภาพเมื่อ $V_{o1} = 36$ V และ $V_{o2} = 40$ V.....	132
7.6 การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์.....	133
7.7 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพจากชุดทดสอบจริงกรณีที่ยังไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี.....	134
7.8 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพจากชุดทดสอบจริงกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี.....	135

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้านิยมใช้กันอย่างแพร่หลายโดยส่วนมากจะเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมซึ่งจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant power loads : CPLs) โหลดดังกล่าวจะไปลดทอนเสถียรภาพของระบบส่งจ่าย ซึ่งการขาดเสถียรภาพจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำงานของระบบควบคุม (Rivetta, C., Williamson, G.A., and Emadi, A. 2005.) การพิจารณาจุดการทำงานของระบบที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสามารถคาดเดาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นแนวทางที่ง่าย มีความซับซ้อนน้อย และมีหลากหลายวิธีในการสร้าง วิธีที่นิยมหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังมี 2 วิธีคือ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป (General State Space Averaging : GSSA) (Emadi, A. 2004.) และวิธีดีคิว (DQ) (Han S.B., Choi, N.S., Rim, C.T. and Cho, G.H. 2002.) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำได้แค่เพียงทำนายจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้เท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นในการกำจัดผลการขาดเสถียรภาพสำหรับระบบที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยอาศัยเทคนิคการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี (Reference-Voltage-Based Active Compensator : RVC) มาสร้างเสถียรภาพเพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน

โดยส่วนใหญ่เทคนิคการสร้างเสถียรภาพ มีอยู่ 3 วิธีที่อาศัยการสร้างสัญญาณชดเชยในการกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพื่อทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพ วิธีการแรกคือการสร้างสัญญาณการสร้างเสถียรภาพในฝั่งของแหล่งจ่าย ในกรณีนี้ระบบจะกลับมามีเสถียรภาพได้โดยปราศจากการรบกวนต่อสมรรถนะของโหลด แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถใช้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่ไม่มีการควบคุมได้ สำหรับวิธีที่สองเป็นการนำสัญญาณชดเชยจากวงจรกรองไปผสมผสานในส่วนการควบคุมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพื่อชดเชยค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดดังกล่าวเพื่อทำให้ระบบกลับมามีความเสถียรภาพแต่วิธีดังกล่าวจะส่งผลให้สมรรถนะของโหลดลดลง และวิธีการสุดท้ายคือ การเพิ่มวงจรเข้าไประหว่างฝั่งแหล่งจ่ายและฝั่งโหลด ซึ่งวิธีการนี้เหมาะกับระบบที่ไม่สามารถปรับแต่งภายในส่วนของแหล่งจ่ายและโหลดได้ (Areerak, K-N., Sopapirm, T., BozhkoS.V., Hill, C., Suyapan, A. and Areerak, K-L. 2018.) จาก 3 วิธีตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นส่วนใหญ่มักใช้เป็นวิธีการหน่วงแบบแอคทีฟ (Active damping) (Rahimi, A.M. and Emadi, A. 2009.) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ก่อให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียจากการต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าเพิ่ม



ซึ่งต่างจากวิธีการหน่วงแบบพาสซีฟ (Passive damping) ที่ต้องเพิ่มตัวต้านทานและตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ไปขนานหรืออนุกรมในวงจรหรือลดค่าความเหนี่ยวนำในวงจรซึ่งจะทำให้เกิดค่ากำลังงานสูญเสียแก่ระบบและการเพิ่มตัวเก็บประจุทำให้วงจรมีขนาดใหญ่และมีค่าใช้จ่ายสูง (Cespedes, M., Xing, L. and Sun, J. 2011) ซึ่งระบบที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์คือ ระบบที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่ไม่สามารถควบคุมแรงดันบัสดี้ซี (DC Bus) จึงทำให้ไม่สามารถปรับแรงดันขาออกได้ ดังนั้นจึงเลือกวิธีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี ซึ่งเป็นวิธีที่สร้างสัญญาณชดเชยไปยังส่วนการควบคุมของโหลด

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ขนานกัน การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเฉพาะเจาะจง หลักการสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีอาร์วีซี และยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK พร้อมกับการทดสอบจริง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับการขาดเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

1.2.2 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ขนานกัน

1.2.3 เพื่อประยุกต์วิธีสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีมาสร้างเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ขนานกัน

1.2.4 เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ขนานกัน

1.2.5 เพื่อออกแบบชุดทดสอบที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ขนานกัน

## 1.3 ขอบเขตเบื้องต้นของงานวิจัย

1.3.1 ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักซ์ขนานกัน

1.3.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พิสูจน์จากวิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

1.3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพจะใช้ทฤษฎีบทค่าจางเฉพาะมาพิจารณาระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

1.3.4 การยืนยันผลการตอบสนองของระบบ ในส่วนการจำลองสถานการณ์จะใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเพียงระบบการสร้างเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบับคักขนานกัน

1.4.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาเฉพาะโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่พิจารณาฮาร์มอนิกที่เกิดในระบบ

1.4.3 การยืนยันการขาดเสถียรภาพของระบบจะใช้การจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB/SIMULINK และการสร้างชุดทดสอบจริง

1.4.4 การสร้างเสถียรภาพจะพิจารณาในส่วนของโหลดวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ บริจด์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบับคัก

1.5.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริจด์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบับคักที่มีการควบคุม

1.5.3 ได้องค์ความรู้ด้านการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลัง วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริจด์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบับคัก ทั้งกรณีไม่มีตัวควบคุม,กรณีมีตัวควบคุม และกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (GSSA) ร่วมกับวิธีดีคิว

1.5.4 ได้โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริจด์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบับคักที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี บนโปรแกรม MATLAB

1.5.5 ได้ต้นแบบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริจด์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบับคักที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

1.5.6 ได้บทความเผยแพร่ในวารสารหรือการประชุมวิชาการระดับชาติและระดับนานาชาติ

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 8 บท โดยแต่ละบทจะนำเสนอรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 นำเสนอบทนำ ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย วิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

บทที่ 3 กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริจด์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบับคักกรณีที่ไม่มีการควบคุม กรณีที่มีการควบคุมแบบพีไอเรียงต่อกัน และกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี โดยใช้วิธีดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

การใช้อนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งเพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ได้เป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

*บทที่ 4* กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริจด์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักส์สองชุดขนานกัน กรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี และกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีโดยใช้วิธีตีควรร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การใช้อนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งเพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ได้เป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

*บทที่ 5* นำเสนอผลการวิเคราะห์เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริจด์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักส์สองชุดขนานกัน กรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี และกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี โดยอาศัยทฤษฎีค่าเจาะจง และทำการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี และกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

*บทที่ 6* นำเสนอการสร้างชุดทดสอบจริงของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริจด์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักส์สองชุดขนานกัน กรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี และกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี การสร้างตัวควบคุมพีไอและการสร้างเสถียรภาพวิธีอาร์วีซีด้วยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์

*บทที่ 7* นำเสนอผลการวิเคราะห์เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบจริงของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริจด์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักส์สองชุดขนานกัน กรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี และกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี โดยอาศัยทฤษฎีค่าเจาะจง และทำการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี และกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีทั้งการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการยืนยันจากชุดทดสอบจริง

*บทที่ 8* เป็นการสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือภาคผนวก ก. โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน - ราฟสัน ภาคผนวก ข. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ภาคผนวก ค. โครงสร้างชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ภาคผนวก ง. โปรแกรมภาษา C สำหรับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ และภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่

## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นำเสนอการสร้งเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ขนานกันด้วยวิธีอาร์วีซี และมีการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อหาค่าอัตราขยายที่เหมาะสมสำหรับการสร้งเสถียรภาพอาร์วีซีผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งในอดีตมีผู้ได้ทำการวิจัยและพัฒนาต้งปัจจุบัน โดยในบทที่ 2 จะนำเสนอปรัทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้งเสถียรภาพของระบบที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

งานวิจัยวิทยานิพนธ์เกี่ยวข้องกับการสร้งเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว งานวิจัยและปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ได้ค้นคว้าจากอดีตต้งปัจจุบัน แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004	Jusoh, A.B.	นำเสนอผลของอิมพีแดนซ์ลบบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบส่งจ่ายอย่างง่ายที่เชื่อมต่อกับวงจรกรอง LC และการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า
2006	Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., Geoffrey A.	นำเสนอเกี่ยวกับหลักการการขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของอิมพีแดนซ์ลบบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบยานยนต์ขั้นสูง โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กโดยพิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2010	Rahimi, A. M., Emadi, A.,	นำเสนอผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการทำงานในโหมดกระแสไหลไม่ต่อเนื่อง และการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า
2016	Sulligoi, G., Vicenzutti, A., Arcidiacono, V., Khersonsky, Y.	นำเสนอผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายในระบบไฟฟ้าของเรือดำน้ำขนาดใหญ่ เนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

จากการสำรวจงานวิจัยและปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะมีพฤติกรรมเหมือนอิมพีแดนซ์ลบบ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะมีพฤติกรรมเหมือนกับอิมพีแดนซ์ลบบ โดยอิมพีแดนซ์ลบบดังกล่าวจะไปลดค่าความต้านทานของวงจรกรองซึ่งจะทำให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณในระบบขึ้น ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ลบบดังกล่าวมีค่ามากพอก็จะทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพซึ่งอาจทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดความเสียหายได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากอิมพีแดนซ์ลบบ จุดขาดเสถียรภาพสามารถคาดเดาได้จากการวิเคราะห์ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

การออกแบบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ขนานกันจะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเป็นแบบจำลอง



ที่แปรผันตามเวลาเนื่องจากผลของการสวิตช์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งทำให้ยากต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามเวลาจะทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพทำได้ง่ายขึ้น งานวิจัยและปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ได้ค้นคว้าจากอดีตถึงปัจจุบัน แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

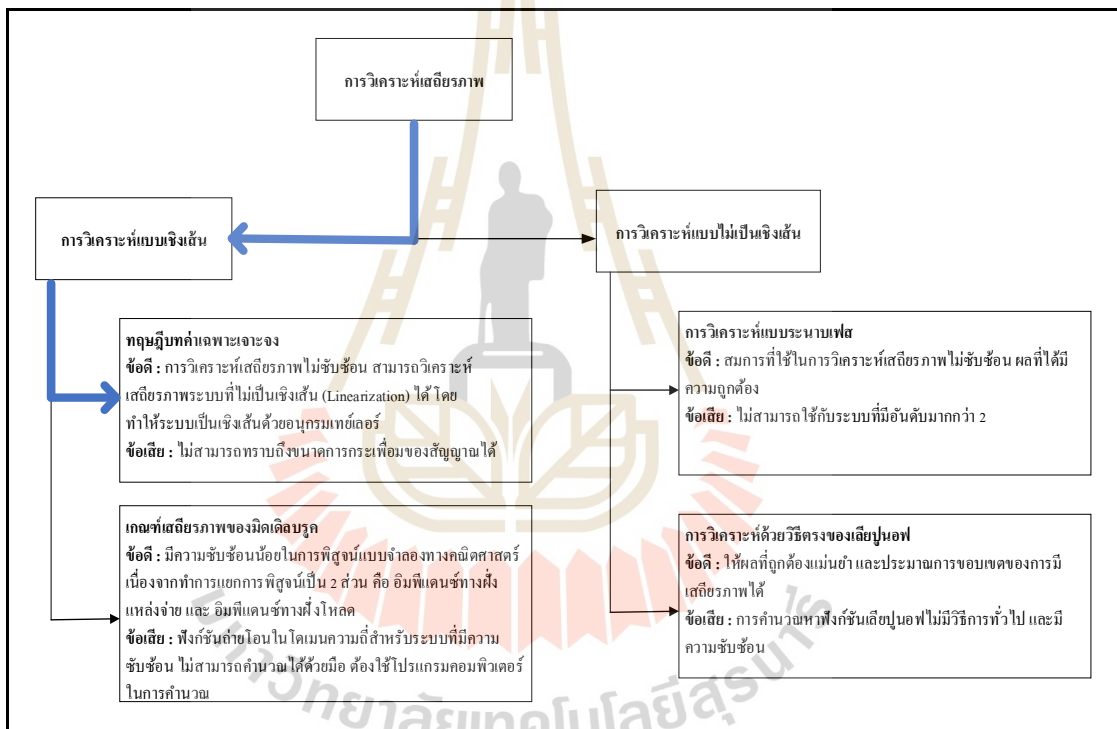
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1976	Middlebrook, R.D.	นำเสนอผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้าซึ่งโหลดในลักษณะนี้จะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบต่อระบบ ซึ่งนอกจากจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบดังนั้น ระบบไฟฟ้าที่มีโหลดลักษณะดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยนำเสนอหลักการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูค เพื่อหลีกเลี่ยงการขาดเสถียรภาพที่อาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหาย
1991	Slotine, J.J.E., Li, W.	นำเสนอพื้นฐานการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์สัญญาณขนาดใหญ่ด้วยวิธีระนาบเฟส และวิธีการของเลียปูนอฟ
1994	Rim, C.T., Choi, N.S., Cho, G.C., Cho, G.H.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานพร้อมผลการจำลองสถานการณ์
1997	Emadi, A	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในวงจรแปลงผันกำลังดีซี
1998	Han, S.B, Choi, N.S, Rim, C.T.,	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแส 3 เฟสควบคุมโดยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานด้วยวิธีการดีคิว และการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า
2001	Emadi, A	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแส 1 เฟสที่มีการควบคุมด้วยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป



ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004	Emadi, A	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในวงจรแปลงผันกำลังดีซีที่เชื่อมต่อกันหลายชุด
2008	Areerak, K-N, Bozhko, S.V., Asher, G.M., Thomas, D.W.P.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในอุดมคติด้วยวิธีดีคิว และมีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง
2010	Chaijarumudomrung, K. Areerak, K-N, Areerak, K-L.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 6 พัลส์ ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในอุดมคติด้วยวิธีดีคิว และมีการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า
2010	Areerak, K-N, BOZHKO, S. V., ASHER, G. M., DE LILLO, L., THOMAS, D. W. P.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก พร้อมทั้งวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเปลี่ยนแปลง และจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า
2011	Magne, P., Marx, D., Nahid, M.B., Pierfederici, S., Davat, B.	บทความนี้แนะนำการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังดีซีที่มีเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ ด้วยวิธีการของเลียปูนอฟ โดยนำเสนอวิธี ทาคากิ-ซูจิวโน, เบร์ยันทันและมอเซอร์, ปีดีคิวแอลเอฟ และติดตามวิธีเส้นโคจรย้อนรอย ในการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ พร้อมการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
2017	Liu, X., Bian Y, Fan, S.	นำเสนอหลักวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่สำหรับระบบไฟฟ้ากระแสตรงที่มีตัวต้านทานหน่วงขานกับวงจรกรอง ที่เชื่อมต่อกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

จากการสำรวจงานวิจัยและปริทัศน์วรรณกรรมดังตารางที่ 2.2 พบว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามเวลาของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังพบว่า ในวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีนิยมใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามเวลา ในขณะที่วงจรเรียงกระแสสามเฟสทั้งที่มีการควบคุมและไม่มีการควบคุมนิยมใช้วิธีดีคิวในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามเวลา ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากวิธีการดังกล่าวไม่ซับซ้อน และสามารถตรวจสอบความถูกต้องได้จากผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่แปรผันตามเวลาสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยวิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในส่วนของการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถทำได้หลายวิธีซึ่งสรุปได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากแผนภาพในรูปที่ 2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพถูกแบ่งออกเป็น 2 แนวทางคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น และการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพที่เป็นเชิงเส้นมี 2 วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ การใช้ทฤษฎีค่าเฉพาะจงในการวิเคราะห์เสถียรภาพของโพลเด่นที่อยู่ในระนาบเอส และเกณฑ์การวิเคราะห์เสถียรภาพของมิตเดิลบรูกที่ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยทำการเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์อินพุตกับอิมพีแดนซ์เอาต์พุตบนโดเมนความถี่ การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นนี้มีข้อเสียคือไม่สามารถวิเคราะห์สัญญาณที่เกิดการกระเพื่อมได้ แต่ก็มีข้อดีคือ เป็นวิธีการที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบ

กับการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือการวิเคราะห์แบบระบบเฟสโดยเป็นวิธีการวิเคราะห์แนวโน้มการโคจรของกราฟในระบบเฟสที่ได้จากสมการอนุพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ โดยทำการคำนวณหาฟังก์ชันของเลียปูนอฟซึ่งมีขั้นตอนที่ยุ่งยากเนื่องจากไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ และนำฟังก์ชันที่คำนวณได้ไปตรวจสอบเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ง่ายที่สุดคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงซึ่งสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพได้ทันทีหากระบบที่พิจารณานั้นเป็นระบบที่เป็นเชิงเส้นแม้หากระบบที่พิจารณาเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถทำการวิเคราะห์เสถียรภาพได้โดยการทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่ 1

## 2.4 การสร้างเสถียรภาพของระบบที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าทำให้ทราบถึงจุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า แต่ไม่สามารถทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการศึกษาวิธีการสร้างเสถียรภาพวิธีการต่าง ๆ ซึ่งเป็นงานวิจัยที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริจด์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ขนานกัน ซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์งานวิจัยและปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเสถียรภาพของระบบที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่ได้ค้นคว้าจากอดีตถึงปัจจุบัน แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเสถียรภาพของระบบที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2003	Dahono, P.A.	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพแบบแอกทีฟ ด้วยเทคนิคการหน่วงแบบแอกทีฟสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่เชื่อมต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ในเชิงเปรียบเทียบกับสร้างเสถียรภาพด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ พร้อมจำลองสถานการณ์
2008	Usman, I.M., Godoy, E., Lefranc, P., Sadarnac, D., Karimi, C.	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบแอกทีฟด้วยหลักการสเตทพีดแบค ร่วมกับ โพลเพลสเมนต์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่เชื่อมต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวพร้อมการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเสถียรภาพของระบบที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Rahimi, A.M., Emadi, A.,	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสก์ที่ต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า
2010	Rahimi, A.M., Williamson, G.A., Emadi, A	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบแอกทีฟ ด้วยเทคนิคลูบยกเล็กสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสก์ที่เชื่อมต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง การจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า และการผลการทดสอบจากชุดทดสอบจริง
2010	Liutanakul, P., Awan, A.B., Pierfederici, S.	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบแอกทีฟ ด้วยการเพิ่มวงจรผ่านแถบและอัตราขยายไปเพิ่มในตัวควบคุมของอุปกรณ์ทางฝั่งโหลด สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่เชื่อมต่อวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร พร้อมการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพไนควิส การจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า และผลการทดสอบจากชุดทดสอบจริง
2011	Cespedes, M., Xing, L., Sun, J.	นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบพารามิเตอร์ของอุปกรณ์หน่วงแบบแพสซีฟสำหรับการสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยหลักการของมิตเดิลบรูค
2012	Radwan, A.A.A, Mohamed, Y.A-R.I.	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยวิธีแอกทีฟทางฝั่งแหล่งจ่ายด้วยวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีการควบคุมเฟส ในระบบไฟฟ้าไมโครกริดกระแสตรง และทำการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยหลักการของมิตเดิลบรูค

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเสถียรภาพของระบบที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (ต่อ)

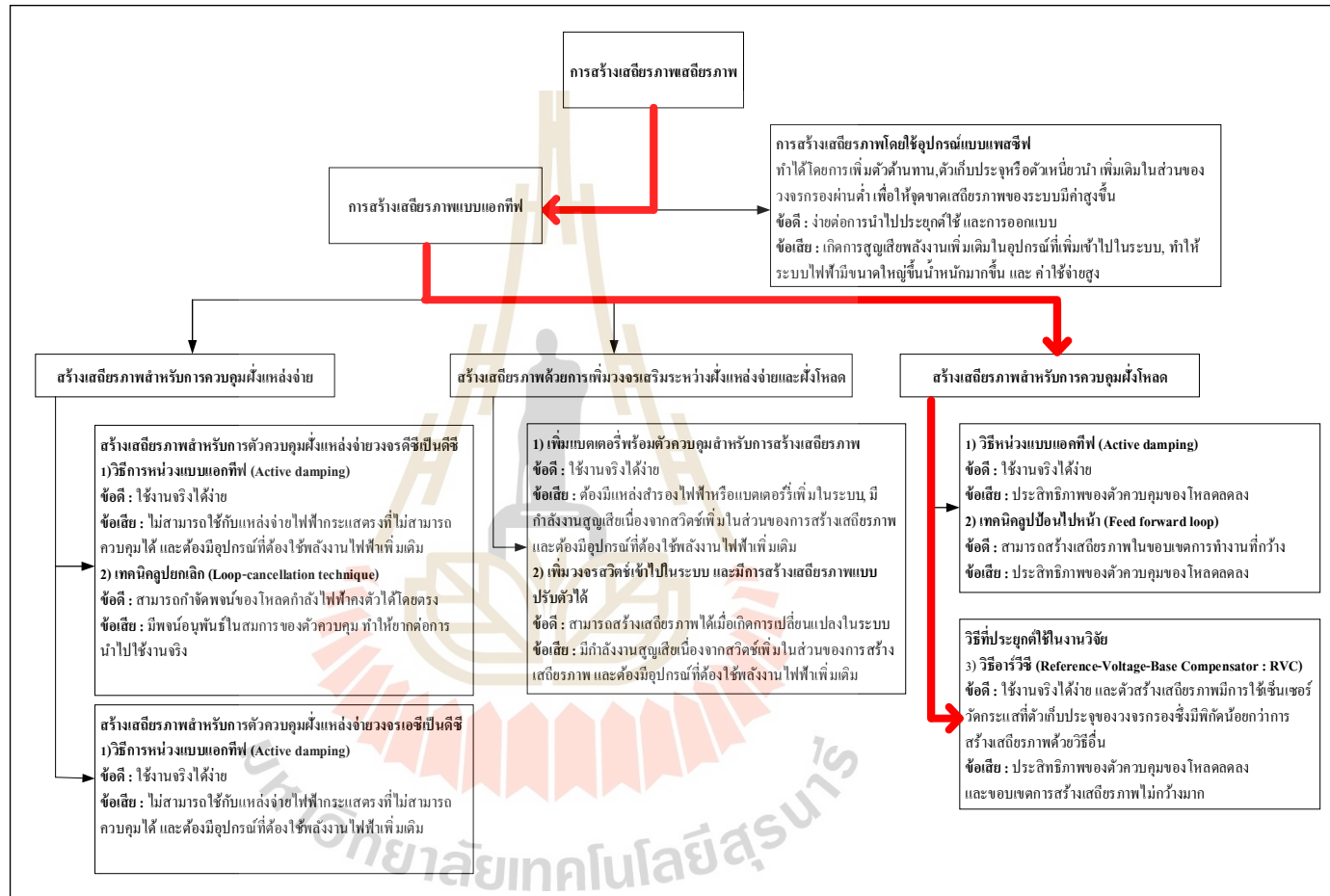
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2012	Magne, P., Marx, D., Nahid, M.B., Pierfederici, S.	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบแอคทีฟ ด้วยเทคนิคตัวเก็บประจุจำลองทางฝั่งโหลด สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร พร้อมการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า และผลการทดสอบจากชุดทดสอบจริง
2012	Mohamed, Y.A-R.I., Radwan, A.A.A	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบแอคทีฟและทำการเปรียบเทียบระหว่าง วิธีอาร์วีซี วิธีอาร์วีซีแบบปรับปรุง และวิธีอาร์ซีซี สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ และวงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีโหลดเป็นมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร พร้อมการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์เสถียรภาพไนควิส การจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า และผลการทดสอบจากชุดทดสอบจริง
2014	Wu, M., Lu D.D-C.	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยวิธีแอคทีฟทางฝั่งแหล่งจ่ายที่มีแหล่งจ่ายกระแสตรงที่สามารถควบคุมได้ด้วยวงจรทอนแรงดัน และการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า
2015	Wu, M., Lu D.D-C.	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบแอคทีฟ ด้วยเทคนิคลูปป้อนไปหน้าทางด้านโหลด แบบโดยตรง และแบบปรับปรุง สำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่เชื่อมต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง การจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า และผลการทดสอบจากชุดทดสอบจริง

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเสถียรภาพของระบบที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2016	Mishra, R., Hussain, M.N., Agarwal, V.	นำเสนอหลักการบรรเทาเสถียรภาพวิธีควบคุมสไลด์ดิ้งโหมด สำหรับระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน และการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วย ทฤษฎีค่าเจาะจง
2016	Mahmoudi,H., Aleenejad,M., Ahmadi, R.	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีตัวควบคุมทำนายสำหรับ วงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่ต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมการ จำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า และการทดสอบจากชุดทดสอบ จริง
2017	Liu, X., Bian, Y. , Fan , S.	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว แบบแอกทีฟ โดยการเพิ่มวงจรเบตเตอร์มาขนานระหว่างดีซีบัสและ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมการจำลองสถานการณ์
2018	Sopapirm, T.	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว แบบแอกทีฟ ด้วยเทคนิคการหน่วงแบบแอกทีฟทางฝั่งโหลด สำหรับ วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลัง แบบบัก์ที่มีการควบคุม พร้อมการจำลองสถานการณ์บน คอมพิวเตอร์
2018	Areerak, K-N., Sopapirm, T., Bozhko, S., Hill, C.I., Suyapan, A., Areerak, K-L.	นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว แบบแอกทีฟ ด้วยเทคนิคลูปลูกเล็กแบบปรับตัว สำหรับวงจรเรียง กระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่มีการ ควบคุมขนานกัน พร้อมการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการวิเคราะห์ แบบระนาบเฟส การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการ ทดสอบจากชุดทดสอบจริง

จากการสำรวจงานวิจัยและปริทัศน์วรรณกรรมดังตารางที่ 2.3 เกี่ยวกับการสร้างเสถียรภาพ ให้แก่ระบบไฟฟ้าที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และวิธีที่ประยุกต์ใช้ใน งานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.2





รูปที่ 2.2 แผนภาพสรุปแนวทางการสร้างเสถียรภาพ

จากแผนภาพแนวทางการสร้างเสถียรภาพในรูปที่ 2.2 การสร้างเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบ่งออกเป็น 2 แนวทางคือการสร้างเสถียรภาพด้วยอุปกรณ์แพสซีฟทำได้โดยการเพิ่มตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำ ลงไปในส่วนของวงจรกรองผ่านต่ำ เพื่อให้จุดขาดเสถียรภาพของระบบมีค่าสูงขึ้นซึ่งมีข้อดีคือ ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้ และการออกแบบ แต่มีข้อเสียคือ เกิดการสูญเสียพลังงานเพิ่มเติมในอุปกรณ์ที่เพิ่มเข้าไปในระบบ ทำให้ระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้น น้ำหนักมากขึ้น และค่าใช้จ่ายสูง และวิธีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการแอกทีฟที่ทำได้โดยการออกแบบโปรแกรมสำหรับการสร้างเสถียรภาพแทนการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำให้ระบบไฟฟ้ามีขนาดเล็กลงและลดกำลังสูญเสียเนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ ซึ่งมีแนวทางการสร้างเสถียรภาพแบบแอกทีฟอยู่ 3 แนวทางด้วยกันคือ การสร้างเสถียรภาพฝั่งแหล่งจ่าย การสร้างเสถียรภาพโดยการเพิ่มวงจรเสริมระหว่างฝั่งแหล่งจ่ายและฝั่งโหลด และการสร้างเสถียรภาพทางฝั่งโหลด โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกวิธีการสร้างเสถียรภาพทางฝั่งโหลดด้วยวิธีอาร์วีซีมาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชานกัน เนื่องจากวงจรเรียงกระแสสามเฟสของระบบไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ไม่สามารถควบคุมได้ และวิธีการสร้างเสถียรภาพดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานจริงได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือ การสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการดังกล่าวจะไปลดสมรรถนะในการทำงานของโหลดกำลังไฟฟ้า โดยรายละเอียดต่างๆจะถูกนำเสนอในบทถัดไป

## 2.5 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการขาดเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ และการสร้างเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชานกัน ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ เป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำคัญสำหรับการพัฒนาวิธีการสร้างเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

## บทที่ 3

### วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์

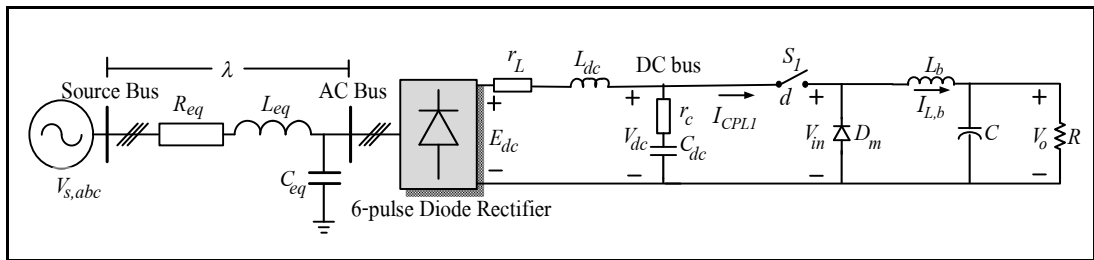
#### 3.1 บทนำ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบมีความจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามเวลา ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะทำการค้นคว้าเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ โดยอาศัยวิธีดีคิว ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอถึง การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์กรณีที่ไม่มีความควบคุม กรณีที่มีความควบคุม และกรณีที่มีความควบคุมร่วมกับวงจรการสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีพร้อมทั้งนำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพ การทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับ 1 การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

#### 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุม

##### 3.2.1 สมมติฐานและระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังเอซีเป็นดีซีในระบบ 3 เฟสสมดุล กรณีที่ไม่มีความควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีโดยพิจารณาเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ มีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_s$ ) ต่อเข้ากับสายส่งซึ่งมีพารามิเตอร์คือ  $R_{eq}$ ,  $L_{eq}$  และ  $C_{eq}$  และมีไดโอด 6 ตัวที่ต่อกันแบบบริดจ์ สำหรับพารามิเตอร์ในส่วนของวงจรกรองสัญญาณดีซีแทนด้วย  $r_L$ ,  $L_{dc}$  และ  $C_{dc}$  โดยที่  $E_{dc}$  และ  $V_{dc}$  เป็นแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และแรงดันตกคร่อม  $C_{dc}$  ตามลำดับ

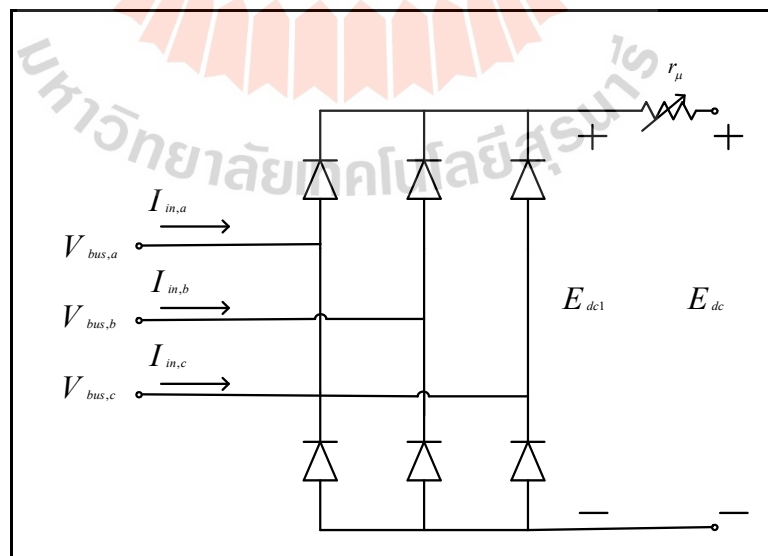


รูปที่ 3.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุม

เมื่อพิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ใช้ไดโอดพบว่าผลกระทบที่เกิดจาก  $L_{eq}$  ในรูปที่ 3.1 ส่งผลทำให้เกิดมุมเหลื่อมและทำให้เกิดแรงดันตกทางฝั่งแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส ซึ่งแรงดันตกดังกล่าวถูกแทนด้วย  $r_\mu$  (Mohan, N., Underland, T.M., and Robbins, W.P. (2003).) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

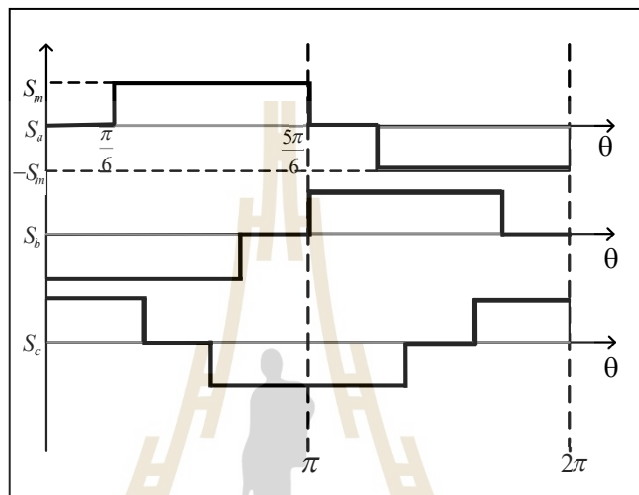
$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \tag{3.1}$$

โดยที่  $\omega$  คือความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 3.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสและความต้านทานมุมเหลื่อม

จากรูปที่ 3.2  $E_{dc}$  แทนแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่พิจารณาผลกระทบจากมุมเหลื่อม และ  $E_{dc1}$  แทนค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ยังไม่พิจารณาผลกระทบของมุมเหลื่อม โดยผลกระทบจากมุมเหลื่อมแทนด้วยค่าความต้านทานปรับค่าได้  $r_\mu$  ทางฝั่งวงจรไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้การสร้างแบบจำลองจะอาศัยสัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์โดยไม่พิจารณามุมเหลื่อมได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟส

จากรูปที่ 3.3 แสดงสมการสัญญาณการสวิตช์ของไดโอดได้ดังสมการที่ (3.2) (K.Chaijaroenudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2010) โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะความถี่มูลฐานและไม่คำนึงถึงฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ จะได้ฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่นดังสมการที่ (3.2)

$$S_{abc} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[ \sin(\omega t + \varphi) \quad \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) \quad \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) \right]^T \quad (3.2)$$

กำหนดให้  $\varphi$  คือ มุมเฟสที่บัสแรงดันเอซี

ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระแสและแรงดันจากรูปที่ 3.2 ซึ่งพิจารณาได้ดังสมการที่ (3.3) และ (3.4) ตามลำดับ

$$\mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{S}_{abc} \mathbf{I}_{dc} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{E}_{dc1} = \mathbf{S}_{abc}^T \mathbf{V}_{bus,abc} \quad (3.4)$$

โดยที่

$$\mathbf{I}_{in,abc} = \begin{bmatrix} I_{in,a} \\ I_{in,b} \\ I_{in,c} \end{bmatrix} \text{ และ } \mathbf{V}_{bus,abc} = \begin{bmatrix} V_{bus,a} \\ V_{bus,b} \\ V_{bus,c} \end{bmatrix}$$

### 3.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีดีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิ สถานะทั่วไป

- วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์สามารถเขียนอยู่ในรูปของแกนหมุนดีคว โดยใช้สมการในการแปลงดังสมการที่ (3.5)

$$\begin{cases} \mathbf{f}_{dq} = \mathbf{K} \mathbf{f}_{abc} \\ \mathbf{f}_{abc} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{f}_{dq} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\text{โดยที่ } \mathbf{K} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \text{ และ } \theta = \omega t - \frac{\pi}{2} + \varphi_1$$

เมื่อ  $\varphi_1$  คือ มุมของแกนหมุนดีคว

จากสมการที่ (3.3) และสมการที่ (3.4) สามารถใช้วิธีการแปลงดีควของสมการที่ (3.5) จะได้ดังสมการที่ (3.6) และ สมการที่ (3.7) ตามลำดับ

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{in,abc} &= \mathbf{S}_{abc} \mathbf{I}_{dc} \\ \mathbf{K} \mathbf{I}_{in,abc} &= \mathbf{K} \mathbf{S}_{abc} \mathbf{I}_{dc} \\ \mathbf{I}_{in,dq} &= \mathbf{S}_{dq} \mathbf{I}_{dc} \end{aligned} \quad (3.6)$$

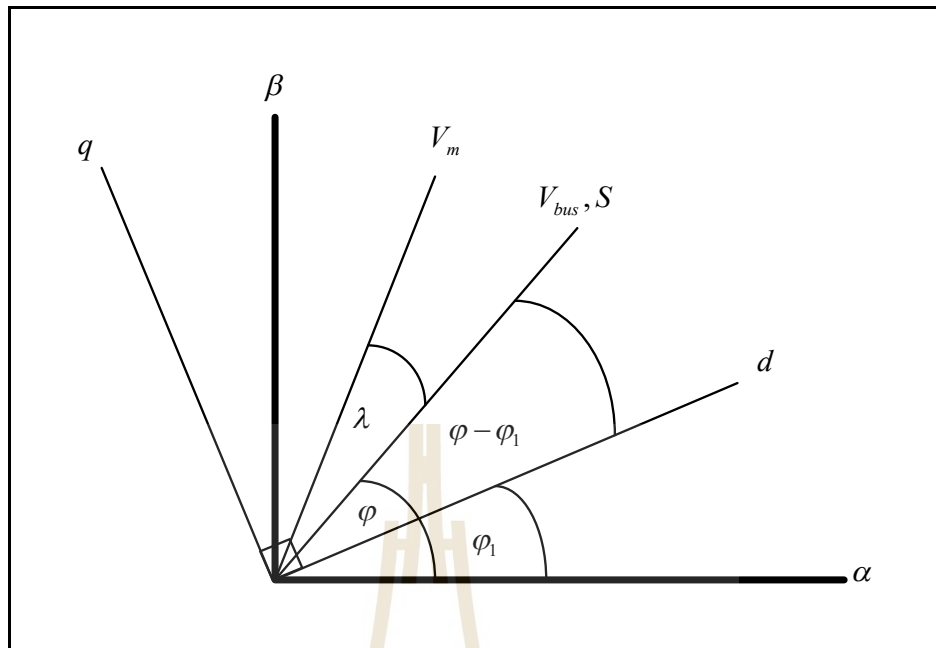


$$\begin{aligned}
E_{dc1} &= \mathbf{S}_{abc}^T \mathbf{V}_{bus,abc} \\
E_{dc1} &= [\mathbf{K}^{-1} \mathbf{S}_{dq}]^T [\mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}_{bus,dq}] \\
E_{dc1} &= \mathbf{S}_{dq} [\mathbf{K}^{-1}]^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}_{bus,dq} \\
E_{dc1} &= \mathbf{S}_{dq} \mathbf{V}_{bus,dq}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสในสมการที่ (3.2) สามารถแปลงให้อยู่บนแกนดีคิวได้ ดังสมการที่ (3.8)

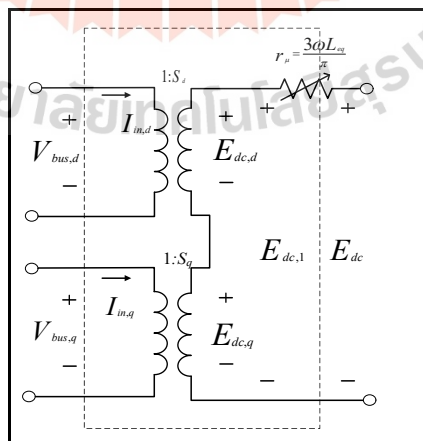
$$\begin{aligned}
\mathbf{S}_{dq} &= \mathbf{K} \mathbf{S}_{abc} \\
\mathbf{S}_{dq} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) \end{bmatrix} \\
\mathbf{S}_{dq} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} [\cos(\varphi_1 - \varphi) - \sin(\varphi_1 - \varphi)]
\end{aligned} \tag{3.8}$$

แผนภาพแสดงเวกเตอร์การแปลงดีคิว แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยที่  $V_s$  คือ ค่ายอดแรงดันเฟสของแหล่งจ่าย  $I_{in}$  คือค่ายอดกระแส  $V_{bus}$  คือ ค่ายอดของบัสแรงดันเอซี และ  $S$  คือ ค่ายอดของสัญญาณการสวิตช์มีค่าเท่ากับ  $2\sqrt{3}/\pi$



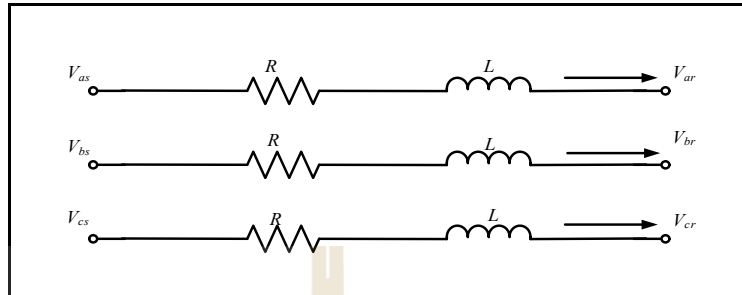
รูปที่ 3.4 แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว

จากสมการที่ (3.6)-(3.8) แสดงให้เห็นว่าวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ถูกแทนให้อยู่ในรูปหม้อแปลงไฟฟ้า บนแกนดี และแกนคิว อัตราส่วนหม้อแปลงสำหรับ  $S_d$  และ  $S_q$  ขึ้นอยู่กับมุมของการหมุนแกนดีคิว ( $\varphi$ ) และมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าบัสเอซี ( $\varphi$ ) ดังนั้นผลของการแปลงวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์จะทำให้ได้วงจรสมมูลบนแกนดีคิวดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลเรียงกระแสสามเฟสในรูปแกนหมุนดีคิว

จากรูปที่ 3.1 สามารถแสดงวงจรถนุกรมของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า และพิจารณาแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำในรูปที่ 3.6 ดังสมการที่ (3.9)



รูปที่ 3.6 ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส

$$\Delta V_{drop,abc} = R I_{abc} + L \frac{d}{dt} I_{abc} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ (3.9) สามารถแปลงให้อยู่บนแกนหมุนดีคว ด้วยการสร้างในสมการที่ (3.10)

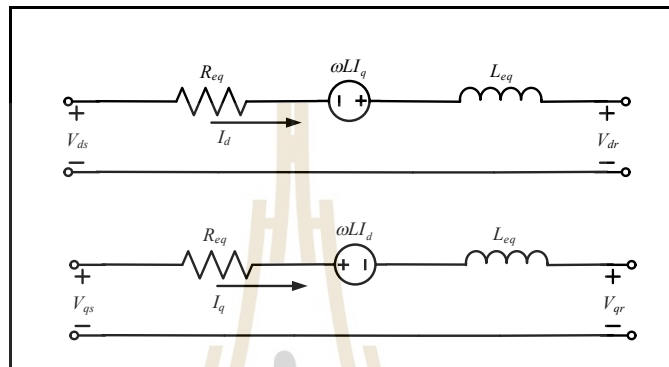
$$\begin{aligned} \mathbf{K}^{-1} \Delta V_{dq0} &= R (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq0}) + L \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq0}) \\ \mathbf{K} \mathbf{K}^{-1} \Delta V_{dq0} &= R (\mathbf{K} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq0}) + L \mathbf{K} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq0}) \\ \Delta V_{dq0} &= R \mathbf{I}_{dq0} + L \mathbf{K} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq0}) \\ \Delta V_{dq0} &= R \mathbf{I}_{dq0} + L \mathbf{K} \left( \frac{d}{dt} \mathbf{K}^{-1} \right) \mathbf{I}_{dq0} + L \left( \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{dq0} \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

ดังนั้น จะได้สมการที่อยู่บนแกนหมุนดีคว แสดงได้ดังสมการที่ (3.11)

$$\begin{cases} \Delta V_d = R I_d - \omega L I_q + L \left( \frac{d}{dt} I_d \right) \\ \Delta V_q = R I_q + \omega L I_d + L \left( \frac{d}{dt} I_q \right) \end{cases} \quad (3.11)$$

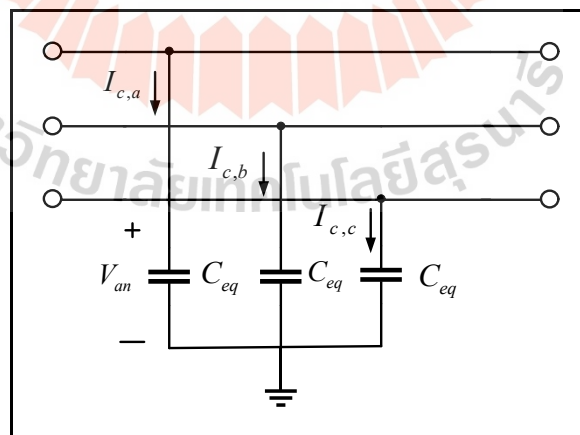
เมื่อ 
$$\mathbf{K} \left( \frac{d}{dt} \mathbf{K}^{-1} \right) = \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3.11) สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลบนแกนดีคิวได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกนดีคิว

สำหรับวงจรตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับสายส่งกำลังไฟฟ้า สามารถพิจารณาสมการกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในรูปที่ 3.8 ได้ดังสมการที่ (3.12)



รูปที่ 3.8 ตัวเก็บประจุของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า

$$\mathbf{I}_{c,abc} = C \frac{d}{dt} \mathbf{V}_{abc} \tag{3.12}$$

จากสมการที่ (3.12) สามารถแปลงให้อยู่บนแกนหมุนดีคิว ด้วยการสร้างในสมการที่ (3.13)

$$\begin{aligned}
 K^{-1}I_{c,dq0} &= C \frac{d}{dt} (K^{-1}V_{dq0}) \\
 KK^{-1}I_{c,dq0} &= CK \frac{d}{dt} (K^{-1}V_{dq0}) \\
 I_{c,dq0} &= K \left( \frac{d}{dt} K^{-1}V_{dq0} \right) + C \frac{d}{dt} (V_{dq0})
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

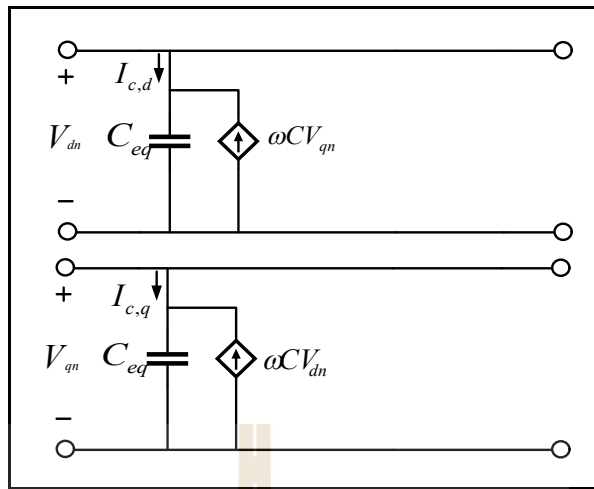
ดังนั้น จะได้สมการที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว แสดงได้ดังสมการที่ (3.14)

$$\begin{cases}
 I_{cd} = -\omega CV_q + C \left( \frac{d}{dt} V_d \right) \\
 I_{cq} = \omega CV_d + C \left( \frac{d}{dt} V_q \right)
 \end{cases} \tag{3.14}$$

เมื่อ

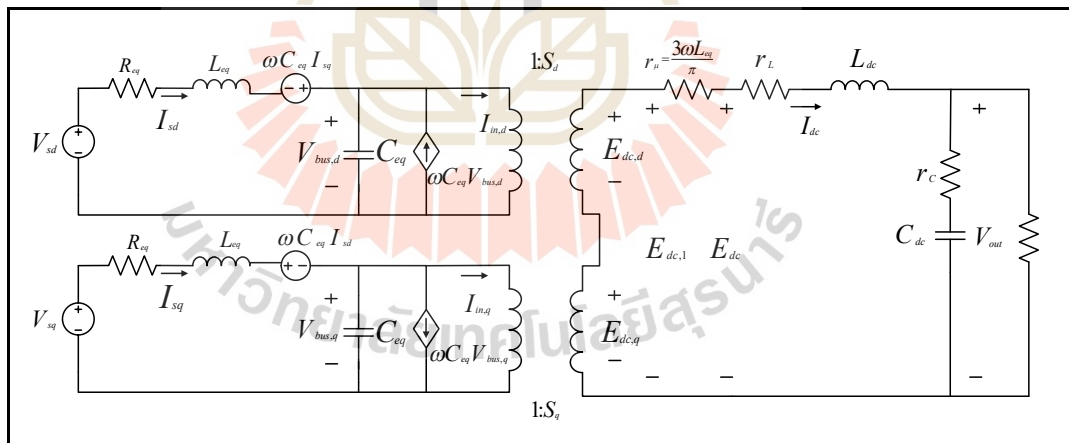
$$K \left( \frac{d}{dt} K^{-1} \right) = \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3.14) สามารถเขียนเป็นวงจรมุมลบนแกนดีคิวได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกนตีคว

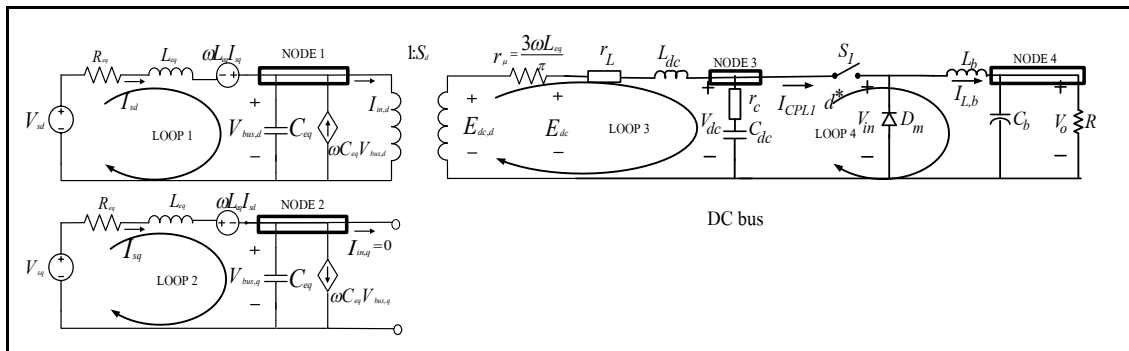
จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูป 3.1 เมื่อทำการแปลงระบบให้อยู่บนแกนตีควโดยอาศัยสมการที่ (3.5) และวงจรสมมูลจากรูปที่ 3.7 และ 3.9 สามารถเขียนวงจรสมมูลแกนตีคว แสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนตีคว

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.10 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ โดยการกำหนดมุมเฟสการหมุนของสัญญาณสวิตช์ ( $\phi_1 = \phi$ ) ซึ่งจะพบว่า  $I_{in,dq} = 0$  และหม้อแปลงไฟฟ้าฝั่งแกนตีควถูกกำจัดซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงได้ดังรูปที่ 3.11





รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถวิเคราะห์ได้โดยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) กับวงจรสมมูลรูปที่ 3.11 โดยกำหนดตัวแปรสถานะ, อินพุต และเอาต์พุตดังสมการที่ (3.15)

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{cases} \quad (3.15)$$

ตัวแปรสถานะ :  $[I_{sd}, I_{sq}, V_{bus,d}, V_{bus,q}, I_{dc}, V_{dc}, I_{L,b}, V_o]$

อินพุต  $u = [V_m]$

เอาต์พุต :  $y = [I_{dc}, V_{dc}, I_{L,b}, V_o]$

รายละเอียดการสร้างสมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.11 แสดงในสมการที่ (3.16) – (3.27)

-พิจารณา LOOP 1 ด้วย KVL สามารถแสดงขั้นตอนการหาตัวแปรสถานะ  $\dot{I}_{sd}$  ดังสมการที่ (3.16)

$$\begin{aligned} R_{eq} I_{sd} + L_{eq} \dot{I}_{sd} - \omega L_{eq} I_{sq} + V_{bus,d} - V_{sd} &= 0 \\ \dot{I}_{sd} &= -\frac{R_{eq} I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \left( \frac{1}{L_{eq}} \right) \left( \sqrt{\frac{3}{2}} \right) V_m \cos(\lambda) \end{aligned} \quad (3.16)$$

- พิจารณา LOOP 2 ด้วย KVL สามารถแสดงขั้นตอนการหาตัวแปรสถานะ  $\dot{I}_{sq}$  ดังสมการที่ (3.17)

$$\begin{aligned} R_{eq}I_{sq} + L_{eq}\dot{I}_{sq} + \omega L_{eq}I_{sd} + V_{bus,q} - V_{sq} &= 0 \\ \dot{I}_{sq} &= -\frac{R_{eq}I_{sq}}{L_{eq}} - \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}}\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)V_m \sin(\lambda) \end{aligned} \quad (3.17)$$

- พิจารณา NODE 1 ด้วย KCL สามารถแสดงขั้นตอนการหาตัวแปรสถานะ  $\dot{V}_{bus,d}$  ดังสมการสมการที่ (3.18)

$$\begin{aligned} I_{sd} - C_{eq}\dot{V}_{bus,d} + \omega C_{eq}V_{bus,q} - I_{in,d} &= 0 \\ \dot{V}_{bus,d} &= \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right)\left(\frac{I_{dc}}{C_{eq}}\right) \end{aligned} \quad (3.18)$$

- พิจารณา NODE 2 ด้วย KCL สามารถแสดงขั้นตอนการหาตัวแปรสถานะ  $\dot{V}_{bus,q}$  ดังสมการที่ (3.19)

$$\begin{aligned} I_{sq} - C_{eq}\dot{V}_{bus,q} - \omega C_{eq}V_{bus,d} &= 0 \\ \dot{V}_{bus,q} &= \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \end{aligned} \quad (3.19)$$

- พิจารณา LOOP 3 ด้วย KVL โหมตนำกระแสของสวิตช์ สามารถแสดงขั้นตอนการหาตัวแปรสถานะ  $\dot{I}_{dc}$  ดังสมการที่ (3.20)

$$\begin{aligned} -E_{dc1} + I_{dc}(r_\mu + r_L) + L_{dc}\dot{I}_{dc} + (I_{dc} - I_{L,b})r_c + V_{dc} &= 0 \\ \dot{I}_{dc} &= \left(\frac{1}{L_{dc}}\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right)V_{bus,d} - \frac{I_{dc}(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}} + \frac{r_c I_{L,b}}{L_{dc}} \end{aligned} \quad (3.20)$$

- พิจารณา LOOP 3 ด้วย KVL โหมตหยุดนำกระแสของสวิตช์ สามารถแสดงขั้นตอนการหาตัวแปรสถานะ  $\dot{I}_{dc}$  ดังสมการที่ (3.21)

$$\begin{aligned}
 -E_{dc1} + I_{dc}(r_\mu + r_L) + L_{dc} \dot{I}_{dc} + I_{dc}r_c + V_{dc} &= 0 \\
 \dot{I}_{dc} &= \left(\frac{1}{L_{dc}}\right) \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right) V_{bus,d} - \frac{I_{dc}(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}}
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

- จะได้ฟังก์ชันการสวิตช์สำหรับ LOOP 3 ดังสมการที่ (3.22)

$$\dot{I}_{dc} = \left(\frac{1}{L_{dc}}\right) \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right) V_{bus,d} - \frac{I_{dc}(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}} + \frac{r_c I_{L,b} u(t)}{L_{dc}} \tag{3.22}$$

- พิจารณา NODE 3 ด้วย KCL โหมดยอดนำกระแสของสวิตช์ สามารถแสดงขั้นตอนการหาตัวแปรสถานะ  $\dot{V}_{dc}$  ดังสมการที่ (3.23)

$$\begin{aligned}
 I_{dc} - C_{dc} \dot{V}_{dc} - I_{L,b} &= 0 \\
 \dot{V}_{dc} &= \frac{I_{dc}}{C_{dc}} - \frac{I_{L,b}}{C_{dc}}
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

- พิจารณา NODE 3 ด้วย KCL โหมดยอดนำกระแสของสวิตช์ สามารถแสดงขั้นตอนการหาตัวแปรสถานะ  $\dot{V}_{dc}$  ดังสมการที่ (3.24)

$$\begin{aligned}
 I_{dc} - C_{dc} \dot{V}_{dc} &= 0 \\
 \dot{V}_{dc} &= \frac{I_{dc}}{C_{dc}}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

- จะได้ฟังก์ชันการสวิตช์สำหรับ NODE 3 ดังสมการที่ (3.25)

$$\dot{V}_{dc} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} - \frac{I_{L,b} u(t)}{C_{dc}} \tag{3.25}$$

- พิจารณา LOOP 4 ด้วย KVL สามารถแสดงขั้นตอนการหาตัวแปรสถานะ  $\dot{I}_{L,b}$  ดังสมการที่ (3.26)

$$\begin{aligned}
 -V_{dc}u(t) + V_o + L_b \dot{I}_{L,b} &= 0 \\
 \dot{I}_{L,b} &= \frac{V_{dc}u(t)}{L_b} - \frac{V_o}{L_b}
 \end{aligned}
 \tag{3.26}$$

- พิจารณา NODE 4 ด้วย KCL สามารถแสดงขั้นตอนการหาตัวแปรสถานะ  $\dot{V}_o$  ดังสมการที่ (3.27)

$$\begin{aligned}
 I_{L,b} - I_{c,b} - I_o &= 0 \\
 \dot{V}_o &= \frac{I_{L,b}}{C_b} - \frac{V_o}{RC_b}
 \end{aligned}
 \tag{3.27}$$

จากสมการที่ (3.16)-(3.27) จะเห็นว่าสมการดังกล่าวยังเป็นสมการที่แปรผันตามเวลาอันเนื่องมาจากผลการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์จะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการกำจัดสัญญาณสวิตช์เพื่อทำแบบจำลองที่แปรผันตามเวลา ไปเป็นแบบจำลองที่ไม่แปรผันตามเวลา โดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนของตัวแปรสถานะของวงจร (Complex fourier series) ไปเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง โดยรายละเอียดของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนแสดงดังสมการที่ (3.28)-(3.32)

โดยทั่วไป สัญญาณ  $f(t)$  ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ  $T$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน ดังสมการที่ (3.28)

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k e^{jk\omega t}
 \tag{3.28}$$

โดยที่  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  และ  $\langle x \rangle_k(t)$  คือ สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.29)

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega t} dt
 \tag{3.29}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อน สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 3.11 มีคุณสมบัติที่จำเป็นดังสมการที่ (3.30)-(3.32)

- คุณสมบัติของอัตราค่าการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$\frac{d}{dt}\langle x \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega \langle x \rangle_k \quad (3.30)$$

- คุณสมบัติของความสัมพันธ์การคูณ

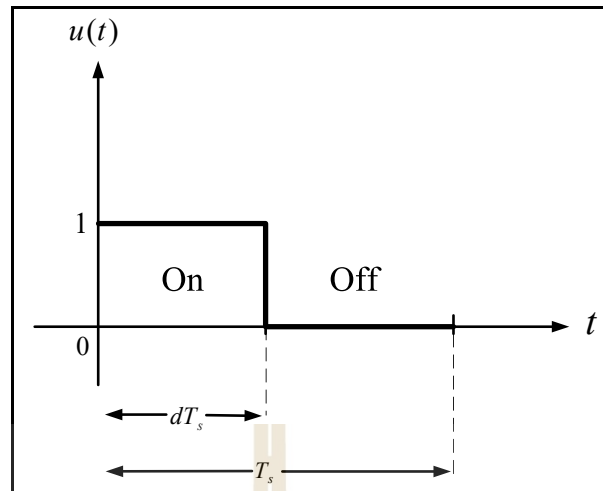
$$\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle y \rangle_i \quad (3.31)$$

- ถ้า  $f_i$  คือจำนวนจริง จะได้

$$\langle x \rangle_{-k} = \overline{\langle x \rangle_k} = \langle x \rangle_k^* \quad (3.32)$$

สมการที่ (3.28) และ (3.29) ค่า  $k$  เป็นตัวบอกความแม่นยำของการใช้ อนุกรมฟูรีเยร์ ถ้า ค่า  $k$  มีค่าเป็นอนันต์ ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการประมาณจะมีค่าเท่ากับ 0 และถ้าไม่มีสัญญาณปรากฏการสั้นไกว จะให้  $k = 0$  เรียกวิธีการนี้ว่าการประมาณอันดับศูนย์ หรือถ้าสัญญาณมีการสั้นไกว สามารถกำหนดให้  $k$  มีค่าเป็น 1,-1 ซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่าการประมาณอันดับหนึ่ง (A.Emadi,2004)

การสร้างแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบัพักด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สัญญาณการสวิตซ์ของวงจรแปลงผันแบบบัพักภายใต้เงื่อนไขโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลัง

จากรูปที่ 3.12 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันที่ขึ้นกับเวลา ให้อยู่ในรูปของค่าคงที่ได้ดังสมการที่ (3.33) ดังนี้

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT \\ 0, & dT < t < T \end{cases} \quad (3.33)$$

โดยที่  $d$  คือ วัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของอุปกรณ์สวิตช์  $S_1$  ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 1 หรือ 0 – 100 เปอร์เซ็นต์

การกำจัดผลการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัพคัก เพื่อทำให้เป็นแบบจำลองที่ไม่แปรผันตามเวลา ซึ่งตัวแปรสถานะของแบบจำลองในสมการที่ (3.16) - (3.27) สามารถเขียนเป็นสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $I_{sd}$ ,  $I_{sq}$ ,  $V_{bus,d}$ ,  $V_{bus,q}$ ,  $I_{dc}$ ,  $V_{dc}$ ,  $I_L$  และ  $V_o$  โดยเลือกใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์หรือไม่คิดผลของการสั้นไกวของสัญญาณ ซึ่งสามารถกำหนดตัวแปรสถานะทั้ง 8 ตัวแปรดังสมการที่ (3.34)



$$\begin{cases}
 \langle I_{sd} \rangle_0 = I_{sd} \\
 \langle I_{sq} \rangle_0 = I_{sq} \\
 \langle V_{bus,d} \rangle_0 = V_{bus,d} \\
 \langle V_{bus,q} \rangle_0 = V_{bus,q} \\
 \langle I_{dc} \rangle_0 = I_{dc} \\
 \langle V_{dc} \rangle_0 = V_{dc} \\
 \langle I_{L,b} \rangle_0 = I_{L,b} \\
 \langle V_o \rangle_0 = V_o
 \end{cases} \quad (3.34)$$

การประมาณค่าอันดับศูนย์ของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบ็คกิ้งในสมการที่ (3.33) พิสูจน์ได้ดังสมการที่ (3.35)

$$\begin{aligned}
 \langle x \rangle_k(t) &= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega t} dt \\
 \langle u \rangle_0 &= \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} i e^0 dt \\
 \langle u \rangle_0 &= \frac{1}{T_s} t \Big|_{t=0}^{t=dT_s} \\
 \langle u \rangle_0 &= \frac{1}{T_s} dT_s
 \end{aligned} \quad (3.35)$$

จะได้สัมประสิทธิ์การประมาณค่าอันดับศูนย์ของสัญญาณการสวิตช์ดังสมการ (3.36)

$$\langle u \rangle_0 = d \quad (3.36)$$

โดยที่  $d$  คือ วัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบ็คกิ้ง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะเลือกใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์เพื่อให้ได้ตัวแปรสถานะดังสมการที่ (3.34) และพิจารณาคุณสมบัติการหาสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนดังสมการที่ (3.30)-(3.32) ร่วมกับการหาสมการเชิงอนุพันธ์สมการที่ (3.16) - (3.27) จะได้แบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลังรูปที่ 3.11 ซึ่งมีรายละเอียดการสร้างดังสมการ (3.37) - (3.44)

$$\begin{cases} \left\langle \dot{I}_{sd} \right\rangle_0 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} \langle I_{sd} \rangle_0 + \omega \langle I_{sq} \rangle_0 - \frac{1}{L_{eq}} \langle V_{bus,d} \rangle_0 + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \end{cases} \quad (3.37)$$

$$\begin{cases} \left\langle \dot{I}_{sq} \right\rangle_0 = -\omega \langle I_{sd} \rangle_0 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} \langle I_{sq} \rangle_0 - \frac{1}{L_{eq}} \langle V_{bus,q} \rangle_0 + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \end{cases} \quad (3.38)$$

$$\begin{cases} \left\langle \dot{V}_{bus,d} \right\rangle_0 = \frac{1}{C_{eq}} \langle I_{sd} \rangle_0 + \omega \langle V_{bus,q} \rangle_0 - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} \langle I_{dc} \rangle_0 \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \end{cases} \quad (3.39)$$

$$\begin{cases} \left\langle \dot{V}_{bus,q} \right\rangle_0 = -\omega \langle V_{bus,d} \rangle_0 + \frac{1}{C_{eq}} \langle I_{sq} \rangle_0 \\ \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} \end{cases} \quad (3.40)$$

$$\begin{cases} \left\langle \dot{I}_{dc} \right\rangle_0 = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \langle V_{bus,d} \rangle_0 - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} \langle I_{dc} \rangle_0 - \frac{1}{L_{dc}} \langle V_{dc} \rangle_0 + \frac{r_c \langle u(t) \rangle_0}{L_{dc}} \langle I_{L,\phi} \rangle_0 \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_c d}{L_{dc}} I_{L,b} \end{cases} \quad (3.41)$$

$$\begin{cases} \left\langle \dot{V}_{dc} \right\rangle_0 = \frac{1}{C_{dc}} \langle I_{dc} \rangle_0 - \frac{\langle u(t) \rangle_0}{C_{dc}} \langle I_{L,b} \rangle_0 \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{d}{C_{dc}} I_{L,b} \end{cases} \quad (3.42)$$

$$\begin{cases} \left\langle \dot{I}_{L,b} \right\rangle_0 = \frac{\langle u(t) \rangle_0}{L_b} \langle V_{dc} \rangle_0 - \frac{1}{L_b} \langle V_o \rangle_0 \\ \dot{I}_{L,b} = \frac{d}{L_b} V_{dc} - \frac{1}{L_b} V_o \end{cases} \quad (3.43)$$

$$\begin{cases} \left\langle \dot{V}_o \right\rangle_0 = \frac{1}{C_b} \langle I_{L,b} \rangle_0 - \frac{1}{RC_b} \langle V_o \rangle_0 \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C_b} I_{L,b} - \frac{1}{RC_b} V_o \end{cases} \quad (3.44)$$

จากสมการ (3.37) – (3.44) ที่พิสูจน์ได้มีความเป็นเชิงเส้น และไม่แปรผันตามเวลา สามารถเรียบเรียงให้อยู่ในรูปแบบสมการปริภูมิสถานะได้ดังสมการที่ (3.45)

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (3.45)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} x &= [I_{sd}, I_{sq}, V_{bus,d}, V_{bus,q}, I_{dc}, V_{dc}, I_{L,b}, V_o, X_v, X_i]^T \\ u &= [V_m] \\ y &= [I_{dc}, V_{dc}, I_{L,b}, V_o]^T \end{aligned} \quad (3.45)$$

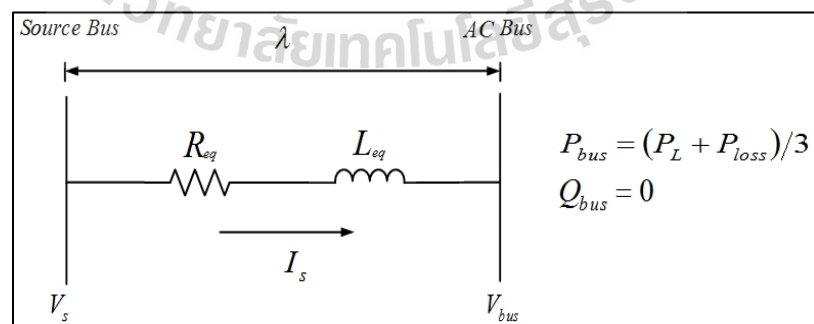
- รายละเอียดของเมตริกซ์ A, B, C และ D แสดงดังสมการที่ (3.46)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \frac{\sqrt{3} \ 2\sqrt{3}}{2 \ \pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3} \ 2\sqrt{3}}{2 \ \pi L_{dc}} & 0 & \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} & \frac{1}{L_{dc}} & \frac{r_c d}{L_{dc}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & \frac{d}{C_{dc}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d}{L_b} & 0 & -\frac{1}{L_b} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_b} & -\frac{1}{RC} & 0 \end{bmatrix}_{8 \times 8}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(\lambda) \\ \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\lambda) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{8 \times 1} \\
 \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 8} \\
 \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{4 \times 1}
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

### 3.2.3 การหาค่าในสภาวะคงตัว

จากสมการที่ (3.46) พบว่ามีพารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่าคือ  $\lambda$  หรือเรียกว่าค่าความต่างเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสเอซี ซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัว โดยพิจารณาให้เป็นสายส่งหนึ่งเฟสเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ และไม่พิจารณาค่าความจุไฟฟ้าของสายส่งเนื่องจากมีค่าน้อยมาก ดังนั้นระบบที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 3.13 สามารถพิสูจน์หาสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 S &= VI^* = P_{bus} + jQ_{bus} \\
 P_{bus} + jQ_{bus} &= V_{bus} I_{bus}^* \\
 P_{bus} + jQ_{bus} &= V_{bus} \angle 0 \left( \frac{V_s \angle \lambda - V_{bus} \angle 0}{Z \angle \gamma} \right)^* \\
 P_{bus} + jQ_{bus} &= V_{bus} \angle 0 \left( \frac{V_s \angle (\lambda - \gamma) - V_{bus} \angle (0 - \gamma)}{Z} \right)^* \\
 P_{bus} + jQ_{bus} &= V_{bus} \angle 0 \left( \frac{V_s \angle (\gamma - \lambda) - V_{bus} \angle (\gamma)}{Z} \right) \\
 P_{bus} + jQ_{bus} &= \frac{V_{bus} V_s \angle (\gamma - \lambda) - V_{bus}^2 \angle (\gamma)}{Z} \\
 P_{bus} + jQ_{bus} &= \left[ \frac{V_{bus} V_s \cos(\gamma - \lambda) - V_{bus}^2 \cos(\gamma)}{Z} \right] + j \left[ \frac{V_{bus} V_s \sin(\gamma - \lambda) - V_{bus}^2 \sin(\gamma)}{Z} \right]
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้างดสมการ (3.47)

$$\begin{aligned}
 P_{bus} &= \frac{V_{bus} V_s \cos(\gamma - \lambda) - V_{bus}^2 \cos(\gamma)}{Z} \\
 Q_{bus} &= \frac{V_{bus} V_s \sin(\gamma - \lambda) - V_{bus}^2 \sin(\gamma)}{Z}
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

เมื่อ  $V_{bus}$  คือ แรงดันเฟส (rms) ที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC bus) หรือแรงดันอินพุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส  $\lambda$  คือ มุมเฟสการเลื่อนระหว่าง  $V_s$  กับ  $V_{bus}$  และ  $Z \angle \gamma$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยที่กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าปรากฏต่อเฟสที่พิจารณาที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.48)

$$\begin{aligned}
 P_{bus} &= \frac{1}{3} \left( \frac{V_{out}^2}{R} + P_{loss} \right) \\
 Q_{bus} &= 0
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

โดยที่

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

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

$$V_{dc} = E_{dc1} - (r_\mu + r_L)I_{dc}$$

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

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

$$V_o = dV_{dc}$$

เมื่อ  $V_{bus}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรเรียงกระแส และ  $E_{dc1}$  คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส  $V_o$  คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทาน  $R$  และ  $P_{loss}$  คือ กำลังสูญเสียเนื่องจาก  $r_L$  และ  $r_\mu$  โดยที่  $Q_{bus}$  ถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากการสมมติฐานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสพิจารณากระแสอินพุต  $I_{in,abc}$  ที่มีเฟสเดียวกับแรงดันอินพุต  $V_{bus,abc}$  ซึ่งจะสามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการ (3.49)

$$\frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma - \lambda) = \frac{1}{3R} \left[ \frac{3\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{bus})d}{\pi} - (r_\mu + r_L)I_{dc}d \right]^2 + \frac{1}{3R} [I_{dc}^2 (r_\mu + r_L)] \quad (3.49)$$

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

จากสมการที่ (3.49) สามารถคำนวณหาผลเฉลยได้โดยวิธีการเชิงตัวเลข วิธีนิวตัน-ราฟสัน ดังภาคผนวกที่ ก.1 ซึ่งทำให้ได้ค่า  $\lambda$  เพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 3.2.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ในสมการที่ (3.44) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับจำลอง

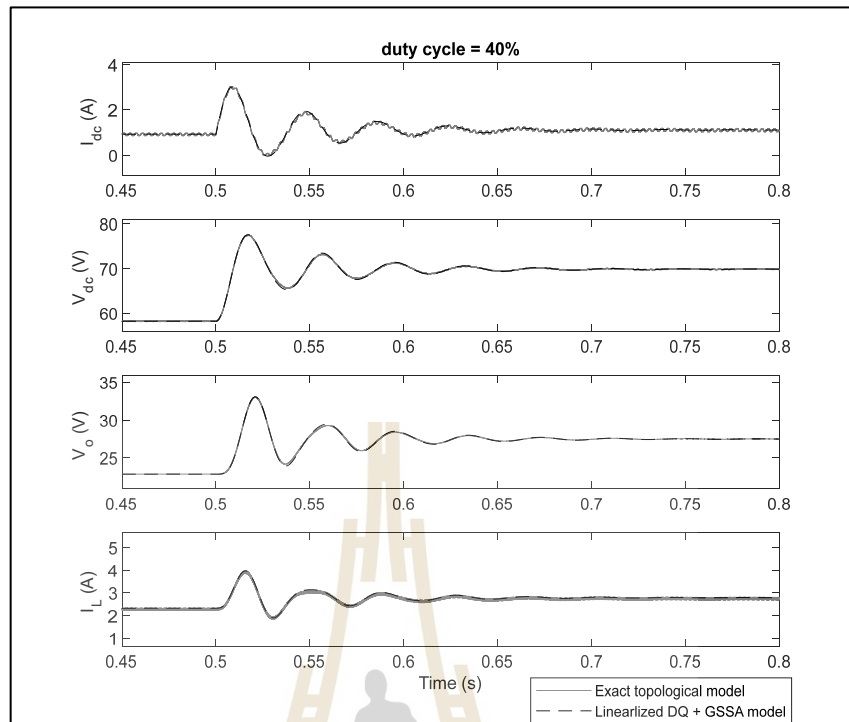


สถานการณ์ของระบบในรูปที่ 3.1 ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถดูได้ในภาคผนวกที่ ข.1 และมีพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ดังตารางที่ 3.1

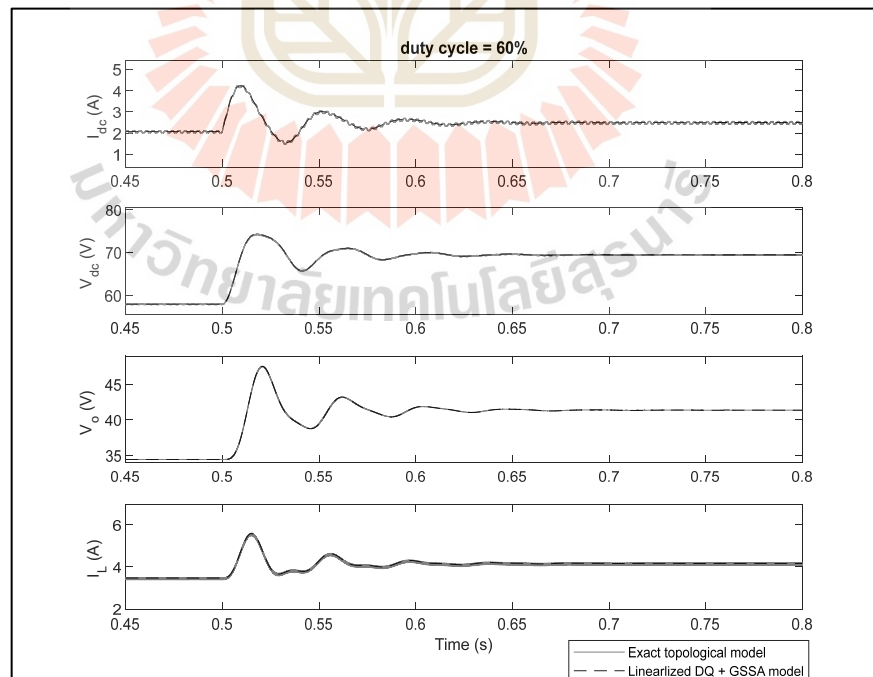
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_s$	50 $V_{rms}$ /phase	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
$\omega$	$2\pi \times 50$ rad/sec.	ความถี่ของระบบ
$R_{eq}$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานภายในสายส่ง
$L_{eq}$	0.24 mH	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
$C_{eq}$	2 nF	ความเก็บประจุไฟฟ้าของสายส่ง
$r_L$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$r_c$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
$L_{dc}$	30 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$C_{dc}$	1000 $\mu F$	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$L$	15 mH	ความเหนี่ยวนำของโพลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์
$C$	1000 $\mu F$	ความจุไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์
$R$	10 $\Omega$	ความต้านทานของโพลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์

การจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 3.14 และ 3.15 แสดงผลตอบสนองของ  $I_{dc}$ ,  $V_{dc}$ ,  $I_L$  และ  $V_o$  สำหรับการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการสร้างด้วยวิธีตีควและค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในสมการที่ (3.45) และรูปสัญญาณของระบบไฟฟ้ารูปที่ 3.1 ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยผลการตรวจสอบความถูกต้องจะทำการเปลี่ยนค่าของแรงดันอินพุตจาก 25  $V_{rms}$  ไปเป็น 30  $V_{rms}$  ที่เวลา 1 วินาที ซึ่งในรูปที่ 3.14 ปรับค่า  $d = 40\%$  และรูปที่ 3.15 ปรับค่า  $d = 60\%$  โดยที่  $d$  คือวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์



จากรูปที่ 3.14 ผลตอบสนองของ  $I_{dc}$ ,  $V_{dc}$ ,  $I_L$  และ  $V_o$  ที่ Duty cycle = 40%



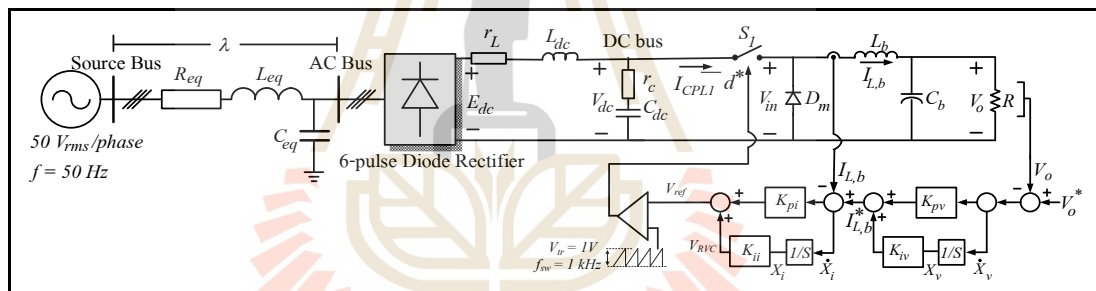
จากรูปที่ 3.15 ผลตอบสนองของ  $I_{dc}$ ,  $V_{dc}$ ,  $I_L$  และ  $V_o$  ที่ Duty cycle = 60%

จากผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณสำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 3.14 และ 3.15 พบว่า ผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น มีผลการตอบสนองที่สอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วครู่และสถานะคงตัว ดังนั้น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีดีคิวิร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 นั้นมีความถูกต้อง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่มีการควบคุม ซึ่งจะได้รับการนำเสนอถัดไปในหัวข้อที่ 3.3

### 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่มีการควบคุม

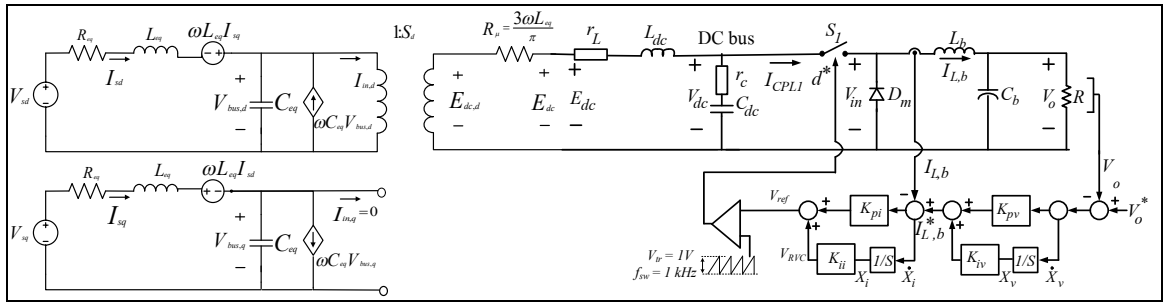
#### 3.3.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น วงจรกรองที่มีตัวเก็บประจุ ขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่มีการควบคุมแบบพีโอเรียงต่อกัน แสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุม

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.16 พิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์สามารถแปลงวงจรให้อยู่บนแกนดีคิวิ ตามขั้นตอนการสร้างด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 3.2 โดยกำหนดให้มุมเฟสการหมุนของสัญญาณการสวิตช์ ( $\varphi_1 = \varphi$ ) จะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากวงจรแปลงผันแบบบัสคัทที่มีการควบคุมดังรูปที่ 3.17 เป็นตัวควบคุมแบบพีไอเรียงต่อกัน โดยแบ่งเป็น 2 ลูปคือ ลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นลูปภายนอก และลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นลูปภายใน โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมประกอบด้วย  $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ,  $K_{pi}$  และ  $K_{ii}$  ตามลำดับ จากนั้นสัญญาณควบคุมที่ออกมาจากตัวควบคุมพีไอ (Control signal) แทนด้วยตัวแปร  $V_{ref}$  โดยสัญญาณควบคุมดังกล่าวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (Sawtooth compare signal) เพื่อสร้างสัญญาณวัฏจักรหน้าที่โดยอาศัยเทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) สำหรับการวิเคราะห์ระบบควบคุมในระบบไฟฟ้างานรูปที่ 3.17 สามารถเขียนสมการของตัวควบคุมพีไอในรูปของ  $d^*$  ดังสมการที่ (3.50)

$$d^* = \frac{K_{pi} K_{pv} V_o^* - K_{pi} K_{pv} V_o + K_{pi} K_{iv} X_v - K_{pi} I_{L,b} + X_i K_{ii}}{V_{tr}} \tag{3.50}$$

เมื่อ  $v_{tr}$  คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม

เมื่อพิจารณาตัวควบคุมแบบพีไอ พบว่า  $X_v$  ของลูปแรงดัน และ  $X_i$  ของลูปกระแส จะกำหนดให้เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการดำเนินการแทนค่า  $d$  ในสมการที่ (3.41)-(3.43) ด้วย  $d^*$  จากสมการที่ (3.50) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 3.17 ที่ได้รับการสร้างด้วยวิธีคีวีร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยสถานะทั่วไป ดังสมการที่ (3.51)

$$\begin{cases}
\dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}}\right)\left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right)V_m \cos(\lambda) \\
\dot{I}_{sq} = -\frac{R_{eq}I_{sq}}{L_{eq}} - \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}}\right)\left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right)V_m \sin(\lambda) \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right)\left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right)\left(\frac{I_{dc}}{C_{eq}}\right) \\
\dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\
\dot{I}_{dc} = \left(\frac{1}{L_{dc}}\right)\left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right)\left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right)V_{bus,d} - \frac{I_{dc}(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}} - \frac{K_{pi}r_c I_{L,b}^2}{V_r L_{dc}} \\
- \frac{K_{pv}K_{pi}r_c I_{L,b}V_o}{V_r L_{dc}} + \frac{K_{iv}K_{pi}r_c I_{L,b}X_v}{V_r L_{dc}} + \frac{K_{ii}r_c I_{L,b}X_i}{V_r L_{dc}} + \frac{K_{pv}K_{pi}r_c I_{L,b}V_o^*}{V_r L_{dc}} \\
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}}I_{dc} + \frac{K_{pi}I_{L,b}^2}{V_r C_{dc}} + \frac{K_{pv}K_{pi}I_{L,b}V_o}{V_r C_{dc}} - \frac{K_{iv}K_{pi}I_{L,b}X_v}{V_r C_{dc}} - \frac{K_{ii}I_{L,b}X_i}{V_r C_{dc}} - \frac{K_{pv}K_{pi}I_{L,b}V_o^*}{V_r C_{dc}} \\
\dot{I}_{L,b} = -\frac{K_{pi}V_{dc}I_{L,b}}{V_r L_b} - \frac{K_{pv}K_{pi}V_{dc}V_o}{V_r L_b} + \frac{K_{iv}K_{pi}V_{dc}X_v}{V_r L_b} + \frac{K_{ii}V_{dc}X_i}{V_r L_b} + \frac{K_{pv}K_{pi}V_{dc}V_o^*}{V_r L_b} - \frac{V_o}{L_b} \\
\dot{V}_o = \frac{I_{L,b}}{C_b} - \frac{V_o}{RC_b} \\
\dot{X}_v = V_o^* - V_o \\
\dot{X}_i = -I_{L,b} - K_{pv}V_o + K_{iv}X_v + K_{pi}V_o^*
\end{cases} \quad (3.51)$$

### 3.3.2 การทำให้เป็นเชิงเส้น

จากสมการที่ (3.51) เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง จะได้สมการที่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ (3.52) โดยค่าต่างๆในเมตริกซ์  $A$ ,  $B$ ,  $C$  และ  $D$  ขึ้นอยู่กับจุดการทำงานของระบบ โดยเรียกสมการนี้ว่าแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง (Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M. and Thomas, D.W.P. 2008.)

$$\begin{cases}
\delta \dot{x} = A(x_0, u_0)\delta x + B(x_0, u_0)\delta u \\
\delta y = C(x_0, u_0)\delta x + D(x_0, u_0)\delta u
\end{cases} \quad (3.52)$$

เมื่อ

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

รายละเอียดของเมตริกซ์  $A(x_0, u_0)$ ,  $B(x_0, u_0)$ ,  $C(x_0, u_0)$  และ  $D(x_0, u_0)$  แสดงดังสมการที่ (3.53)

$$A(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta V_{dc}} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta I_{L,b}} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta V_o} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta X_v} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta X_i} \\ \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta V_{dc}} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta I_{L,b}} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta V_o} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta X_v} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta X_i} \\ \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta V_{dc}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta I_{L,b}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta V_o} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta X_v} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta X_i} \\ \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta V_{dc}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta I_{L,b}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta V_o} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta X_v} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta X_i} \\ \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta V_{dc}} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta I_{L,b}} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta V_o} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta X_v} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta X_i} \\ \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta V_{dc}} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta I_{L,b}} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta V_o} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta X_v} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta X_i} \\ \frac{\delta \dot{I}_{L,b}}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{I}_{L,b}}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{I}_{L,b}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{I}_{L,b}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{I}_{L,b}}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{I}_{L,b}}{\delta V_{dc}} & \frac{\delta \dot{I}_{L,b}}{\delta I_{L,b}} & \frac{\delta \dot{I}_{L,b}}{\delta V_o} & \frac{\delta \dot{I}_{L,b}}{\delta X_v} & \frac{\delta \dot{I}_{L,b}}{\delta X_i} \\ \frac{\delta \dot{V}_o}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{V}_o}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{V}_o}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{V}_o}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{V}_o}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{V}_o}{\delta V_{dc}} & \frac{\delta \dot{V}_o}{\delta I_{L,b}} & \frac{\delta \dot{V}_o}{\delta V_o} & \frac{\delta \dot{V}_o}{\delta X_v} & \frac{\delta \dot{V}_o}{\delta X_i} \\ \frac{\delta \dot{X}_v}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{X}_v}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{X}_v}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{X}_v}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{X}_v}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{X}_v}{\delta V_{dc}} & \frac{\delta \dot{X}_v}{\delta I_{L,b}} & \frac{\delta \dot{X}_v}{\delta V_o} & \frac{\delta \dot{X}_v}{\delta X_v} & \frac{\delta \dot{X}_v}{\delta X_i} \\ \frac{\delta \dot{X}_i}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{X}_i}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{X}_i}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{X}_i}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{X}_i}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{X}_i}{\delta V_{dc}} & \frac{\delta \dot{X}_i}{\delta I_{L,b}} & \frac{\delta \dot{X}_i}{\delta V_o} & \frac{\delta \dot{X}_i}{\delta X_v} & \frac{\delta \dot{X}_i}{\delta X_i} \end{bmatrix} \quad \downarrow_{10 \times 10}$$

$$A(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & \frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & \frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dk}} & 0 & \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dk}} & \frac{1}{L_{dk}} & a(5,7) & \frac{-r_c K_{pv} K_{pi} I_{lb0}}{V_r L_{dk}} & \frac{r_c K_{iv} K_{pi} I_{lb0}}{V_r L_{dk}} & \frac{r_c K_{ii} I_{lb0}}{V_r L_{dk}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & a(6,7) & \frac{K_{pv} K_{pi} I_{lb0}}{V_r C_{dc}} & \frac{K_{iv} K_{pi} I_{lb0}}{V_r C_{dc}} & \frac{K_{ii} I_{lb0}}{V_r C_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & \frac{K_{pi} V_{dk,0}}{V_r L_b} & \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dk,0} + V_r}{V_r L_b} & \frac{K_{iv} K_{pi} V_{dk,0}}{V_r L_b} & \frac{K_{ii} V_{dk,0}}{V_r L_b} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_b} & \frac{1}{RC} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$a(5,7) = \frac{-2r_c K_{pi} I_{lb0}}{V_r L_{dk}} - \frac{r_c K_{pv} K_{pi} V_{a0}}{V_r L_{dk}} + \frac{r_c K_{iv} K_{pi} X_{v0}}{V_r L_{dk}} + \frac{r_c K_{ii} X_{i0}}{V_r L_{dk}} + \frac{r_c K_{pv} K_{pi} V_{a0}^*}{V_r L_{dk}}$$

$$a(6,7) = \frac{2K_{pi} I_{lb0}}{V_r C_{dc}} - \frac{K_{pv} K_{pi} V_{a0}}{V_r C_{dc}} + \frac{K_{iv} K_{pi} X_{v0}}{V_r C_{dc}} + \frac{K_{ii} X_{i0}}{V_r C_{dc}} + \frac{K_{pv} K_{pi} V_{a0}^*}{V_r C_{dc}}$$

$$a(7,6) = \frac{-2K_{pi} I_{lb0}}{V_r L_b} - \frac{K_{pv} K_{pi} V_{a0}}{V_r L_b} + \frac{K_{iv} K_{pi} X_{v0}}{V_r L_b} + \frac{K_{ii} X_{i0}}{V_r L_b} + \frac{K_{pv} K_{pi} V_{a0}^*}{V_r L_b}$$





$$\begin{aligned}
 \mathbf{B}(x_0, u_0) &= \begin{bmatrix} \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta V_m} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta V_o^*} \\ \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta V_m} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta V_o^*} \\ \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta V_m} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta V_o^*} \\ \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta V_m} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta V_o^*} \\ \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta V_m} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta V_o^*} \\ \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta V_m} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta V_o^*} \\ \frac{\delta \dot{I}_{L,b}}{\delta V_m} & \frac{\delta \dot{I}_{L,b}}{\delta V_o^*} \\ \frac{\delta \dot{V}_o}{\delta V_m} & \frac{\delta \dot{V}_o}{\delta V_o^*} \\ \frac{\delta \dot{X}_v}{\delta V_m} & \frac{\delta \dot{X}_v}{\delta V_o^*} \\ \frac{\delta \dot{X}_i}{\delta V_m} & \frac{\delta \dot{X}_i}{\delta V_o^*} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(\lambda) & 0 \\ \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_c K_{pv} K_{pi} I_{Lb0}}{V_r L_{dc}} \\ 0 & \frac{K_{pv} K_{pi} I_{Lb0}}{V_r C_{dc}} \\ 0 & \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc,0}}{V_r L_b} \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & K_{pv} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{C}(x_0, u_0) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D}(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.53}$$

### 3.3.3 การหาค่าในสถานะคงตัว

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3.52) มีพารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่าอยู่คือ  $V_{dc,0}$ ,  $I_{dc,0}$ ,  $V_{o,0}$ ,  $I_{Lb,0}$ ,  $X_{v,0}$ ,  $X_{i,0}$ ,  $\lambda$  และ  $V_{bus}$  ซึ่ง  $\lambda$  และ  $V_{bus}$  สามารถหาได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว ซึ่งได้มีการวิเคราะห์ไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.2 โดยมีสมการการไหลกำลังไฟฟ้า ดังสมการที่ (3.54)

$$\begin{aligned}
 P_{bus} &= \frac{V_{bus} V_s \cos(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \cos(\gamma)}{Z} \\
 Q_{bus} &= \frac{V_{bus} V_s \sin(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \sin(\gamma)}{Z}
 \end{aligned} \tag{3.54}$$

เมื่อ  $V_{bus}$  คือ แรงดันเฟส (rms) ที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC bus) หรือแรงดันอินพุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส  $\lambda$  คือ มุมเฟสการเลื่อนระหว่าง  $V_s$  กับ  $V_{bus}$  และ  $Z\angle\gamma$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยที่กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าปรากฏต่อเฟสที่พิจารณาที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.55)

$$\begin{aligned} P_{bus} &= \frac{1}{3} \left( \frac{V_o^{*2}}{R} + P_{loss} \right) \\ Q_{bus} &= 0 \end{aligned} \quad (3.55)$$

เมื่อ  $V_o^*$  คือ แรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตที่กำหนด และ  $P_{loss}$  คือ กำลังสูญเสียเนื่องจาก  $r_L$  และ  $r_\mu$  โดยที่  $Q_{bus}$  ถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากการสมมติฐานของวงจรเรียงกระแสสามเฟส พิจารณากระแสอินพุต ( $I_{in,abc}$ ) ที่มีเฟสเดียวกับแรงดันอินพุต ( $V_{bus,abc}$ ) ซึ่งจากสมการที่ (3.53) สามารถคำนวณหาผลเฉลยได้โดยวิธีการเชิงตัวเลข วิธีนิวตัน-ราฟสัน ดังภาคผนวกที่ ก.2 โดยที่  $V_{dc,0}, I_{L,0}, V_{o,0}, X_{v,0}$  และ  $X_{i,0}$  สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3.52) สามารถคำนวณได้จากค่า  $V_{bus}$  และค่า  $\lambda$  ดังสมการที่ (3.56)

$$\begin{cases} V_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{bus,0}) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,0} - r_L I_{dc,0} \\ V_{o,0} = V_o^* \\ I_{L,0} = \frac{V_{o,0}}{R} \\ X_{v,0} = \frac{I_{L,0}}{K_{iv}} \\ X_{i,0} = \frac{V_{o,0}}{K_{ii} V_{dc,0}} \end{cases} \quad (3.56)$$

เมื่อ

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

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

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

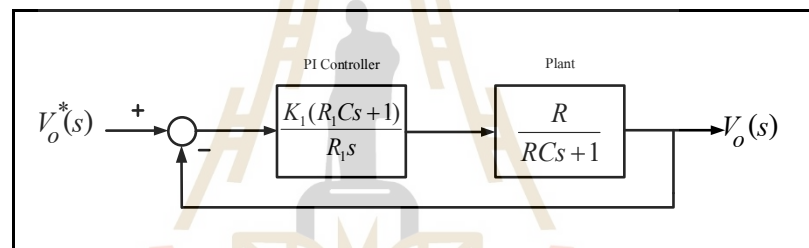
จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3.52) และการคำนวณหาค่าในสถานะคงตัวในสมการที่ (3.56) พบว่า ยังมีค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอปรากฏอยู่ในแบบจำลอง ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถแสดงรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป

### 3.3.4 การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบับคัก

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอของวงจรแปลงผันแบบบับคัก ในงานวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยวิธีการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมของระบบควบคุม (K.M. Tsang and W.L. Chan, 2005) เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลการตอบสนองที่ดีและมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน โดยการออกแบบตัวควบคุมแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนการออกแบบตัวควบคุมลูประแรงดันไฟฟ้าและลูการควบคุมกระแสไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### - การออกแบบตัวควบคุมลูประแรงดันไฟฟ้า

แผนภาพบล็อกของลูการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ารูปที่ 3.16 แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ลูการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.18  $K_i$  และ  $R_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมลูประแรงดันไฟฟ้า ขณะที่  $C$  และ  $R$  คือ ความจุไฟฟ้าและความต้านทานของวงจรแปลงผันกำลังแบบบับคักตามลำดับ สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของลูประแรงดันไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3.57)

$$\frac{V_o(s)}{V_o^*(s)} = \frac{K_i R_i R C s + K_i R}{R_i R C s^2 + (R_i + K_i R_i R C) s + K_i R} \quad (3.57)$$

สำหรับระบบอันดับสองมาตรฐานของระบบควบคุมแบบวงปิด มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (3.58)

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.58)$$

การออกแบบตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะทำได้โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวหารระหว่างสมการที่ (3.57) และ (3.58) จะได้ตัวควบคุมแรงดันดังสมการที่ (3.59) และ (3.60)

$$\omega_{nv} = \sqrt{\frac{K_1}{R_1 C}} \quad (3.59)$$

$$2\zeta_v \omega_{nv} = \frac{1}{R_1 C} + K_1 \quad (3.60)$$

จากสมการที่ (3.59) และ (3.60) กำหนดให้  $R=R_1$  และ  $\zeta_v = 1$  สำหรับการตอบสนองแบบหน่วงวิกฤต (K.M. Tsang and W.L. Chan, 2005) ดังนั้นสมการที่ (3.60) เขียนได้ใหม่เป็นดังสมการที่ (3.61)

$$2\omega_{nv} = \frac{1}{RC} + K_1 \quad (3.61)$$

จากสมการที่ (3.59) และ (3.61) สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า  $K_1$  ได้ดังสมการ (3.62)

$$K_1 = \frac{1}{R_1 C} \quad (3.62)$$

ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบตัวควบคุม ความกว้างแถบ (Bandwidth) ของรูปแรงดันไฟฟ้า ดังสมการที่ (3.63)

$$\omega_{nv} = \frac{1}{R_1 C} \quad (3.63)$$

ตัวควบคุมพีไอสามารถเขียนได้ดังสมการ (3.64)

$$K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} = \frac{K_1 (R_1 C s + 1)}{R_1 s} \quad (3.64)$$

จากสมการที่ (3.62) และ (3.64) สามารถเขียนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอของรูปแรงดันไฟฟ้า ( $K_{pv}$  และ  $K_{iv}$ ) ดังสมการที่ (3.65) และ (3.66)

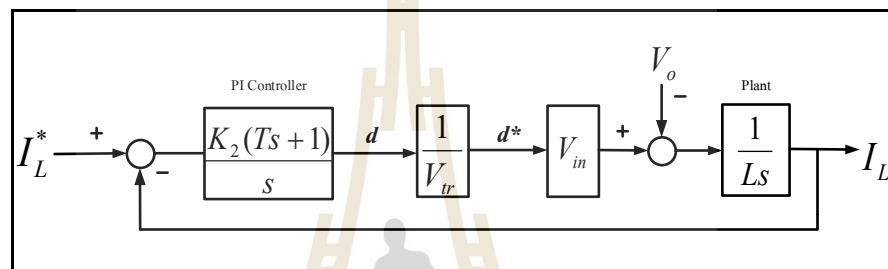
$$K_{pv} = K_1 C = \frac{1}{R_1} \quad (3.65)$$

$$K_{iv} = \frac{K_1}{R_1} = \frac{1}{R_1^2 C} \quad (3.66)$$

- การออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า

แผนภาพบล็อกของลูปรการควบคุมกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ารูปที่ 3.16 แสดงดัง

รูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ลูปรการควบคุมกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.19  $K_2$  และ  $T$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมลูปรการกระแสไฟฟ้า ขณะที่  $L$  คือความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักคัท สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปรการกระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3.67)

$$\frac{I_L(s)}{I_L^*(s)} = \frac{K_2 V_{in} (Ts+1)}{V_{tr} Ls^2 + K_2 T V_{in} s + K_2 V_{in}} \quad (3.67)$$

การออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าทำได้โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวหารระหว่างสมการที่ (3.58) และ (3.67) จะได้ตัวควบคุมแรงดันดังสมการ (3.68) และ (3.69)

$$T = \frac{2\zeta}{N\omega_m} \quad (3.68)$$

$$\omega_{ni} = N\omega_m = \sqrt{\frac{K_2 V_{in}}{V_{tr} L}}, N > 4 \quad (3.69)$$

จากสมการที่ (3.69) สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า  $K_2$  ได้ดังสมการ (3.70)

$$K_2 = \frac{\omega_m^2 LV_r}{V_m} \quad (3.70)$$

จากรูปที่ 3.19 สามารถเขียนตัวควบคุมพีไอได้ดังสมการ (3.71)

$$K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} = \frac{K_2(Ts+1)}{s} \quad (3.71)$$

จากสมการที่ (3.68), (3.70) และ(3.71) สามารถเขียนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอของลูกระแสไฟฟ้า ( $K_{pi}$  และ  $K_{ii}$ ) ดังสมการที่ (3.72) และ (3.73)

$$K_{pi} = \frac{2N\zeta_i\omega_m LV_r}{V_m} \quad (3.72)$$

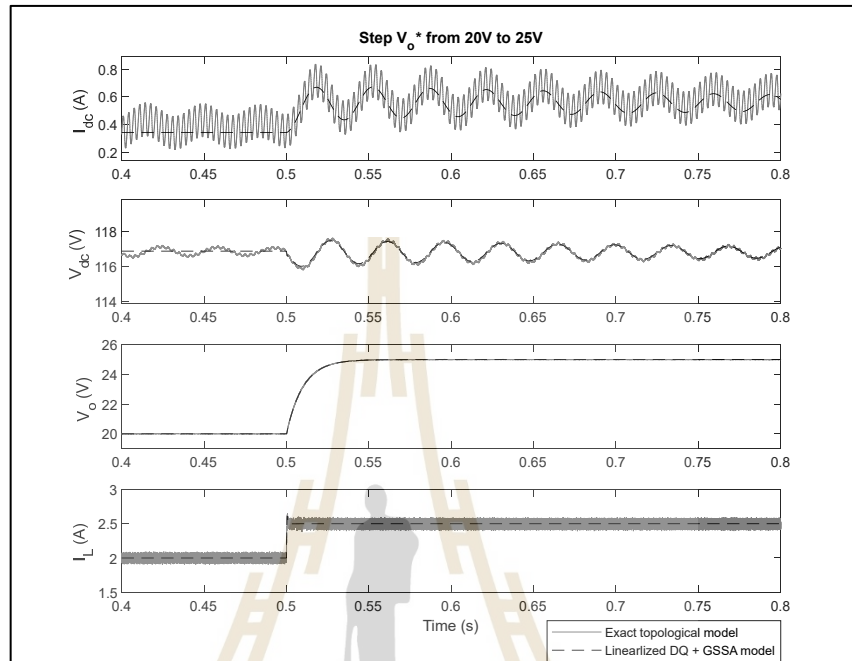
$$K_{ii} = \frac{2N\zeta_i\omega_m LV_r}{V_m} \quad (3.73)$$

ตัวควบคุมแบบพีไอของลูประแรงดันและลูกระแสไฟฟ้า สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (3.65) สมการที่ (3.66) สมการที่ (3.72) และสมการที่ (3.73) ตามลำดับ โดยสมการตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบ ประกอบด้วย อัตราส่วนการหน่วงลูประแรงดันไฟฟ้า ( $\zeta_v$ ), อัตราส่วนการหน่วงลูกระแสไฟฟ้า ( $\zeta_i$ ), ความกว้างแถบของลูประแรงดันไฟฟ้า ( $\omega_m$ ) และความกว้างแถบของลูกระแสไฟฟ้า ( $\omega_{ii}$ ) โดยสามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการดั้งเดิม สามารถออกแบบโดยการเลือก  $\zeta_v = 1$ ,  $\zeta_i = 0.7$ ,  $\omega_m = 400$  rad/s และ  $\omega_{ii} = 4000$  rad/s และกำหนดให้ขนาดของสัญญาณสามเหลี่ยม  $V_{tr} = 1$  จะได้ตัวควบคุมพีไอจากการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิม คือ  $K_{pv} = 0.1$ ,  $K_{iv} = 10$ ,  $K_{pi} = 0.7210$  และ  $K_{ii} = 2060.1$

### 3.3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ

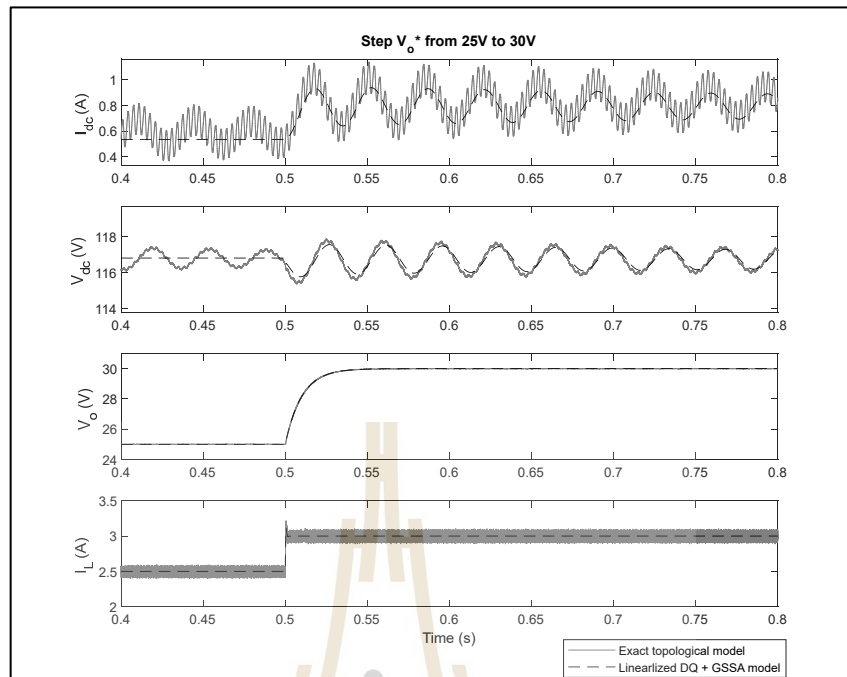
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ในสมการที่ (3.52) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 3.16 ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถดูได้ในภาคผนวกที่ ข.2 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยเงื่อนไขการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะดำเนินการโดยเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ( $V_o^*$ ) แบบขั้นบันไดจาก 20 V เป็น 25 V ที่ 0.5 วินาที และเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง

( $v_o^*$ ) จาก 25 V เป็น 30 V ที่ 0.5 วินาทีโดยพารามิเตอร์อื่นๆกำหนดให้มีค่าคงที่ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.20 และรูปที่ 3.21 ตามลำดับ



รูปที่ 3.20 การจำลองสถานการณ์โดยเปลี่ยน  $v_o^*$  จาก 20 V เป็น 25 V





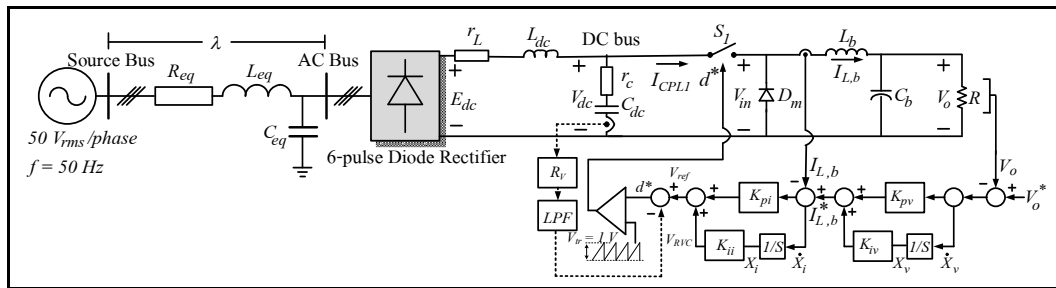
รูปที่ 3.21 การจำลองสถานการณ์โดยเปลี่ยน  $v_o^*$  จาก 25 V เป็น 30 V

จากผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 3.20 และ รูปที่ 3.21 พบว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกับผลการตอบสนองของชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัวซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการสร้างด้วยวิธีตีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปนี้มีความถูกต้องแม่นยำ

### 3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ที่มีการควบคุมและมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

#### 3.4.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น วงจรกรองที่มีตัวเก็บประจุ ขดลวดเหนี่ยวนำ โหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ที่มีการควบคุมแบบพีไอเรียงต่อกัน และระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี แสดงในรูปที่ 3.22

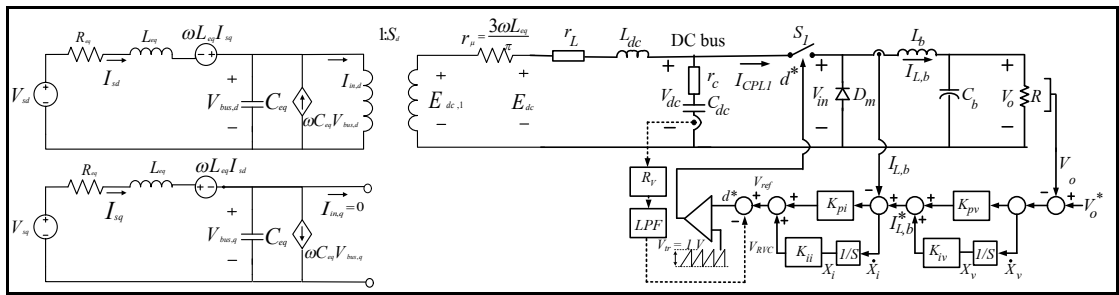


รูปที่ 3.22 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัสคัทที่มีการควบคุมร่วมกับระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

### 3.4.2 หลักการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสคัทที่มีการควบคุม จะอาศัยหลักการโดยฉีดแรงดันชดเชยเข้าไปในระบบควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสคัทโดยมีพื้นฐานมาจากการรับค่ากระแสของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง  $I_{Cdc}$  และนำไปถูกปรับคูณด้วยค่าอัตราขยาย  $R_v$  ซึ่งผลที่ได้จะเป็นการจำลองแรงดันตกเพิ่มมาในฝั่งของแรงดันบัสดีซี จากนั้นแรงดันตกที่ได้จะนำมาผ่านวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่าน (Low-pass filter : LPF) ด้วยการกำหนดค่าความถี่ตัดผ่านทาง  $\omega_c$  เพื่อที่จะใช้วิธีการบรรเทาเสถียรภาพแบบอาร์วีซีในย่านความถี่ต่ำ เมื่อมีการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้นสัญญาณของผลการจำลองแรงดันตกนี้จะไปบอกรอกจากแรงดันอ้างอิงในระบบควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสคัท  $V_{ref}$  เพื่อสร้างสัญญาณไปปรับปรุงวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle :  $d^*$ ) ของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse-width-modulation : PWM) ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสคัทใหม่เพื่อทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพ ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือ ระบบจะไม่มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเกิดขึ้นเนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มาก่อเพิ่มเข้ากับวงจร และเซนเซอร์ที่ใช้อ่านค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในวงจรกรองมีค่าพิกัดไม่สูง ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย (Mohamed, Y.R., Radwan, A.A.A. and Lee, T. 2012.)

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.20 ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์สามารถแปลงวงจรให้อยู่บนแกนดีคิว ที่ได้ผ่านการสร้างด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 3.2 โดยกำหนดให้มุมเฟสการหมุนของสัญญาณการสวิตช์ ( $\phi_i = \phi$ ) จะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุมดังรูปที่ 3.21 สัญญาณที่ถูกสร้างจากตัวควบคุมแบบพีไอเรียงต่อกัน จะถูกแทนด้วยตัวแปร  $V_{ref}$  และค่ากระแสของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง  $I_{dc}$  ที่ถูกคูณด้วยค่าอัตราขยาย  $R_v$  จะถูกกรองสัญญาณผ่านวงจรกรองแบบต่ำด้วยความถี่ตัดผ่าน  $\omega_c$  ซึ่งจะถูกแทนด้วยตัวแปร  $V_{RVC}$  ซึ่งมีขั้นตอนการสร้างดังสมการที่ (3.74) - (3.75)

พิจารณาระแสที่ไหลผ่านวงจรกรอง

$$I_{Cdc} = C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \tag{3.74}$$

พิจารณาแรงดันที่วงจรสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีในโดเมนความถี่

$$V_{RVC} = R_v \frac{a}{s+a} C_{dc} s V_{dc} \tag{3.75}$$

$$V_{dc,filter} = \frac{a}{s+a} V_{dc} \tag{3.76}$$

จัดให้อยู่ในรูปสมการปริภูมิสถานะ

$$sV_{dc,filter} = s \frac{a}{s+a} V_{dc} \tag{3.77}$$

$$\dot{V}_{dc,filter} = s \frac{a}{s+a} V_{dc}$$

จัดรูปสมการใหม่

$$\begin{aligned}\dot{V}_{dc,filter} &= ((s+a)-a) \frac{a}{s+a} V_{dc} \\ \dot{V}_{dc,filter} &= aV_{dc} - \frac{a^2}{s+a} V_{dc} \\ \dot{V}_{dc,filter} &= aV_{dc} - aV_{dc,filter}\end{aligned}\quad (3.78)$$

จะได้  $V_{RVC}$  ดังสมการที่ (3.79)

$$\begin{aligned}V_{RVC} &= R_v C_{dc} \dot{V}_{dc,filter} \\ V_{RVC} &= R_v C_{dc} aV_{dc} - R_v C_{dc} aV_{dc,filter}\end{aligned}\quad (3.79)$$

$$\text{เมื่อ } a = R_{filter} C_{filter} = \frac{1}{\omega_c}$$

โดยที่  $R_{filter}$  และ  $C_{filter}$  คือค่าตัวต้านทานในวงจรกรองผ่านต่ำและตัวเก็บประจุในวงจรกรองผ่านต่ำตามลำดับ

สมการของตัวควบคุมพีไอในรูปของ  $V_{ref}$  ดังสมการที่ (3.80)

$$V_{ref} = K_{pi} K_{pv} V_o^* - K_{pi} K_{pv} V_o + K_{pi} K_{iv} X_v - K_{pi} I_{L,b} + X_i K_{ii}\quad (3.80)$$

ดังนั้นจะได้ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่ถูกปรับปรุง (Duty cycle :  $d^*$ ) ของสัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็ม (Pulse-width-modulation : PWM) ของระบบไฟฟ้ารูปที่ 3.17 ดังสมการที่ (3.81)

$$d^* = \frac{V_{ref} - V_{RVC}}{V_{tr}}\quad (3.81)$$

ดำเนินการแทนค่า  $d$  ในสมการที่ (3.41)-(3.43) ด้วย  $d^*$  จากสมการที่ (3.81) จะได้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 3.22 ที่ได้รับการสร้างด้วยวิธีตีควร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยสถานะทั่วไป ดังสมการที่ (3.82)

$$\begin{cases}
\dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq} I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}}\right) \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) V_m \cos(\lambda) \\
\dot{I}_{sq} = -\frac{R_{eq} I_{sq}}{L_{eq}} - \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}}\right) \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) V_m \sin(\lambda) \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right) \left(\frac{I_{dc}}{C_{eq}}\right) \\
\dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\
\dot{I}_{dc} = \left(\frac{1}{L_{dc}}\right) \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right) V_{bus,d} - \frac{I_{dc} (r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}} - \frac{K_{pi} r_c I_{L,b}^2}{V_{tr} L_{dc}} \\
- \frac{K_{pv} K_{pi} r_c I_{L,b} V_o}{V_{tr} L_{dc}} + \frac{K_{iv} K_{pi} r_c I_{L,b} X_v}{V_{tr} L_{dc}} + \frac{K_{ii} r_c I_{L,b} X_i}{V_{tr} L_{dc}} \\
+ \frac{K_{pv} K_{pi} r_c I_{L,b} V_o^*}{V_{tr} L_{dc}} + \frac{R_v a V_{dc,filter} r_c I_{L,b} C_{dc}}{V_{tr} L_{dc}} - \frac{R_v a V_{dc} r_c I_{L,b} C_{dc}}{V_{tr} L_{dc}} \\
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi} I_{L,b}^2}{V_{tr} C_{dc}} + \frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,b} V_o}{V_{tr} C_{dc}} - \frac{K_{iv} K_{pi} I_{L,b} X_v}{V_{tr} C_{dc}} \\
- \frac{K_{ii} I_{L,b} X_i}{V_{tr} C_{dc}} - \frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,b} V_o^*}{V_{tr} C_{dc}} - \frac{R_v a V_{dc,filter} I_{L,b}}{V_{tr}} + \frac{R_v a V_{dc} I_{L,b}}{V_{tr}} \\
\dot{I}_{L,b} = -\frac{K_{pi} V_{dc} I_{L,b}}{V_{tr} L_b} - \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc} V_o}{V_{tr} L_b} + \frac{K_{iv} K_{pi} V_{dc} X_v}{V_{tr} L_b} + \frac{K_{ii} V_{dc} X_i}{V_{tr} L_b} \\
+ \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc} V_o^*}{V_{tr} L_b} - \frac{V_o}{V_{tr} L_b} + \frac{R_v a V_{dc,filter} V_{dc} C_{dc}}{V_{tr} L_b} - \frac{R_v a V_{dc}^2 C_{dc}}{V_{tr} L_b} \\
\dot{V}_o = \frac{I_{L,b}}{C_b} - \frac{V_o}{RC_b} \\
\dot{X}_v = V_o^* - V_o \\
\dot{X}_i = -I_{L,b} - K_{pv} V_o + K_{iv} X_v + K_{pi} V_o^* \\
\dot{V}_{dc,filter} = -a V_{dc,filter} + a V_{dc}
\end{cases} \quad (3.82)$$

### 3.4.3 การทำให้เป็นเชิงเส้น

จากสมการที่ (3.82) เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยใช้  
อนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง สามารถเขียนแบบจำลองเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (3.83)

$$\begin{cases}
\delta \dot{x} = \mathbf{A}(x_0, u_0) \delta x + \mathbf{B}(x_0, u_0) \delta u \\
\delta \dot{y} = \mathbf{C}(x_0, u_0) \delta x + \mathbf{D}(x_0, u_0) \delta u
\end{cases} \quad (3.83)$$

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

รายละเอียดของเมตริกซ์  $\mathbf{A}(x_0, u_0)$ ,  $\mathbf{B}(x_0, u_0)$ ,  $\mathbf{C}(x_0, u_0)$  และ  $\mathbf{D}(x_0, u_0)$  แสดงดังสมการที่ (3.84)

$$\mathbf{A}(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & \frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & \frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{\sqrt{3} 2\sqrt{3}}{\sqrt{2} \pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3} 2\sqrt{3}}{\sqrt{2} \pi L_{dk}} & 0 & \frac{(r_u+r_l+r_c)}{L_{dk}} & \frac{1}{L_{dk}} \frac{R_a r_c I_{Lb0} C_{dk}}{V_r L_{dk}} & a(5,7) & \frac{-r_c K_p K_p I_{Lb0}}{V_r L_{dk}} & \frac{r_c K_p K_p I_{Lb0}}{V_r L_{dk}} & \frac{r_c K_p I_{Lb0}}{V_r L_{dk}} & \frac{R_a r_c I_{Lb0} C_{dk}}{V_r L_{dk}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dk}} & \frac{R_a I_{Lb0}}{V_r} & a(6,7) & \frac{K_p K_p I_{Lb0}}{V_r C_{dk}} & \frac{K_p K_p I_{Lb0}}{V_r C_{dk}} & \frac{K_p I_{Lb0}}{V_r C_{dk}} & \frac{0.1 \bar{R} a I}{V_r} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & \frac{K_p V_{dk0}}{V_r L_b} & \frac{K_p K_p V_{dk0} + 1}{V_r L_b} & \frac{K_p K_p V_{dk0}}{V_r L_b} & \frac{K_p V_{dk0}}{V_r L_b} & \frac{R_a V_{dk0} C_{dk}}{V_r L_b} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_b} & \frac{1}{RC_b} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_p & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & -a \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} a(5,7) &= \frac{-2r_c K_p I_{Lb0}}{V_r L_{dk}} - \frac{r_c K_p K_p V_{a0}}{V_r L_{dk}} + \frac{r_c K_p K_p X_{i0}}{V_r L_{dk}} + \frac{r_c K_p X_{i0}}{V_r L_{dk}} + \frac{r_c K_p K_p V_{a0}^*}{V_r L_{dk}} \\ a(6,7) &= \frac{-2K_p I_{Lb0}}{V_r C_{dk}} - \frac{K_p K_p V_{a0}}{V_r C_{dk}} + \frac{K_p K_p X_{i0}}{V_r C_{dk}} + \frac{K_p X_{i0}}{V_r C_{dk}} + \frac{K_p K_p V_{a0}^*}{V_r C_{dk}} \\ a(7,6) &= \frac{-K_p I_{Lb0}}{V_r L_b} - \frac{K_p K_p V_{a0}}{V_r L_b} + \frac{K_p K_p X_{i0}}{V_r L_b} + \frac{K_p X_{i0}}{V_r L_b} + \frac{K_p K_p V_{a0}^*}{V_r L_b} - \frac{R_a V_{dk0} C_{dk}}{V_r L_b} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{B}(x_0, u_0) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(\lambda) & 0 \\ \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_c K_{pv} K_{pi} I_{l,b0}}{V_{tr} L_{dc}} \\ 0 & \frac{K_{pv} K_{pi} I_{l,b0}}{V_{tr} C_{dc}} \\ 0 & \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc,0}}{V_{tr} L_b} \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & K_{pv} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{11 \times 2} \\
 \mathbf{C}(x_0, u_0) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 11} \quad \mathbf{D}(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 2}
 \end{aligned} \tag{3.84}$$

#### 3.4.4 การหาค่าในสภาวะคงตัว

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3.82) มีความสอดคล้องสำหรับการคำนวณค่า  $V_{dc,0}, I_{dc,0}, V_{o,0}, I_{Lb,0}, X_{v,0}, X_{i,0}, V_{dc,filter0}, \lambda$  และ  $V_{bus}$  ซึ่ง  $\lambda$  และ  $V_{bus}$  สามารถหาได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัว ซึ่งได้จากวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 3.2 ดังนั้นค่าคงที่ในสภาวะคงตัวที่สอดคล้องกับแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3.83) สามารถคำนวณได้จากค่า  $\lambda$  และ  $V_{bus}$  โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.85)

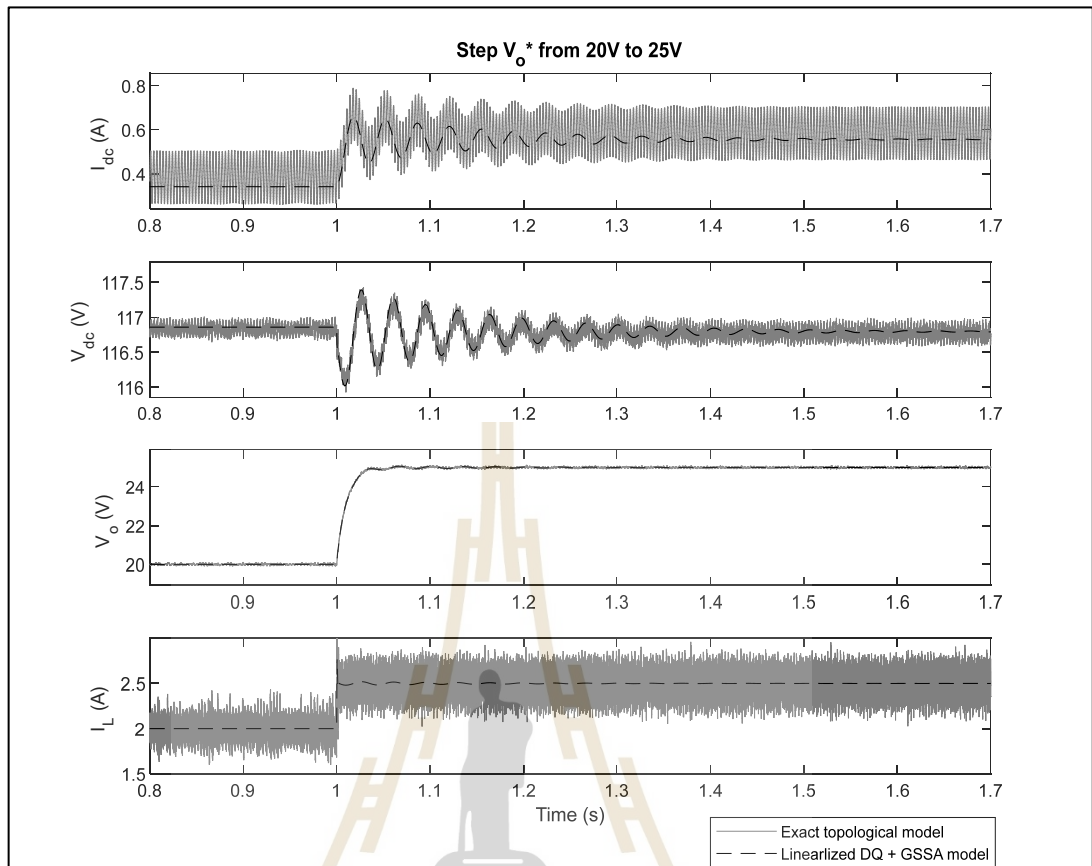
$$\begin{cases} V_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{bus,0}) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,0} - r_L I_{dc,0} \\ V_{o,0} = V_o^* \\ I_{L,0} = \frac{V_{o,0}}{R} \\ X_{V,0} = \frac{I_{L,0}}{K_{iv}} \\ X_{i,0} = \frac{V_{o,0}}{K_{ii} V_{dc,0}} \\ V_{dc,filter0} = V_{dc,0} \end{cases} \tag{3.85}$$



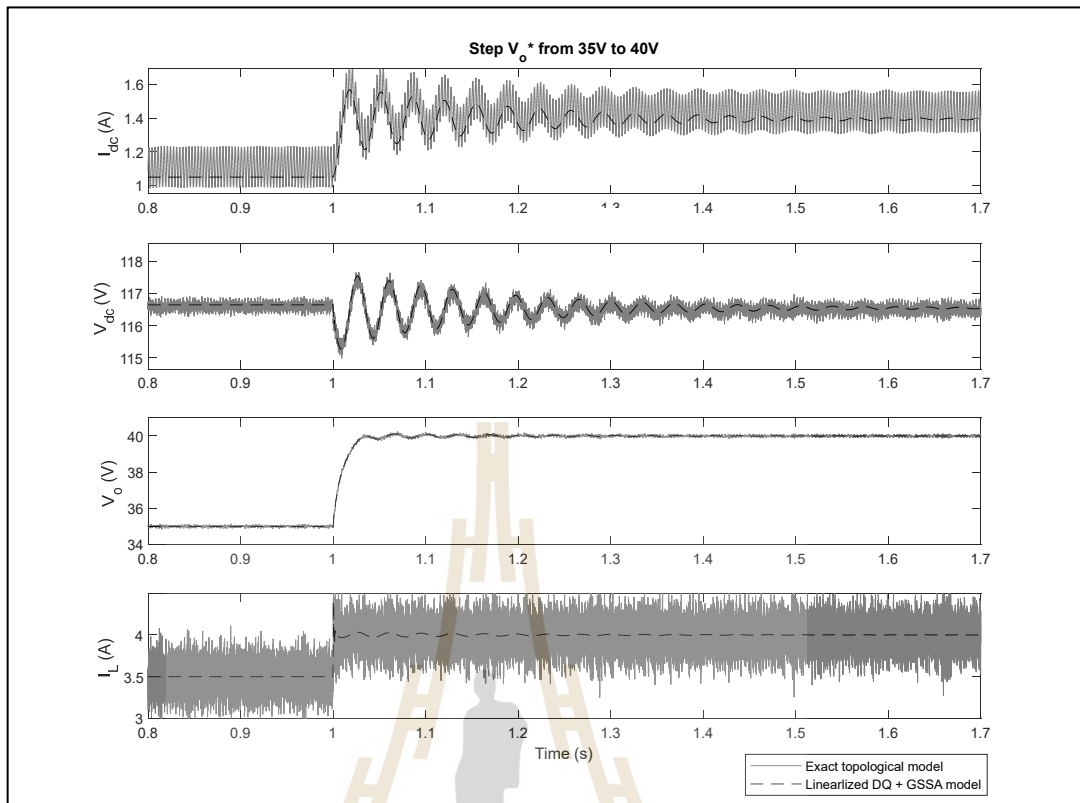
$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ} \quad I_{dc} &= \frac{\sqrt{3} \left| \frac{V_s e^{j0} - V_{bus} e^{-j\lambda}}{Z e^{j\gamma}} \right|}{\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi}} \\
 Z &= \sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2} \\
 \gamma &= \tan^{-1} \left( \frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \right)
 \end{aligned}$$

### 3.4.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ในสมการที่ (3.82) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปแบบที่ 3.16 ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถดูได้ในภาคผนวกที่ ข.3 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยที่กำหนดให้อัตราขยาย  $R_v = 2.5$  และ  $a = 300$  โดยเงื่อนไขการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะดำเนินการโดยเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ( $V_o^*$ ) แบบขั้นบันไดจาก 20 V เป็น 25 V ที่ 1 วินาที และ เปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ( $V_o^*$ ) จาก 35 V เป็น 40 V ที่ 1 วินาที โดยพารามิเตอร์อื่นๆกำหนดให้มีค่าคงที่ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 ตามลำดับ



รูปที่ 3.24 การจำลองสถานการณ์โดยเปลี่ยน  $V_o^*$  จาก 20 V เป็น 25 V



รูปที่ 3.25 การจำลองสถานการณ์โดยเปลี่ยน  $V_o^*$  จาก 35 V เป็น 40 V

จากผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 พบว่าผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์สอดคล้องกับผลการตอบสนองของชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ได้นั้นมีความถูกต้อง

### 3.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักกิ้งกรณีนที่ไม่มีตัวควบคุม กรณีนที่มีตัวควบคุม พร้อมทั้งการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีนที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี โดยในขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักกิ้งกรณีนที่ไม่มีตัวควบคุม โดยทางด้านวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์จะประยุกต์ใช้วิธีตีควในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำแบบจำลองที่ได้ไปเป็นแบบจำลองที่ไม่แปรผันตามเวลา รวมถึงการนำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักกิ้งกรณีนที่ไม่มีตัวควบคุม และทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทนี้มีความถูกต้อง

หลังจากนั้นจึงประยุกต์หลักการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามขั้นตอนที่พิสูจน์ในวงจรถัดล่าง เข้ากับ ระบบที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัพคักที่มีการควบคุม และระบบที่มีการสร้าง เสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี โดยแบบจำลองที่พิสูจน์ได้เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำให้เป็น เชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับ 1 อีกทั้งนำเสนอถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการดั้งเดิม และหลักการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี พร้อมการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งหลักการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทนี้ ถือเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแส สามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัพคักขนานกัน ซึ่งรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอในบท ต่อไป



## บทที่ 4

### วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ขนานกัน

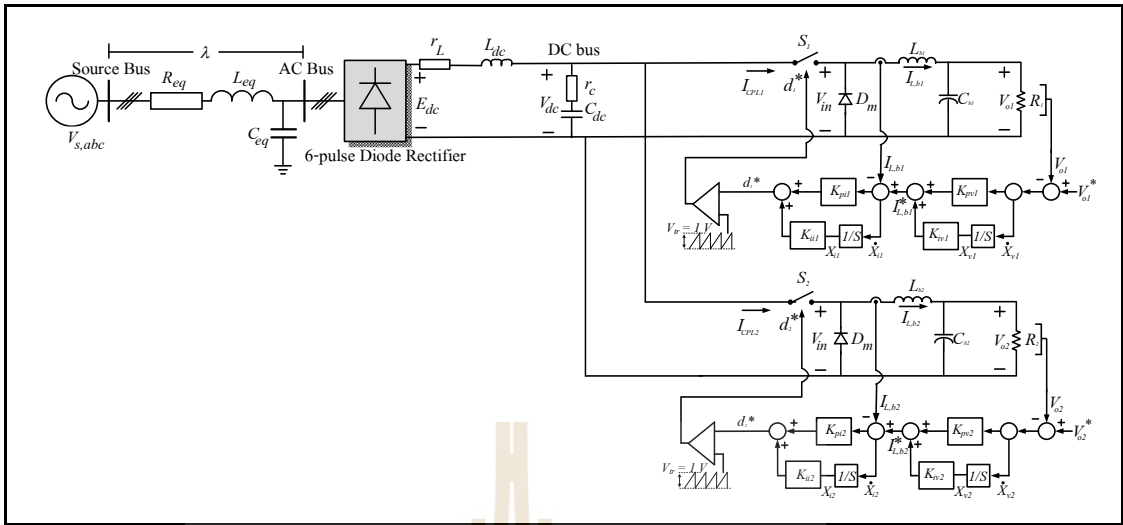
#### 4.1 บทนำ

เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวถูกต่อขนานเพิ่มเข้ามาในระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีซีที่เชื่อมต่อกับวงจรกรอง เสถียรภาพของระบบไฟฟ้างกล่าวจะได้รับผลกระทบ และอาจเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้น เนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอถึง การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ขนานกันซึ่งแบ่งเป็น 3 กรณีคือ กรณีที่ไม่มีตัวควบคุม กรณีที่มีตัวควบคุม และกรณีที่มีตัวควบคุมพร้อมกับวงจรสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีตามลำดับ พร้อมทั้งนำเสนอการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับ 1 การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

#### 4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่มีการควบคุมขนานกัน

##### 4.2.1 สมมติฐานและระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

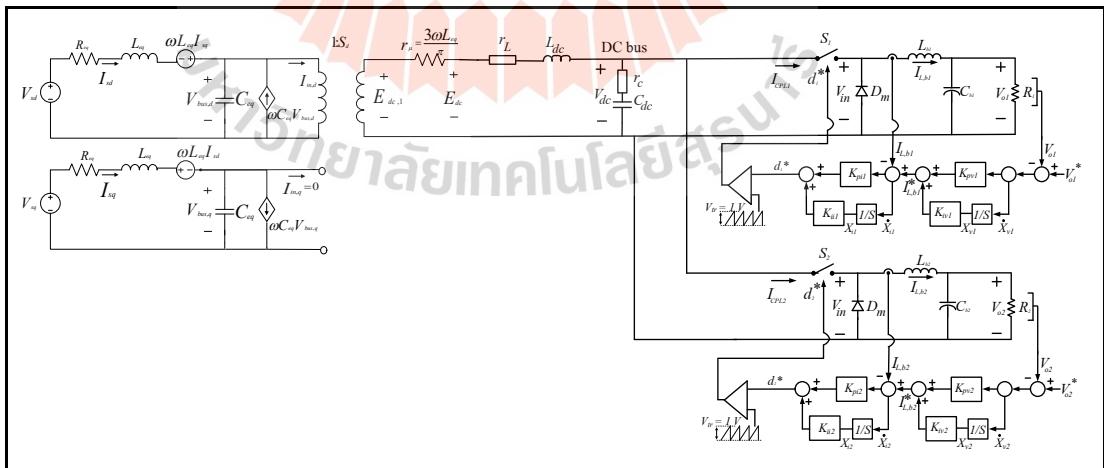
การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในหัวข้อนี้ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ วงจรกรองสัญญาณดีซีและโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่มีการควบคุม 2 ชุด ต่อขนานกัน ซึ่งโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์จะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยสามารถปรับแรงดันเอาต์พุตตกคร่อมโหลดตัวต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ให้คงที่ด้วยการปรับแรงดัน  $V_{o1}^*$  และ  $V_{o2}^*$  ตามลำดับ โดยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรแปลงผันแบบบัก์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 มีขั้นตอนการสร้างเช่นเดียวกับขั้นตอนที่อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 ดังนั้นวงจรสมมูลที่พิจารณามบนแกนดีคิวจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีการควบคุม 2 ชุดต่อขนานกัน

#### 4.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 พิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์สามารถแปลงวงจรให้อยู่บนแกนดัดคิว ดั่งขั้นตอนการสร้างด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 3.2 ของบทที่ 3 โดยกำหนดให้มุมเฟสการหมุนของสัญญาณการสวิตซ์ ( $\phi_1 = \phi$ ) จะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 4.2 พิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์รวมทั้งสายส่งไฟฟ้ากำลังทางด้านฝั่งเอซี ถูกเปลี่ยนให้อยู่บนแกนดีคิว โดยไดโอดเรียงกระแสสามเฟสถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะถูกใช้ในการกำจัดสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ทั้งสองชุดโดยยังไม่พิจารณาตัวควบคุม ซึ่งวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าด้วยวิธีดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะอาศัยการสร้างเช่นเดียวกับบทที่ 3 โดยสมการที่ผ่านการสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบในรูปแบบที่ 4.2 ด้วยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ จะมีสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่แปรผันตามเวลาดังสมการที่ (4.1)

$$\begin{cases}
 \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq} I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}}\right) \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) V_m \cos(\lambda) \\
 \dot{I}_{sq} = -\frac{R_{eq} I_{sq}}{L_{eq}} - \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}}\right) \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) V_m \sin(\lambda) \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = \dot{V}_{bus,d} - \omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} \\
 \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_c d_1}{L_{dc}} I_{L,b1} + \frac{r_c d_2}{L_{dc}} I_{L,b2} \\
 \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{d_1}{C_{dc}} I_{L,b1} - \frac{d_2}{C_{dc}} I_{L,b2} \\
 \dot{I}_{L,b1} = \frac{d_1}{L_{b1}} V_{dc} - \frac{1}{L_{b1}} V_{o1} \\
 \dot{V}_{o1} = \frac{I_{L,b1}}{C_{b1}} - \frac{V_{o1}}{R_1 C_{b1}} \\
 \dot{I}_{L,b2} = \frac{d_2}{L_{b2}} V_{dc} - \frac{1}{L_{b2}} V_{o2} \\
 \dot{V}_{o2} = \frac{I_{L,b2}}{C_{b2}} - \frac{V_{o2}}{R_2 C_{b2}}
 \end{cases} \quad (4.1)$$

การสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาตัวควบคุมของโพลดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคค์ในรูปแบบที่ 4.1 ซึ่งตัวควบคุมที่ใช้คือตัวควบคุมพีไอเรียงต่อกัน โดยแบ่งเป็น 2 ลูปคือ ลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นลูปภายนอก และลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นลูปภายใน โดยค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมประกอบด้วย  $K_{pv1}$ ,  $K_{iv1}$ ,  $K_{pi1}$ ,  $K_{ii1}$ ,  $K_{pv2}$ ,  $K_{iv2}$ ,  $K_{pi2}$  และ  $K_{ii2}$  ตามลำดับสามารถเขียนสมการของตัวควบคุมพีไอให้อยู่ในรูปแบบ  $d_1^*$  และ  $d_2^*$  ดังสมการที่ (4.2)



$$d_1^* = \frac{K_{pi1}K_{pv1}V_{o1}^* - K_{pi1}K_{pv1}V_{o1} + K_{pi1}K_{iv1}X_{v1} - K_{pi1}I_{L,b1} + X_{i1}K_{ii1}}{V_{tr1}} \quad (4.2)$$

$$d_2^* = \frac{K_{pi2}K_{pv2}V_{o2}^* - K_{pi2}K_{pv2}V_{o2} + K_{pi2}K_{iv2}X_{v2} - K_{pi2}I_{L,b2} + X_{i2}K_{ii2}}{V_{tr2}}$$

เมื่อ  $V_{tr1}$  และ  $V_{tr2}$  คือค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยมของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาตัวควบคุมพีโอ พบว่า  $X_{v1}$   $X_{v2}$  ของรูปแรงดัน และ  $X_{i1}$   $X_{i2}$  ของรูปกระแสสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ทั้ง 2 ชุด จะกำหนดให้เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยดำเนินการแทนค่า  $d_1$  และ  $d_2$  ในสมการที่ (4.1) ด้วย  $d_1^*$  และ  $d_2^*$  จากสมการที่ (4.2) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 4.2 โดยพิจารณาตัวควบคุมที่ได้รับการสร้างด้วยวิธีดีคิ๋วร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยสถานะทั่วไป ดังสมการที่ (4.3)



$$\begin{cases}
\dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}}\right)\left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right)V_m \cos(\lambda) \\
\dot{I}_{sq} = -\frac{R_{eq}I_{sq}}{L_{eq}} - \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}}\right)\left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right)V_m \sin(\lambda) \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right)\left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right)\left(\frac{I_{dc}}{C_{eq}}\right) \\
\dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\
\dot{I}_{dc} = \left(\frac{1}{L_{dc}}\right)\left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right)\left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right)V_{bus,d} - \frac{I_{dc}(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}} - \frac{K_{pi1}r_c I_{L,b1}^2}{V_{tr1}L_{dc}} \\
- \frac{K_{pv1}K_{pi1}r_c I_{L,b1}V_{o1}}{V_{tr1}L_{dc}} + \frac{K_{iv1}K_{pi1}r_c I_{L,b1}X_{v1}}{V_{tr1}L_{dc}} + \frac{K_{ii1}r_c I_{L,b1}X_{i1}}{V_{tr1}L_{dc}} + \frac{K_{pv1}K_{pi1}r_c I_{L,b1}V_{o1}^*}{V_{tr1}L_{dc}} \\
- \frac{K_{pi2}r_c I_{L,b2}^2}{V_{tr2}L_{dc}} - \frac{K_{pv2}K_{pi2}r_c I_{L,b2}V_{o2}}{V_{tr2}L_{dc}} + \frac{K_{iv2}K_{pi2}r_c I_{L,b2}X_{v2}}{V_{tr2}L_{dc}} + \frac{K_{ii2}r_c I_{L,b2}X_{i2}}{V_{tr2}L_{dc}} + \frac{K_{pv2}K_{pi2}r_c I_{L,b2}V_{o2}^*}{V_{tr2}L_{dc}} \\
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}}I_{dc} + \frac{K_{pi1}I_{L,b1}^2}{V_{tr1}C_{dc}} + \frac{K_{pv1}K_{pi1}I_{L,b1}V_{o1}}{V_{tr1}C_{dc}} - \frac{K_{iv1}K_{pi1}I_{L,b1}X_{v1}}{V_{tr1}C_{dc}} - \frac{K_{ii1}I_{L,b1}X_{i1}}{V_{tr1}C_{dc}} - \frac{K_{pv1}K_{pi1}I_{L,b1}V_{o1}^*}{V_{tr1}C_{dc}} \\
+ \frac{K_{pi2}I_{L,b2}^2}{V_{tr2}C_{dc}} + \frac{K_{pv2}K_{pi2}I_{L,b2}V_{o2}}{V_{tr2}C_{dc}} - \frac{K_{iv2}K_{pi2}I_{L,b2}X_{v2}}{V_{tr2}C_{dc}} - \frac{K_{ii2}I_{L,b2}X_{i2}}{V_{tr2}C_{dc}} - \frac{K_{pv2}K_{pi2}I_{L,b2}V_{o2}^*}{V_{tr2}C_{dc}} \\
\dot{I}_{L,b1} = -\frac{K_{pi1}V_{dc}I_{L,b1}}{V_{tr1}L_{b1}} - \frac{K_{pv1}K_{pi1}V_{dc}V_{o1}}{V_{tr1}L_{b1}} + \frac{K_{iv1}K_{pi1}V_{dc}X_{v1}}{V_{tr1}L_{b1}} + \frac{K_{ii1}V_{dc}X_{i1}}{V_{tr1}L_{b1}} + \frac{K_{pv1}K_{pi1}V_{dc}V_{o1}^*}{V_{tr1}L_{b1}} - \frac{V_{o1}}{L_{b1}} \\
\dot{V}_{o1} = \frac{I_{L,b1}}{C_{b1}} - \frac{V_{o1}}{R_1C_{b1}} \\
\dot{X}_{v1} = V_{o1}^* - V_{o1} \\
\dot{X}_{i1} = -I_{L,b1} - K_{pv1}V_{o1} + K_{iv1}X_{v1} + K_{pv1}V_{o1}^* \\
\dot{I}_{L,b2} = -\frac{K_{pi2}V_{dc}I_{L,b2}}{V_{tr2}L_{b2}} - \frac{K_{pv2}K_{pi2}V_{dc}V_{o2}}{V_{tr2}L_{b2}} + \frac{K_{iv2}K_{pi2}V_{dc}X_{v2}}{V_{tr2}L_{b2}} + \frac{K_{ii2}V_{dc}X_{i2}}{V_{tr2}L_{b2}} \\
+ \frac{K_{pv2}K_{pi2}V_{dc}V_{o2}^*}{V_{tr2}L_{b2}} - \frac{V_{o2}}{L_{b2}} \\
\dot{V}_{o2} = \frac{I_{L,b2}}{C_{b2}} - \frac{V_{o2}}{R_2C_{b2}} \\
\dot{X}_{v2} = V_{o2}^* - V_{o2} \\
\dot{X}_{i2} = -I_{L,b2} - K_{pv2}V_{o2} + K_{iv2}X_{v2} + K_{pv2}V_{o2}^*
\end{cases} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.3) เมื่อพิจารณาตัวควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัททิ่ง 2 ชุด แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบยังเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่ง โดยรายละเอียดของการทำแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป

### 4.2.3 การทำให้เป็นเชิงเส้น

จากสมการที่ (4.3) สามารถทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นได้โดยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่ง แสดงดังสมการที่ (4.4)

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(x_0, u_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(x_0, u_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(x_0, u_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(x_0, u_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{x} &= [\delta I_{sd}, \delta I_{sq}, \delta V_{bus,d}, \delta V_{bus,q}, \delta I_{dc}, \delta V_{dc}, \delta I_{L,b1}, \delta V_{o1}, X_{v1}, X_{i1}, \delta I_{L,b2}, \delta V_{o2}, X_{v2}, X_{i2}]^T \\ \text{เมื่อ } \delta \mathbf{u} &= [\delta V_m, \delta V_{o1}^*, \delta V_{o2}^*] \\ \delta \mathbf{y} &= [\delta V_{dc}, \delta V_{o1}, \delta V_{o2}]^T \end{aligned}$$

รายละเอียดของเมตริกซ์  $\mathbf{A}(x_0, u_0)$ ,  $\mathbf{B}(x_0, u_0)$ ,  $\mathbf{C}(x_0, u_0)$  และ  $\mathbf{D}(x_0, u_0)$  แสดงได้ดังนี้

$$A(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \frac{\sqrt{3} 2\sqrt{3}}{\sqrt{2} \pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3} 2\sqrt{3}}{\sqrt{2} \pi L_{dc}} & 0 & \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} & a(5,7) & \frac{-r_c K_{pv} K_{pi} I_{lb01}}{V_{r1} L_{dc}} & \frac{r_c K_{v1} K_{pi} I_{lb01}}{V_{r1} L_{dc}} & \frac{r_c K_{i1} I_{lb01}}{V_{r1} L_{dc}} & a(5,11) & \frac{-r_c K_{pv2} K_{pi2} I_{lb02}}{V_{r2} L_{dc}} & \frac{r_c K_{iv2} K_{pi2} I_{lb02}}{V_{r2} L_{dc}} & \frac{r_c K_{i2} I_{lb02}}{V_{r2} L_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & a(6,7) & \frac{K_{pv1} K_{pi1} I_{lb01}}{V_{r1} C_{dc}} & \frac{K_{v1} K_{pi1} I_{lb01}}{V_{r1} C_{dc}} & \frac{K_{i1} I_{lb01}}{V_{r1} C_{dc}} & a(6,11) & \frac{K_{pv2} K_{pi2} I_{lb02}}{V_{r2} C_{dc}} & \frac{K_{iv2} K_{pi2} I_{lb02}}{V_{r2} C_{dc}} & \frac{K_{i2} I_{lb02}}{V_{r2} C_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & \frac{K_{pi1} V_{dc0}}{V_{r1} L_{b1}} & \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{dc0} + 1}{V_{r1} L_{b1}} & \frac{K_{v1} V_{dc0}}{V_{r1} L_{b1}} & \frac{K_{i1} V_{dc0}}{V_{r1} L_{b1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{b1}} & -\frac{1}{R_1 C_{b1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv1} & K_{v1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(11,6) & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{pv2} V_{dc0}}{V_{r2} L_{b2}} & \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{dc0} + 1}{V_{r2} L_{b2}} & \frac{K_{iv2} K_{pi2} V_{dc0}}{V_{r2} L_{b2}} & \frac{K_{i2} V_{dc0}}{V_{r2} L_{b2}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{b2}} & -\frac{1}{R_2 C_{b2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv2} & K_{v2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$a(5,7) = \frac{-2r_c K_{pi1} I_{lb01}}{V_{r1} L_{dc}} - \frac{r_c K_{pv1} K_{pi1} V_{o01}}{V_{r1} L_{dc}} + \frac{r_c K_{iv1} K_{pi1} X_{v01}}{V_{r1} L_{dc}} + \frac{r_c K_{i1} X_{i01}}{V_{r1} L_{dc}} + \frac{r_c K_{pv1} K_{pi1} V_{o01}^*}{V_{r1} L_{dc}}$$

$$a(6,7) = \frac{2K_{pi1} I_{lb01}}{V_{r1} C_{dc}} - \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{o01}}{V_{r1} C_{dc}} + \frac{K_{v1} K_{pi1} X_{v01}}{V_{r1} C_{dc}} + \frac{K_{i1} X_{i01}}{V_{r1} C_{dc}} + \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{o01}^*}{V_{r1} C_{dc}}$$

$$a(5,11) = \frac{-2r_c K_{pi2} I_{lb02}}{V_{r2} L_{dc}} - \frac{r_c K_{pv2} K_{pi2} V_{o02}}{V_{r2} L_{dc}} + \frac{r_c K_{iv2} K_{pi2} X_{v02}}{V_{r2} L_{dc}} + \frac{r_c K_{i2} X_{i02}}{V_{r2} L_{dc}} + \frac{r_c K_{pv2} K_{pi2} V_{o02}^*}{V_{r2} L_{dc}}$$

$$a(6,11) = \frac{2K_{pi2} I_{lb02}}{V_{r2} C_{dc}} - \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{o02}}{V_{r2} C_{dc}} + \frac{K_{v2} K_{pi2} X_{v02}}{V_{r2} C_{dc}} + \frac{K_{i2} X_{i02}}{V_{r2} C_{dc}} + \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{o02}^*}{V_{r2} C_{dc}}$$

$$a(7,6) = \frac{-2K_{pi1} I_{lb01}}{V_{r1} L_{b1}} - \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{o01}}{V_{r1} L_{b1}} + \frac{K_{v1} K_{pi1} X_{v01}}{V_{r1} L_{b1}} + \frac{K_{i1} X_{i01}}{V_{r1} L_{b1}} + \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{o01}^*}{V_{r1} L_{b1}}$$

$$a(11,6) = \frac{-2K_{pi2} I_{lb02}}{V_{r2} L_{b2}} - \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{o02}}{V_{r2} L_{b2}} + \frac{K_{v2} K_{pi2} X_{v02}}{V_{r2} L_{b2}} + \frac{K_{i2} X_{i02}}{V_{r2} L_{b2}} + \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{o02}^*}{V_{r2} L_{b2}}$$

14:14

$$B(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(\lambda) & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\lambda) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_c K_{pv1} K_{pv1} I_{lb01}}{V_{r1} L_{dc}} & \frac{r_c K_{pv2} K_{pv2} I_{lb02}}{V_{r2} L_{dc}} \\ 0 & \frac{K_{pv1} K_{pv1} I_{lb01}}{V_{r1} C_{dc}} & \frac{K_{pv2} K_{pv2} I_{lb02}}{V_{r2} C_{dc}} \\ 0 & \frac{K_{pv1} K_{pv1} V_{dc,0}}{V_{r1} L_{b1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & K_{pv1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{pv2} K_{pv2} V_{dc,0}}{V_{r2} L_{b2}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & K_{pv2} \end{bmatrix}$$

$$C(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 14}$$

$$D(x, u) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (4.5)$$

#### 4.2.4 การหาค่าในสภาวะคงตัว

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4.4) มีความสอดคล้องสำหรับการคำนวณหาค่า  $V_{dc,0}, I_{dc,0}, V_{o,01}, I_{Lb,01}, X_{v,01}, X_{i,01}, V_{o,02}, I_{Lb,02}, X_{v,02}, X_{i,02}, \lambda$  และ  $V_{bus}$  ซึ่ง  $\lambda$  และ  $V_{bus}$  สามารถหาได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัว ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 3.2 ดังนั้นค่าคงที่ในสภาวะคงตัวที่สอดคล้องกับแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4.4) สามารถคำนวณได้จากค่า  $\lambda$  และ  $V_{bus}$  โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.6)

$$\begin{cases} V_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2} V_{bus,0}) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,0} - r_L I_{dc,0} \\ V_{o,01} = V_{o1}^*, \quad V_{o,02} = V_{o2}^* \\ I_{L,01} = \frac{V_{o,01}}{R_1}, \quad I_{L,02} = \frac{V_{o,02}}{R_2} \\ X_{v,01} = \frac{I_{L,01}}{K_{iv1}}, \quad X_{v,02} = \frac{I_{L,02}}{K_{iv2}} \\ X_{i,01} = \frac{V_{o,01}}{K_{ii1} V_{dc,0}}, \quad X_{i,02} = \frac{V_{o,02}}{K_{ii2} V_{dc,0}} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$I_{dc,0} = \frac{\sqrt{3} \left| \frac{V_s e^{j0} - V_{bus} e^{-j\lambda}}{Z e^{j\gamma}} \right|}{\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi}}$$

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

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

#### 4.2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ

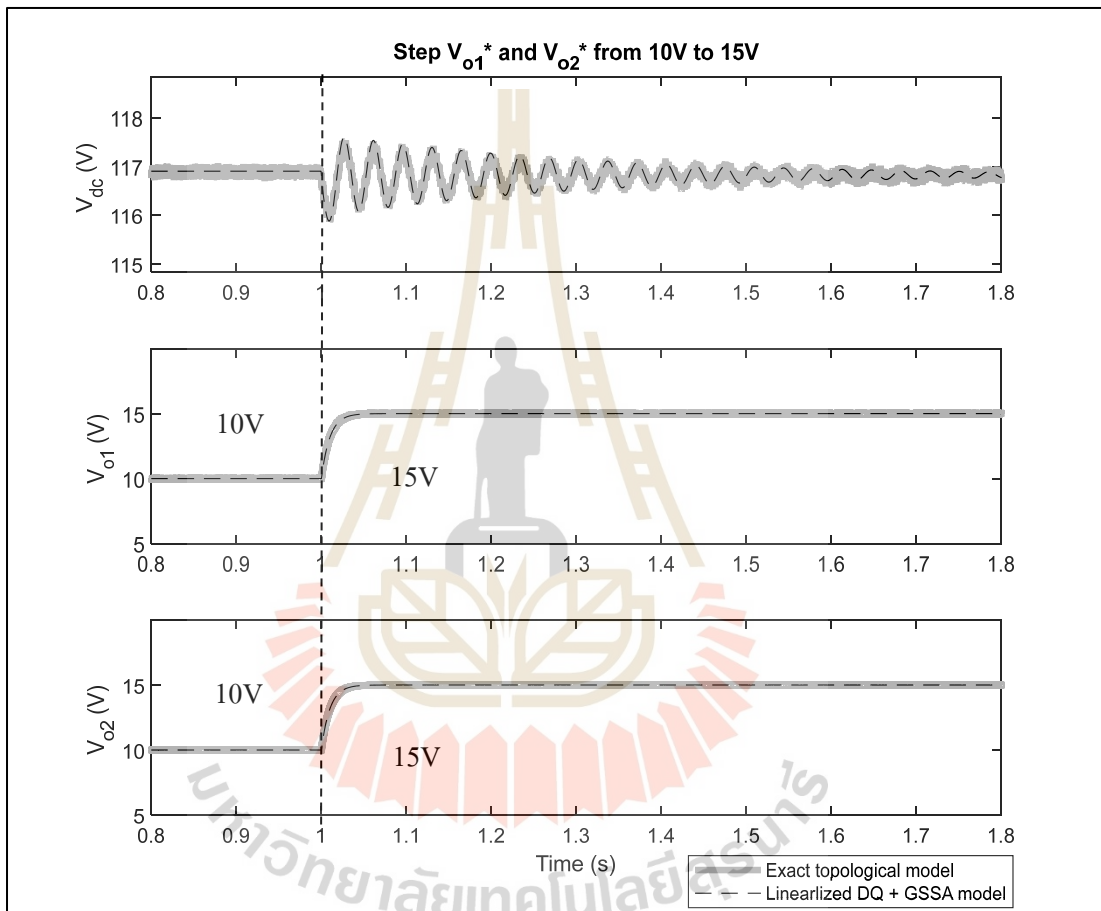
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ในสมการที่ (4.5) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 4.1 ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถดูได้ในภาคผนวกที่ ข.4 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงดังตารางที่ 4.1 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอจะอาศัยการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมตามขั้นตอนการออกแบบในหัวข้อที่ 3.3.4 ของบทที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังกล่าวโดยที่  $K_{pv1} = K_{pv2} = 0.1$ ,  $K_{iv1} = K_{iv2} = 10$ ,  $K_{pi1} = K_{pi2} = 0.7210$  และ  $K_{ii1} = K_{ii2} = 2060.1$  ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_s$	50 V <sub>rms</sub> /phase	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
$\omega$	$2\pi \times 50$ rad/sec.	ความถี่ของระบบ
$R_{eq}$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานภายในสายส่ง
$L_{eq}$	0.24 mH	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
$C_{eq}$	2 nF	ความเก็บประจุไฟฟ้าของสายส่ง
$r_L$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$r_c$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
$L_{dc}$	30 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$C_{dc}$	1000 $\mu$ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$L_1=L_2$	15 mH	ความเหนี่ยวนำของโพลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสคัก
$C_1=C_2$	1000 $\mu$ F	ความจุไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสคัก
$R_1=R_2$	10 $\Omega$	ความต้านทานของโพลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสคัก

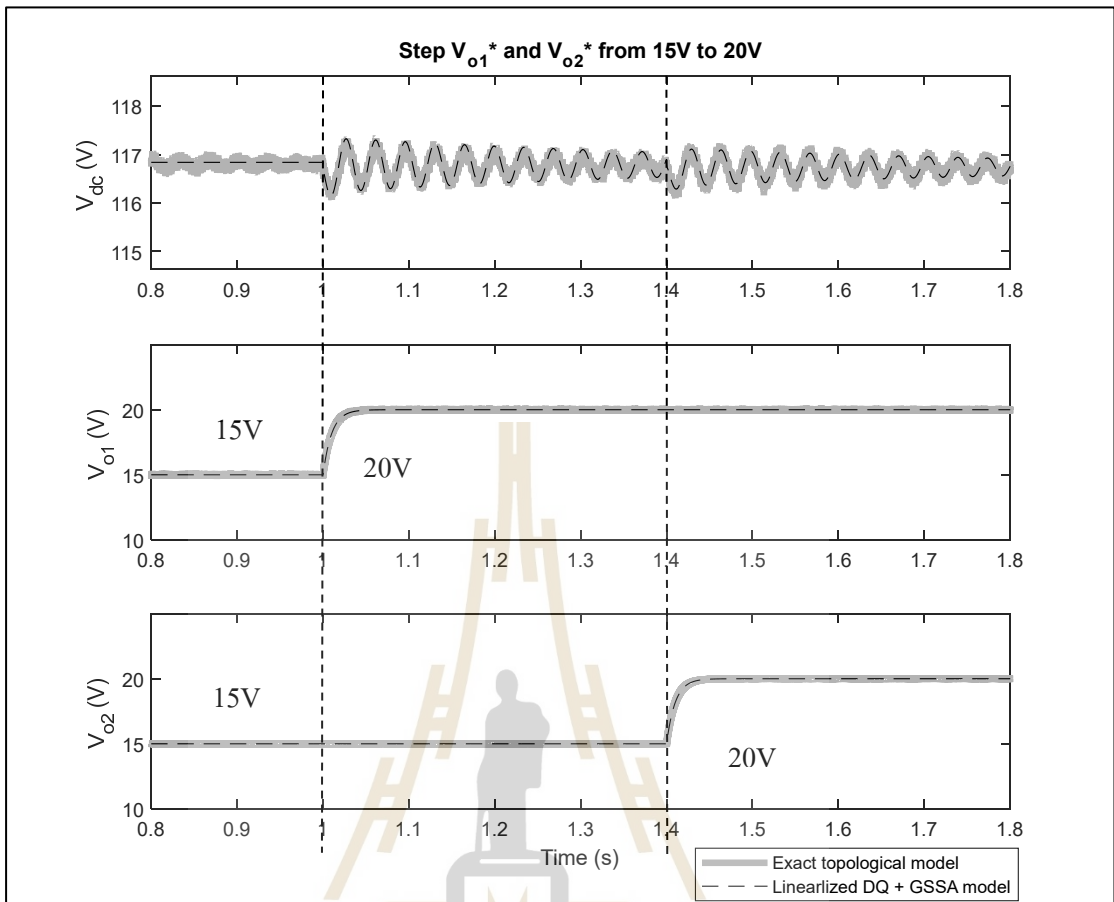
เงื่อนไขการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะดำเนินการโดยเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสคักชุดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ ) จาก 10 V ไป

เป็น 15 V และแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบuckชดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) จาก 10 V เป็น 15 V ที่เวลา 1 วินาที ซึ่งสามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.3 และในรูปที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบuckชดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ ) จาก 15 V เป็น 20 V ที่เวลา 1 วินาที และแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบuckชดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) จาก 15 V เป็น 20 V ที่เวลา 1.4 วินาที



รูปที่ 4.3 การจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.4 โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง  $V_{o1}^*$  และ  $V_{o2}^*$  จาก 10 V เป็น 15 V





รูปที่ 4.4 การจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิง  $V_{o1}^*$  และ  $V_{o2}^*$  จาก 15 V เป็น 20 V

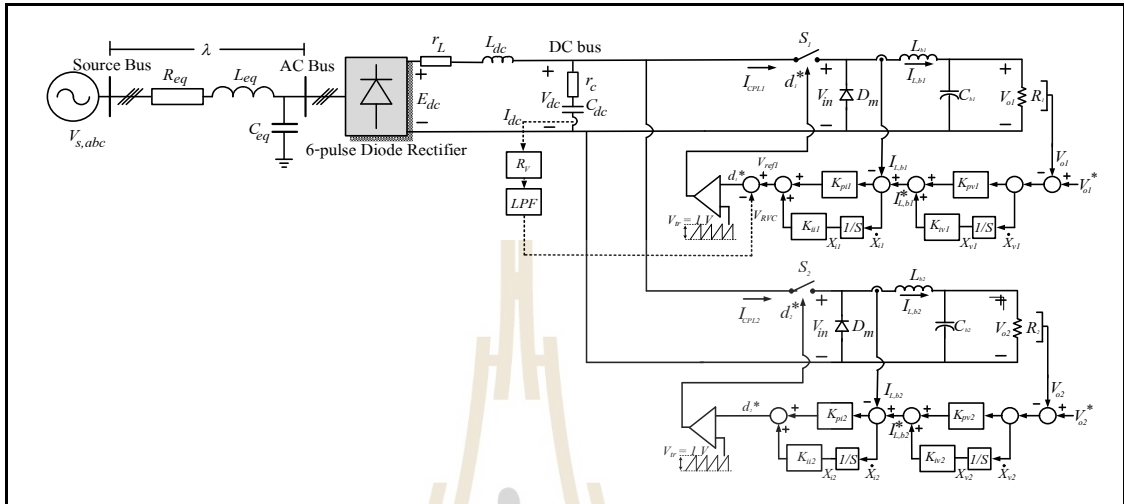
จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 พบว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีการสร้างมีความสอดคล้องกับผลการตอบสนองของชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะคงตัวซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ได้นั้นมีความถูกต้อง

#### 4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักก์ที่มีการควบคุมขนานกันและมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

##### 4.3.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ วงจรกรองสัญญาณดีซีและโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบักก์ที่มีการควบคุม 2 ชุด ต่อขนานกัน และ

มีชุดสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีเชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังแบบบักกิ้งในชุดที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.5



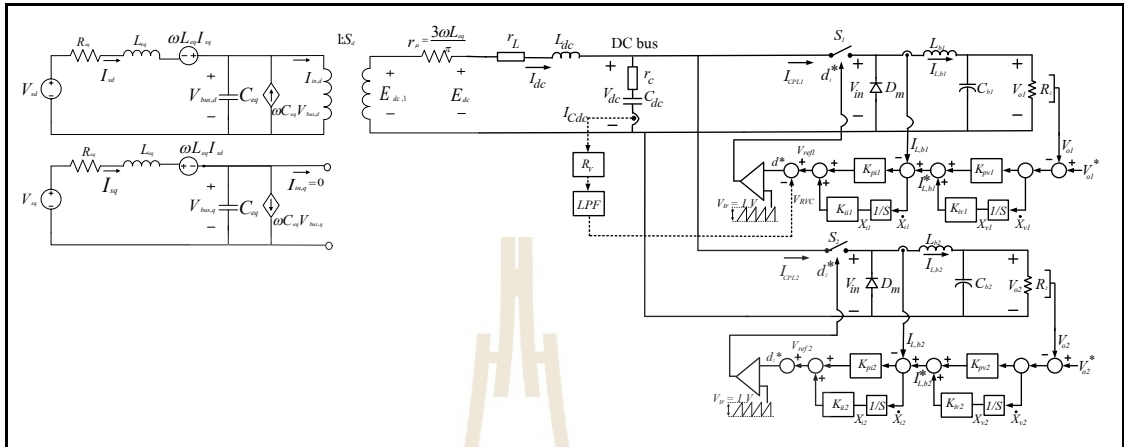
รูปที่ 4.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งขนานกันที่มีการควบคุมและมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

#### 4.3.2 หลักการการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งขนานกัน

การสร้างเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักกิ้งที่มีการควบคุม มีหลักการเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4 ของบทที่ 3 สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักกิ้งที่มีการควบคุม 2 ชุดขนานกันสามารถสร้างเสถียรภาพโดยทำการฉีดแรงดันชดเชยเข้าไปในระบบควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักกิ้งชุดที่ 1 เพียงชุดเดียวโดยมีพื้นฐานมาจากค่ากระแสของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง  $I_{Cdc}$  ซึ่งถูกขยายด้วยค่าอัตราขยาย  $R_r$  ซึ่งผลที่ได้จะเป็นการจำลองแรงดันตกเพิ่มมาในระบบไฟฟ้ากำลัง จากนั้นแรงดันตกที่ได้จะถูกกรองในวงจรกรองแบบผ่านต่ำ (Low-pass filter : LPF) ด้วยความถี่ตัดผ่าน  $\omega_k$  เพื่อที่จะใช้วิธีการบรรเทาเสถียรภาพแบบอาร์วีซีในย่านความถี่ต่ำ เมื่อมีการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้นสัญญาณของผลการจำลองแรงดันตกนี้จะไปลบออกจากแรงดันอ้างอิงในระบบควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักกิ้งชุดที่ 1 ( $V_{ref1}$ ) เพื่อสร้างสัญญาณไปปรับรูปร่างจันท์หน้าที่ (Duty cycle :  $d_1^*$ ) ของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse-width-modulation : PWM) ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักกิ้งชุดที่ 1 ใหม่ทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมมีเสถียรภาพมากขึ้น

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.5 พิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์สามารถแปลงวงจรให้อยู่บนแกนดีคว ดังขั้นตอนการสร้างด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 3.2

โดยกำหนดให้มุมเฟสการหมุนของสัญญาณการสวิตช์ ( $\theta_1 = \theta$ ) จะได้ว่าวงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุมชุดที่ 1 ดังรูปที่ 4.6 สัญญาณที่ถูกสร้างจากตัวควบคุมแบบพีไอเรียงต่อกัน จะถูกแทนด้วยตัวแปร  $V_{ref1}$  และค่ากระแสของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง  $I_{dc}$  ที่ถูกคูณด้วยค่าอัตราขยาย  $R_V$  จะถูกกรองในวงจรกรองแบบต่ำด้วยความถี่ตัดผ่าน  $\omega_c$  ซึ่งจะถูกแทนด้วยตัวแปร  $V_{RVC}$  ซึ่งได้รับการสร้างแล้วในหัวข้อที่ 3.4 ของบทที่ 3 ดังสมการที่ (4.7) ส่วนสัญญาณที่ถูกสร้างจากตัวควบคุมแบบพีไอเรียงต่อกันของวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุมชุดที่ 2 ถูกแทนด้วยตัวแปร  $d_2^*$

$$\begin{aligned} V_{RVC} &= R_V C_{dc} V_{dc,filter}^* \\ V_{RVC} &= R_V C_{dc} a V_{dc} - R_V C_{dc} a V_{dc,filter} \end{aligned} \tag{4.7}$$

เมื่อ  $a = R_{filter} C_{filter} = \frac{1}{\omega_c}$

โดยที่  $R_{filter}$  และ  $C_{filter}$  คือค่าตัวต้านทานในวงจรกรองผ่านต่ำและตัวเก็บประจุในวงจรกรองผ่านต่ำตามลำดับ

จากรูปที่ 4.6 พิจารณาสมการของตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ ทั้ง 2 ชุดสามารถแสดงสมการในรูปของ  $V_{ref}$  ดังสมการที่ (4.8)

$$V_{ref1} = \frac{K_{pi1}K_{pv1}V_{o1}^* - K_{pi1}K_{pv1}V_{o1} + K_{pi1}K_{iv1}X_{v1} - K_{pi1}I_{L,b1} + X_{i1}K_{ii1}}{V_{tr1}}$$

$$V_{ref2} = \frac{K_{pi2}K_{pv2}V_{o2}^* - K_{pi2}K_{pv2}V_{o2} + K_{pi2}K_{iv2}X_{v2} - K_{pi2}I_{L,b2} + X_{i2}K_{ii2}}{V_{tr2}}$$
(4.8)

จะได้ค่าวัฏจักรหน้าที่ที่ถูกปรับปรุงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้ชูดที่ 1 (Duty cycle :  $d_1^*$ ) และค่าวัฏจักรหน้าที่ที่ถูกปรับปรุงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้ชูดที่ 2 (Duty cycle :  $d_2^*$ ) ของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse-width-modulation : PWM) ของระบบไฟฟ้ารูปที่ 4.5 ดังสมการที่ (4.9)

$$d_1^* = \frac{V_{ref1} - V_{RVC}}{V_{tr1}}$$

$$d_2^* = \frac{V_{ref2}}{V_{tr2}}$$
(4.9)

โดยสามารถดำเนินการแทนค่า  $d_1$  และ  $d_2$  ในสมการที่ (4.1) ด้วย  $d_1^*$  และ  $d_2^*$  จากสมการที่ (4.9) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 4.5 โดยพิจารณาตัวควบคุมและตัวสร้างเสถียรภาพ ที่ได้รับการสร้างด้วยวิธีคิดร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยสถานะทั่วไป ดังสมการที่ (4.10)

$$\begin{cases}
\dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}}\right) \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) V_m \cos(\lambda) \\
\dot{I}_{sq} = -\frac{R_{eq}I_{sq}}{L_{eq}} - \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}}\right) \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) V_m \sin(\lambda) \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right) \left(\frac{I_{dc}}{C_{eq}}\right) \\
\dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\
\dot{I}_{dc} = \left(\frac{1}{L_{dc}}\right) \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right) V_{bus,d} - \frac{I_{dc}(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}} - \frac{K_{pv1}r_c I_{L,b1}^2}{V_{tr1}L_{dc}} \\
- \frac{K_{pv1}K_{pi1}r_c I_{L,b1}V_{o1}}{V_{tr1}L_{dc}} + \frac{K_{iv1}K_{pi1}r_c I_{L,b1}X_{v1}}{V_{tr1}L_{dc}} + \frac{K_{ii1}r_c I_{L,b1}X_{i1}}{V_{tr1}L_{dc}} + \frac{K_{pv1}K_{pi1}r_c I_{L,b1}V_{o1}^*}{V_{tr1}L_{dc}} \\
- \frac{K_{pv2}r_c I_{L,b2}^2}{V_{tr2}L_{dc}} - \frac{K_{pv2}K_{pi2}r_c I_{L,b2}V_{o2}}{V_{tr2}L_{dc}} + \frac{K_{iv2}K_{pi2}r_c I_{L,b2}X_{v2}}{V_{tr2}L_{dc}} + \frac{K_{ii2}r_c I_{L,b2}X_{i2}}{V_{tr2}L_{dc}} + \frac{K_{pv2}K_{pi2}r_c I_{L,b2}V_{o2}^*}{V_{tr2}L_{dc}} \\
+ \frac{R_v a V_{dc,filter} r_c I_{L,b1} C_{dc}}{V_{tr1}L_{dc}} - \frac{R_v a V_{dc} r_c I_{L,b1} C_{dc}}{V_{tr1}L_{dc}} \\
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi1}I_{L,b1}^2}{V_{tr1}C_{dc}} + \frac{K_{pv1}K_{pi1}I_{L,b1}V_{o1}}{V_{tr1}C_{dc}} - \frac{K_{iv1}K_{pi1}I_{L,b1}X_{v1}}{V_{tr1}C_{dc}} - \frac{K_{ii1}I_{L,b1}X_{i1}}{V_{tr1}C_{dc}} - \frac{K_{pv1}K_{pi1}I_{L,b1}V_{o1}^*}{V_{tr1}C_{dc}} \\
+ \frac{K_{pi2}I_{L,b2}^2}{V_{tr2}C_{dc}} + \frac{K_{pv2}K_{pi2}I_{L,b2}V_{o2}}{V_{tr2}C_{dc}} - \frac{K_{iv2}K_{pi2}I_{L,b2}X_{v2}}{V_{tr2}C_{dc}} - \frac{K_{ii2}I_{L,b2}X_{i2}}{V_{tr2}C_{dc}} - \frac{K_{pv2}K_{pi2}I_{L,b2}V_{o2}^*}{V_{tr2}C_{dc}} \\
+ \frac{R_v a V_{dc,filter} I_{L,b1}}{V_{tr1}} + \frac{R_v a V_{dc} I_{L,b1}}{V_{tr1}} \\
\dot{I}_{L,b1} = -\frac{K_{pi1}V_{dc}I_{L,b1}}{V_{tr1}L_{b1}} - \frac{K_{pv1}K_{pi1}V_{dc}V_{o1}}{V_{tr1}L_{b1}} + \frac{K_{iv1}K_{pi1}V_{dc}X_{v1}}{V_{tr1}L_{b1}} + \frac{K_{ii1}V_{dc}X_{i1}}{V_{tr1}L_{b1}} + \frac{K_{pv1}K_{pi1}V_{dc}V_{o1}^*}{V_{tr1}L_{b1}} - \frac{V_{o1}}{L_{b1}} \\
+ \frac{R_v a V_{dc,filter} V_{dc} C_{dc}}{V_{tr1}L_{b1}} - \frac{R_v a V_{dc}^2 C_{dc}}{V_{tr1}L_{b1}} \\
\dot{V}_o = \frac{I_{L,b1}}{C_{b1}} - \frac{V_{o1}}{R_1 C_{b1}} \\
\dot{X}_{v1} = V_{o1}^* - V_{o1} \\
\dot{X}_{i1} = -I_{L,b1} - K_{pv1}V_{o1} + K_{iv1}X_{v1} + K_{pi1}V_{o1}^* \\
\dot{I}_{L,b2} = -\frac{K_{pi2}V_{dc}I_{L,b2}}{V_{tr2}L_{b2}} - \frac{K_{pv2}K_{pi2}V_{dc}V_{o2}}{V_{tr2}L_{b2}} + \frac{K_{iv2}K_{pi2}V_{dc}X_{v2}}{V_{tr2}L_{b2}} + \frac{K_{ii2}V_{dc}X_{i2}}{V_{tr2}L_{b2}} + \frac{K_{pv2}K_{pi2}V_{dc}V_{o2}^*}{V_{tr2}L_{b2}} - \frac{V_{o2}}{L_{b2}} \\
\dot{V}_{o2} = \frac{I_{L,b2}}{C_{b2}} - \frac{V_{o2}}{R_2 C_{b2}} \\
\dot{X}_{v2} = V_{o2}^* - V_{o2} \\
\dot{X}_{i2} = -I_{L,b2} - K_{pv2}V_{o2} + K_{iv2}X_{v2} + K_{pi2}V_{o2}^* \\
\dot{V}_{dc,filter} = -aV_{dc,filter} + aV_{dc}
\end{cases} \quad (4.10)$$

### 4.3.3 การทำให้เป็นเชิงเส้น

จากสมการที่ (4.10) สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยวิธีการทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ดังสมการที่ (4.11)

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(x_0, u_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(x_0, u_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(x_0, u_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(x_0, u_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (4.11)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{x} &= [\delta I_{sd}, \delta I_{sq}, \delta V_{bus,d}, \delta V_{bus,q}, \delta I_{dc}, \delta V_{dc}, \delta I_{L,b1}, \delta V_{o1}, \delta X_{v1}, \delta X_{i1}, \delta I_{L,b2}, \delta V_{o2}, \delta X_{v2}, \delta X_{i2}, \delta V_{dc,filter}]^T \\ \delta \mathbf{u} &= [\delta V_m, \delta V_{o1}^*, \delta V_{o2}^*] \\ \delta \mathbf{y} &= [\delta V_{dc}, \delta V_{o1}, \delta V_{o2}]^T \end{aligned}$$

รายละเอียดของเมตริกซ์  $\mathbf{A}(x_0, u_0)$ ,  $\mathbf{B}(x_0, u_0)$ ,  $\mathbf{C}(x_0, u_0)$  และ  $\mathbf{D}(x_0, u_0)$  แสดงดังสมการที่ (4.12)

$$A(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_{v1} + r_L + r_c)}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} - \frac{R_v a r_c I_{Lb01} C_{dc}}{V_{v1} L_{dc}} & a(5,7) & -\frac{r_c K_{pv1} K_{pi1} I_{Lb01}}{V_{v1} L_{dc}} & \frac{r_c K_{pv1} K_{pi1} I_{Lb01}}{V_{v1} L_{dc}} & \frac{r_c K_{pi1} I_{Lb01}}{V_{v1} L_{dc}} & a(5,11) & -\frac{r_c K_{pv2} K_{pi2} I_{Lb02}}{V_{v2} L_{dc}} & \frac{r_c K_{pv2} K_{pi2} I_{Lb02}}{V_{v2} L_{dc}} & \frac{r_c K_{pi2} I_{Lb02}}{V_{v2} L_{dc}} & \frac{R_v a r_c I_{Lb01} C_{dc}}{V_{v1} L_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & \frac{R_v a I_{Lb01}}{V_{v1}} & a(6,7) & \frac{K_{pv1} K_{pi1} I_{Lb01}}{V_{v1} C_{dc}} & -\frac{K_{pv1} K_{pi1} I_{Lb01}}{V_{v1} C_{dc}} & -\frac{K_{pi1} I_{Lb01}}{V_{v1} C_{dc}} & a(6,11) & \frac{K_{pv2} K_{pi2} I_{Lb02}}{V_{v2} C_{dc}} & -\frac{K_{pv2} K_{pi2} I_{Lb02}}{V_{v2} C_{dc}} & -\frac{K_{pi2} I_{Lb02}}{V_{v2} C_{dc}} & -\frac{R_v a I_{Lb01}}{V_{v1}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & \frac{K_{pv1} V_{dc0}}{V_{v1} L_{b1}} & \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{dc0} + 1}{V_{v1} L_{b1}} & \frac{K_{pi1} V_{dc0}}{V_{v1} L_{b1}} & \frac{K_{pi1} V_{dc0}}{V_{v1} L_{b1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_v a V_{dc0} C_{dc}}{V_{v1} L_{b1}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{b1}} & -\frac{1}{R C_{b1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv1} & K_{pv1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(11,6) & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{pv2} V_{dc0}}{V_{v2} L_{b2}} & -\frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{dc0} + 1}{V_{v2} L_{b2}} & \frac{K_{pi2} V_{dc0}}{V_{v2} L_{b2}} & \frac{K_{pi2} V_{dc0}}{V_{v2} L_{b2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{b2}} & -\frac{1}{R C_{b2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{pv2} & K_{pv2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & - \end{bmatrix}$$

$$a(5,7) = \frac{-2r_c K_{pv1} I_{Lb,01}}{V_{v1} L_{dc}} - \frac{r_c K_{pv1} K_{pi1} V_{o,01}}{V_{v1} L_{dc}} + \frac{r_c K_{iv1} K_{pi1} X_{v,01}}{V_{v1} L_{dc}} + \frac{r_c K_{ii1} X_{i,01}}{V_{v1} L_{dc}} + \frac{r_c K_{pv1} K_{pi1} V_{o,01}^*}{V_{v1} L_{dc}} \quad a(7,7) = \frac{K_{pv1} I_{Lb,01}}{V_{v1} C_{dc}} - \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{o,01}}{V_{v1} C_{dc}} + \frac{K_{iv1} K_{pi1} X_{v,01}}{V_{v1} C_{dc}} + \frac{K_{ii1} X_{i,01}}{V_{v1} C_{dc}} + \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{o,01}^*}{V_{v1} C_{dc}}$$

$$a(5,11) = \frac{-2r_c K_{pv2} I_{Lb,02}}{V_{v2} L_{dc}} - \frac{r_c K_{pv2} K_{pi2} V_{o,02}}{V_{v2} L_{dc}} + \frac{r_c K_{iv2} K_{pi2} X_{v,02}}{V_{v2} L_{dc}} + \frac{r_c K_{ii2} X_{i,02}}{V_{v2} L_{dc}} + \frac{r_c K_{pv2} K_{pi2} V_{o,02}^*}{V_{v2} L_{dc}} \quad a(6,11) = \frac{K_{pv2} I_{Lb,02}}{V_{v2} C_{dc}} - \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{o,02}}{V_{v2} C_{dc}} + \frac{K_{iv2} K_{pi2} X_{v,02}}{V_{v2} C_{dc}} + \frac{K_{ii2} X_{i,02}}{V_{v2} C_{dc}} + \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{o,02}^*}{V_{v2} C_{dc}}$$

$$a(7,6) = \frac{-2K_{pv1} I_{Lb,01}}{V_{v1} L_{b1}} - \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{o,01}}{V_{v1} L_{b1}} + \frac{K_{iv1} K_{pi1} X_{v,01}}{V_{v1} L_{b1}} + \frac{K_{ii1} X_{i,01}}{V_{v1} L_{b1}} + \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{o,01}^*}{V_{v1} L_{b1}} - \frac{R_v a V_{dc,0} C_{dc}}{V_{v1} L_{b1}} \quad a(11,6) = -\frac{K_{pv2} I_{Lb,02}}{V_{v2} L_{b2}} - \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{o,02}}{V_{v2} L_{b2}} + \frac{K_{iv2} K_{pi2} X_{v,02}}{V_{v2} L_{b2}} + \frac{K_{ii2} X_{i,02}}{V_{v2} L_{b2}} + \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{o,02}^*}{V_{v2} L_{b2}}$$



$$B(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(\lambda) & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\lambda) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_c K_{pv1} K_{pi1} I_{Lb01}}{V_{tr1} L_{dc}} & \frac{r_c K_{pv2} K_{pi2} I_{Lb02}}{V_{tr2} L_{dc}} \\ 0 & -\frac{K_{pv1} K_{pi1} I_{Lb01}}{V_{tr1} C_{dc}} & -\frac{K_{pv2} K_{pi2} I_{Lb02}}{V_{tr2} C_{dc}} \\ 0 & \frac{K_{pv1} K_{pi1} V_{dc,0}}{V_{tr1} L_{b1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & K_{pv1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{pv2} K_{pi2} V_{dc,0}}{V_{tr2} L_{b2}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & K_{pv2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{15 \times 3} \quad (4.12)$$

$$, C(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 15}, D(x, u) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

#### 4.3.4 การหาค่าในสถานะคงตัว

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4.11) มีความสอดคล้องสำหรับการคำนวณค่า  $V_{dc,0}, I_{dc,0}, V_{o,01}, I_{Lb,01}, X_{v,01}, X_{i,01}, V_{o,02}, I_{Lb,02}, X_{v,02}, X_{i,02}, V_{dc,filter0}, \lambda$  และ  $V_{bus}$  ซึ่ง  $\lambda$  และ  $V_{bus}$  สามารถหาได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว ซึ่งได้วิเคราะห์ในหัวข้อที่ 3.2 ของบทที่ 3 ดังนั้นค่าคงที่ในสถานะคงตัวที่สอดคล้องกับแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4.11) สามารถคำนวณได้จากค่า  $\lambda$  และ  $V_{bus}$  โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.13)

$$\begin{cases}
 V_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \left( \sqrt{2} V_{bus,0} \right) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,0} - r_L I_{dc,0} \\
 V_{o,01} = V_{o1}^*, V_{o,02} = V_{o2}^* \\
 I_{L,01} = \frac{V_{o,01}}{R_1}, I_{L,02} = \frac{V_{o,02}}{R_2} \\
 X_{V,01} = \frac{I_{L,01}}{K_{iv1}}, X_{V,02} = \frac{I_{L,02}}{K_{iv2}} \\
 X_{i,01} = \frac{V_{o,01}}{K_{ii1} V_{dc,0}}, X_{i,02} = \frac{V_{o,02}}{K_{ii2} V_{dc,0}} \\
 V_{dc,filter0} = V_{dc,0}
 \end{cases} \quad (4.13)$$

เมื่อ

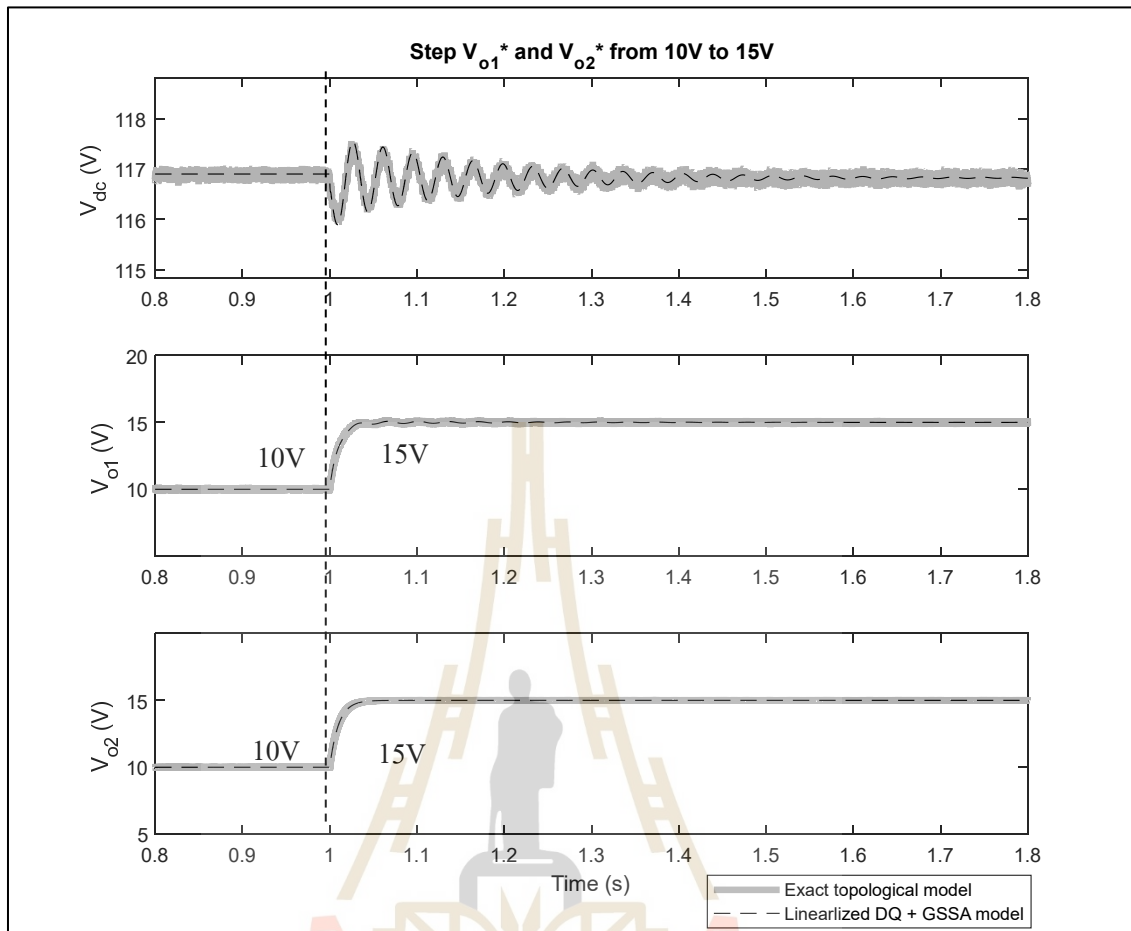
$$I_{dc,0} = \frac{\sqrt{3} \left| \frac{V_s e^{j0} - V_{bus} e^{-j\lambda}}{Z e^{j\gamma}} \right|}{\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi}}$$

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

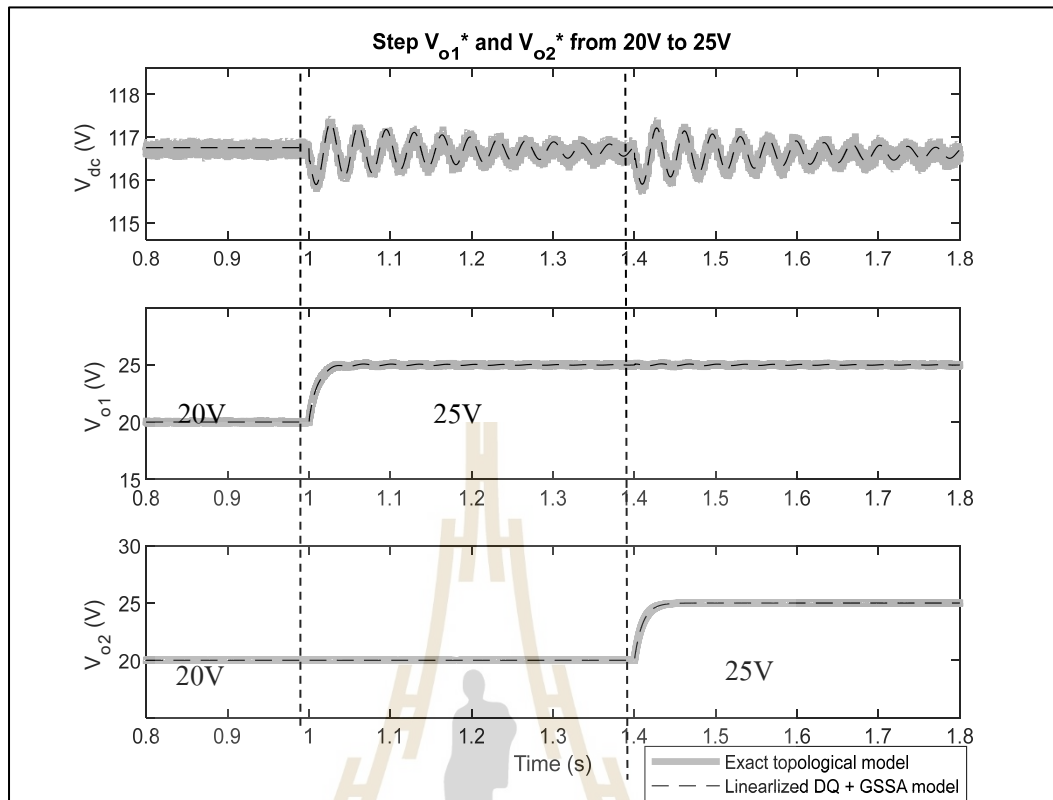
$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \right)$$

#### 4.3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ในสมการที่ (4.11) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 4.5 ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถดูได้ในภาคผนวกที่ ข.5 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงดังตารางที่ 4.1 เมื่อกำหนดให้  $R_v = 2.5$  และ  $a = 300$  โดยเงื่อนไขการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะดำเนินการโดยเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชูดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ ) จาก 10 V เป็น 15 V ที่เวลา 1 วินาที และแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชูดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) จาก 10 V เป็น 15 V ที่เวลา 1 วินาที ตามลำดับ ซึ่งแสดงผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชูดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ ) จาก 20 V เป็น 25 V ที่ 1 วินาที และแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชูดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) จาก 20 V เป็น 25 V ที่ 1.4 วินาที



รูปที่ 4.7 การจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.5 โดยเปลี่ยน  $V_{o1}^*$  และ  $V_{o2}^*$  จาก 10 V เป็น 15 V



รูปที่ 4.8 การจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.5 โดยเปลี่ยน  $V_{o1}^*$  และ  $V_{o2}^*$  จาก 20 V เป็น 25 V

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 พบว่าผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการสร้างมีความสอดคล้องกับผลการตอบสนองของชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัวซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ได้นั้นมีความถูกต้อง

#### 4.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริจด์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบซิงค์ขนานกันกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม กรณีที่มีตัวควบคุม และกรณีที่มีตัวควบคุมพร้อมกับวงจรสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี โดยใช้วิธีตีคว่ำร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ที่อาศัยองค์ความรู้พื้นฐานในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การทำให้เป็นเชิงเส้น และการหาค่าในสภาวะคงตัวจากบทที่ 3 และทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ในบทนี้สอดคล้องกับผลการตอบสนองของชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามเวลาที่ได้รับการสร้างในบทนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงในบทที่ 5 ต่อไป



## บทที่ 5

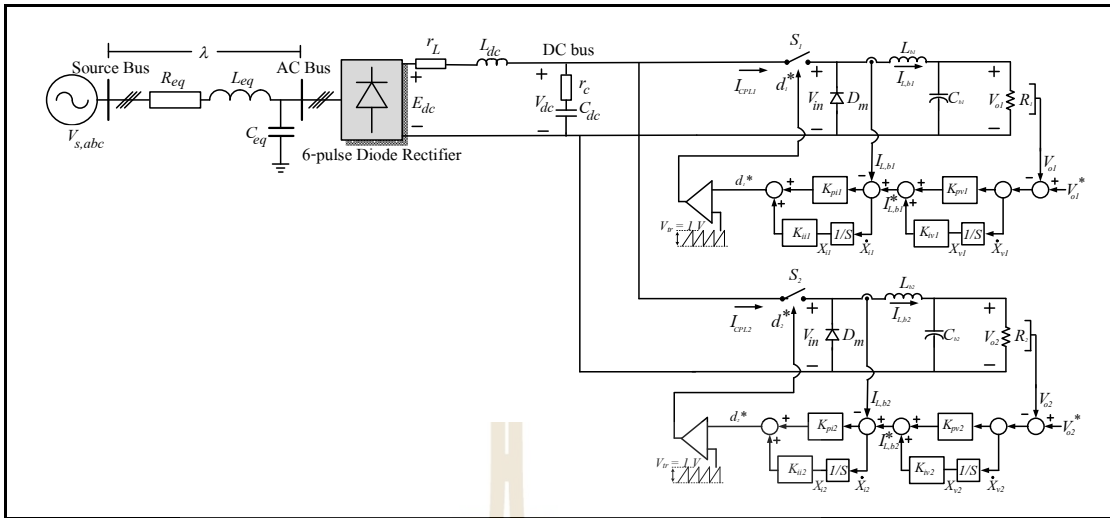
### การสร้างเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชานกันด้วยวิธีอาร์วีซี

#### 5.1 บทนำ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าทำให้ทราบถึงจุดการทำงานของระบบไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการขาดเสถียรภาพ อีกทั้งยังเป็นการหลีกเลี่ยงการทำงานของระบบไฟฟ้าในจุดการทำงานดังกล่าว รวมถึงการเลือกพารามิเตอร์ที่นำไปใช้สำหรับการสร้างเสถียรภาพได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชานกันที่มีการควบคุมสำหรับกรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี และกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี โดยอาศัยทฤษฎีค่าเจาะจงพร้อมผลการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

#### 5.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชานกัน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชานกันในรูปที่ 5.1 ที่ได้รับการสร้างจากหัวข้อที่ 4.2 ของบทที่ 4 ดังสมการที่ 5.1 มีความจำเป็นสำหรับการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียน  $A(x_0, u_0)$  ดังสมการที่ (5.2)



รูปที่ 5.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักก์  
ที่มีการควบคุม 2 ชุดต่อขนานกัน

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(x_0, u_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(x_0, u_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(x_0, u_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(x_0, u_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (5.1)$$

$$\delta \mathbf{x} = [\delta I_{sd}, \delta I_{sq}, \delta V_{bus,d}, \delta V_{bus,q}, \delta I_{dc}, \delta V_{dc}, \delta I_{L,b1}, \delta V_{o1}, X_{v1}, X_{i1}, \delta I_{L,b2}, \delta V_{o2}, X_{v2}, X_{i2}]^T$$

เมื่อ  $\delta \mathbf{u} = [\delta V_m, \delta V_{o1}^*, \delta V_{o2}^*]$

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

$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (5.2)$$

โดยระบบจะมีความเสถียรภาพดังเงื่อนไขในสมการที่ (5.3)

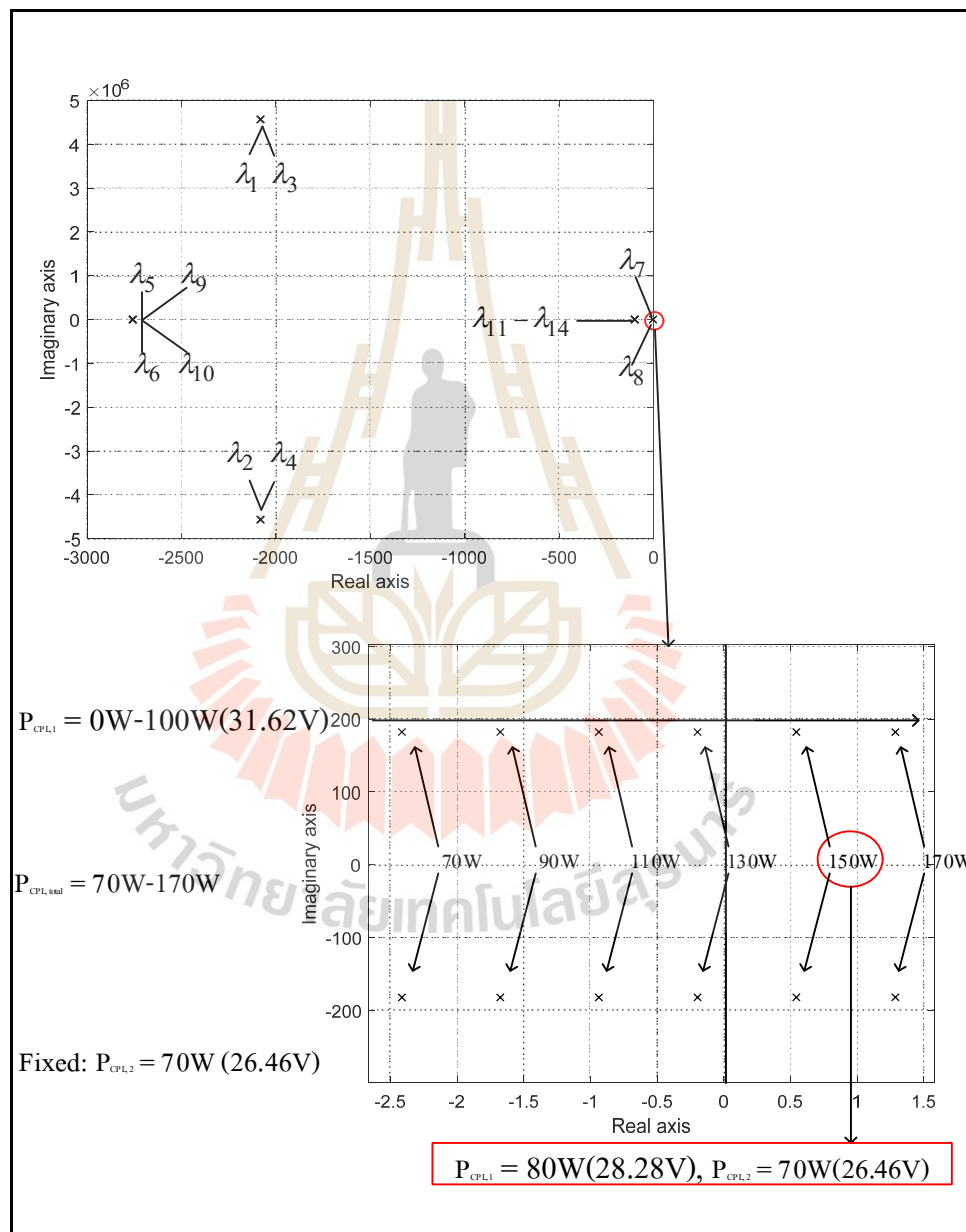
$$\text{real}(\lambda_i) < 0 \quad (5.3)$$

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

การตรวจสอบเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ขนานกันในรูปที่ 5.1 ทำได้โดยใช้ทฤษฎีค่าเจาะจง โดยที่ค่าเจาะจงที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ประกอบด้วย  $\lambda_1 - \lambda_4$  โดยค่าเจาะจงสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ



จะพิจารณาเฉพาะขั้วเด่นที่มีเส้นทางการเคลื่อนที่ในบริเวณที่มีค่าใกล้เคียง 0 เนื่องจากเป็นค่าเจาะจงที่มีผลต่อเสถียรภาพมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของโพลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ ชุดที่ 1 ( $P_{CPL,1}$ ) จาก 0 W -100 W (31.62 V) โดยกำหนดให้โพลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ชุดที่ 2 มีกำลังไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 70 W (26.46 V) และค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ของระบบไฟฟ้าจะพิจารณาเช่นเดียวกับในบทที่ 4 ของตารางที่ 4.1

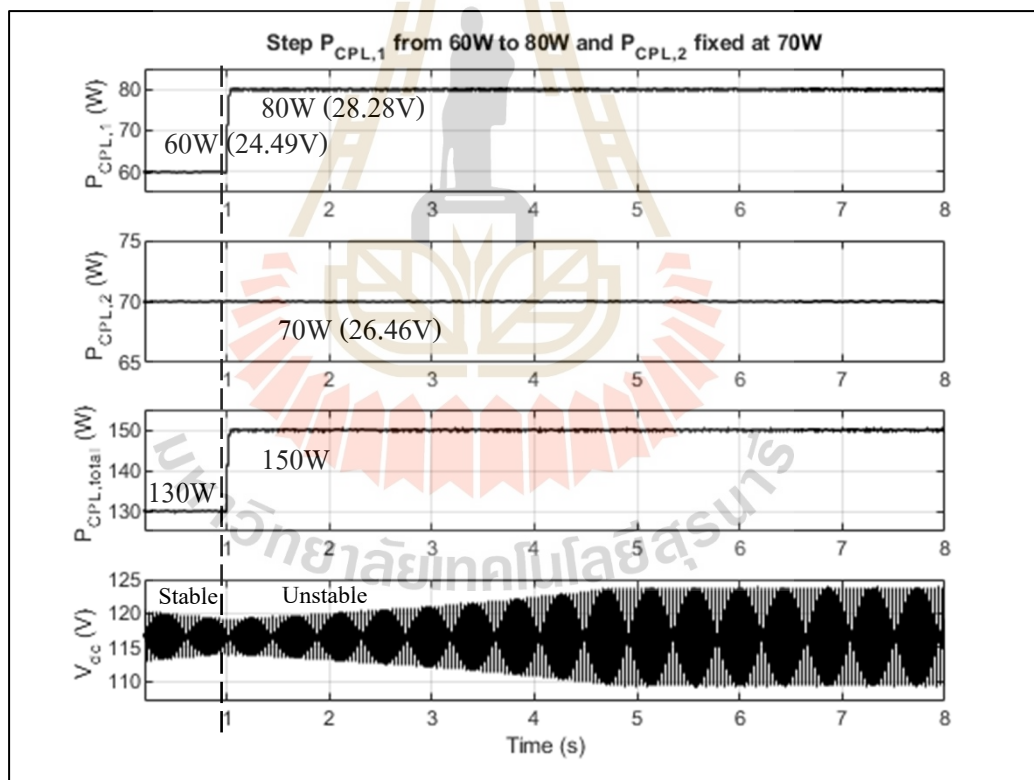


รูปที่ 5.2 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากรูปที่ 5.2 สังเกตได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถเปลี่ยนไปเป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพได้เมื่อโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ชดที่ 1 มีค่า 80 W (28.28 V) หรือผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL,total}$ ) มีค่า 150 W ดังสมการที่ (5.4)

$$P_{CPL,total} = P_{CPL,1} + P_{CPL,2} \quad (5.4)$$

การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ชดที่มีการควบคุม 2 ชุด ขนานกันในรูปที่ 5.1 จะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้กำลังเช่นเดียวกับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้กำลังที่นำเสนอในบทที่ 3 และ บทที่ 4 โดยผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 5.3



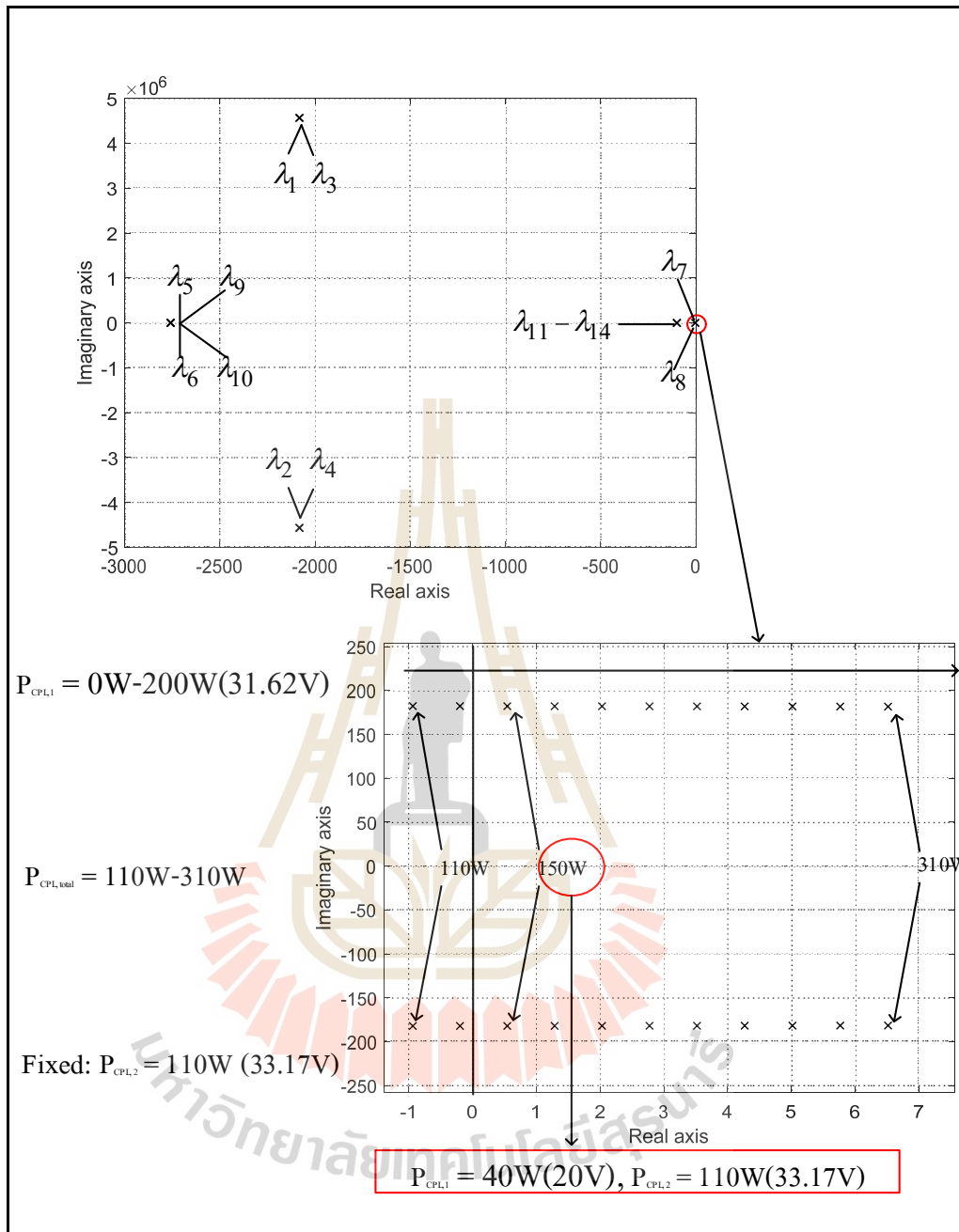
รูปที่ 5.3 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 5.3 สังเกตได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเปลี่ยนไปเป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพได้เมื่อผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL,total}$ ) มีค่า 150 W จะทำให้แรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) เกิดการ

กระเพื่อมเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นที่อาศัยทฤษฎีค่าเจาะจงมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพนั้นสามารถคาดเดาจุดการทำงานที่ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ยังสามารถนำทฤษฎีค่าเจาะจงมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์ผลการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีได้ในหัวข้อที่ 5.3

การตรวจสอบเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ขนานกันในรูปแบบที่ 5.1 เมื่อพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของโหลด วงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ ชุดที่ 1 ( $P_{CPL,1}$ ) จาก 0 W -200 W (44.72V) โดยกำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ชุดที่ 2 มีกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากเดิม 70 W (26.46 V) เป็น 110 W (33.17 V) แสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงได้ดังรูปที่ 5.4

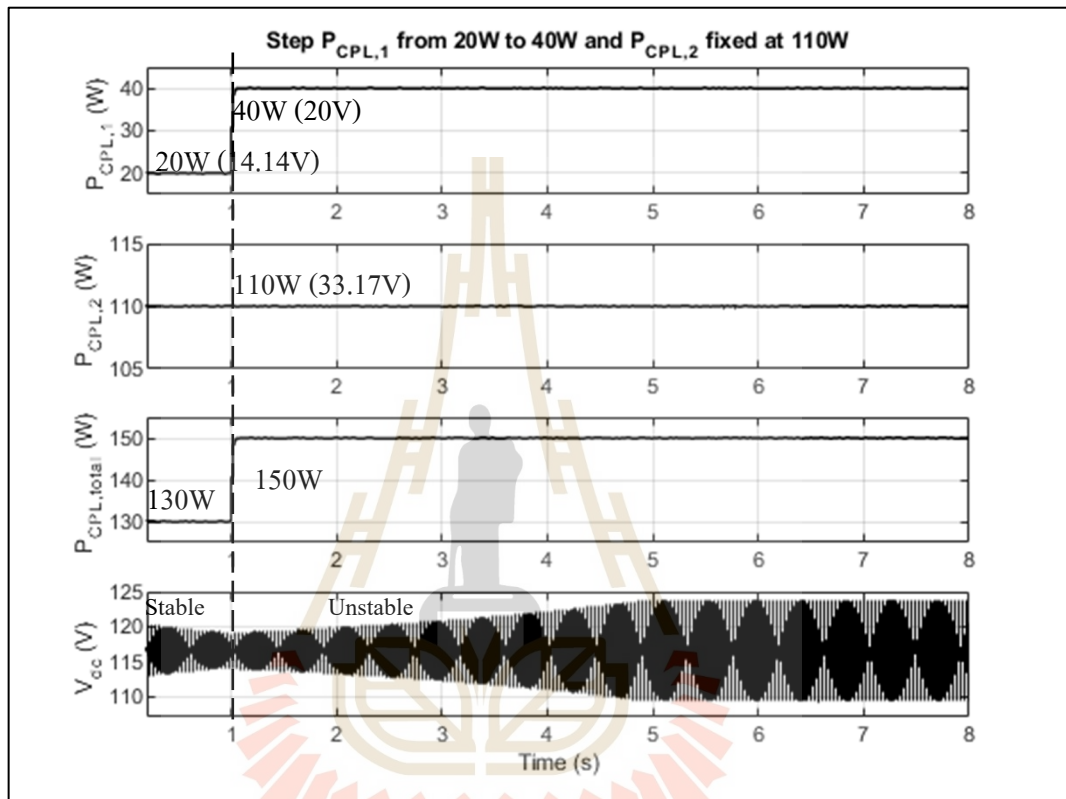




รูปที่ 5.4 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่ 2 มีค่าคงที่ 110 W (33.17 V)

จากรูปที่ 5.4 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถเปลี่ยนไปเป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพได้เมื่อโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชุดที่ 2 มีค่า 110 W (33.17 V) และโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชุดที่ 1 มีค่า 40 W (20 V) ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ให้วงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชุดที่ 2 มีกำลังไฟฟ้า 70 W (26.46 V) โดยที่ผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL,total}$ ) มีค่า 150 W ซึ่งการยืนยันผลการ

วิเคราะห์ของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงดังรูปที่ 5.5 โดยที่มีการปรับตั้งค่าโหลดดวงจรแปลงผันแบบบักค์ชูดที่ 2 มีค่าคงที่ 110 W (33.17 V) และโหลดดวงจรแปลงผันแบบบักค์ชูดที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 W (14.14V) ไปเป็น 40 W (20 V) ที่เวลา 1 วินาที



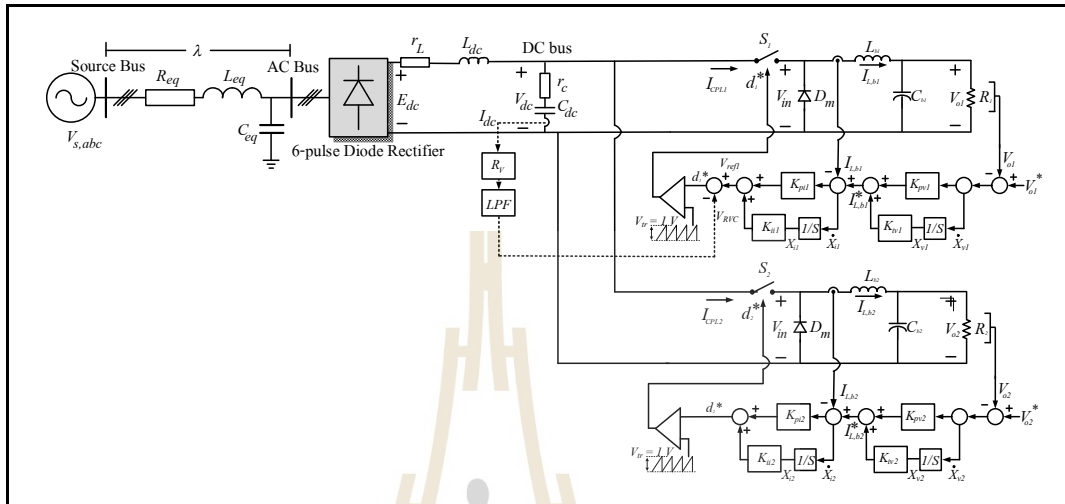
รูปที่ 5.5 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ กรณีวงจรแปลงผันแบบบักค์ชูดที่ 2 มีค่าคงที่ 110 W (33.17 V)

จากรูปที่ 5.5 สังเกตได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเปลี่ยนไปเป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพได้เมื่อผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL,total}$ ) มีค่า 150 W จะทำให้แรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) เกิดการกระเพื่อมเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

### 5.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ขนานกันและมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด วงจรแปลงผันแบบบักค์ขนานกันและมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีในรูปที่ 5.6 ที่ได้จากการสร้าง ในหัวข้อที่ 4.3 ในบทที่ 4 แสดงดังสมการที่ 5.5 ประกอบด้วย  $\lambda_1 - \lambda_{15}$  สามารถนำไปใช้ในการ

ตรวจสอบเสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเช่นเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมา โดยค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียน  $A(x_0, u_0) \delta x$  ดังสมการที่ (5.6)



รูปที่ 5.6 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักค์ขนานกันที่มีการควบคุมและมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

$$\begin{cases} \delta \dot{x} = A(x_0, u_0) \delta x + B(x_0, u_0) \delta u \\ \delta y = C(x_0, u_0) \delta x + D(x_0, u_0) \delta u \end{cases} \quad (5.5)$$

เมื่อ  $\delta x = [\delta I_{sd}, \delta I_{sq}, \delta V_{bus,d}, \delta V_{bus,q}, \delta I_{dc}, \delta V_{dc}, \delta I_{L,b1}, \delta V_{o1}, \delta X_{v1}, \delta X_{i1}, \delta I_{L,b2}, \delta V_{o2}, \delta X_{v2}, \delta X_{i2}]^T$   
 $\delta u = [\delta V_m, \delta V_{o1}^*, \delta V_{o2}^*]$   
 $\delta y = [\delta V_{dc}, \delta V_{o1}, \delta V_{o2}]^T$

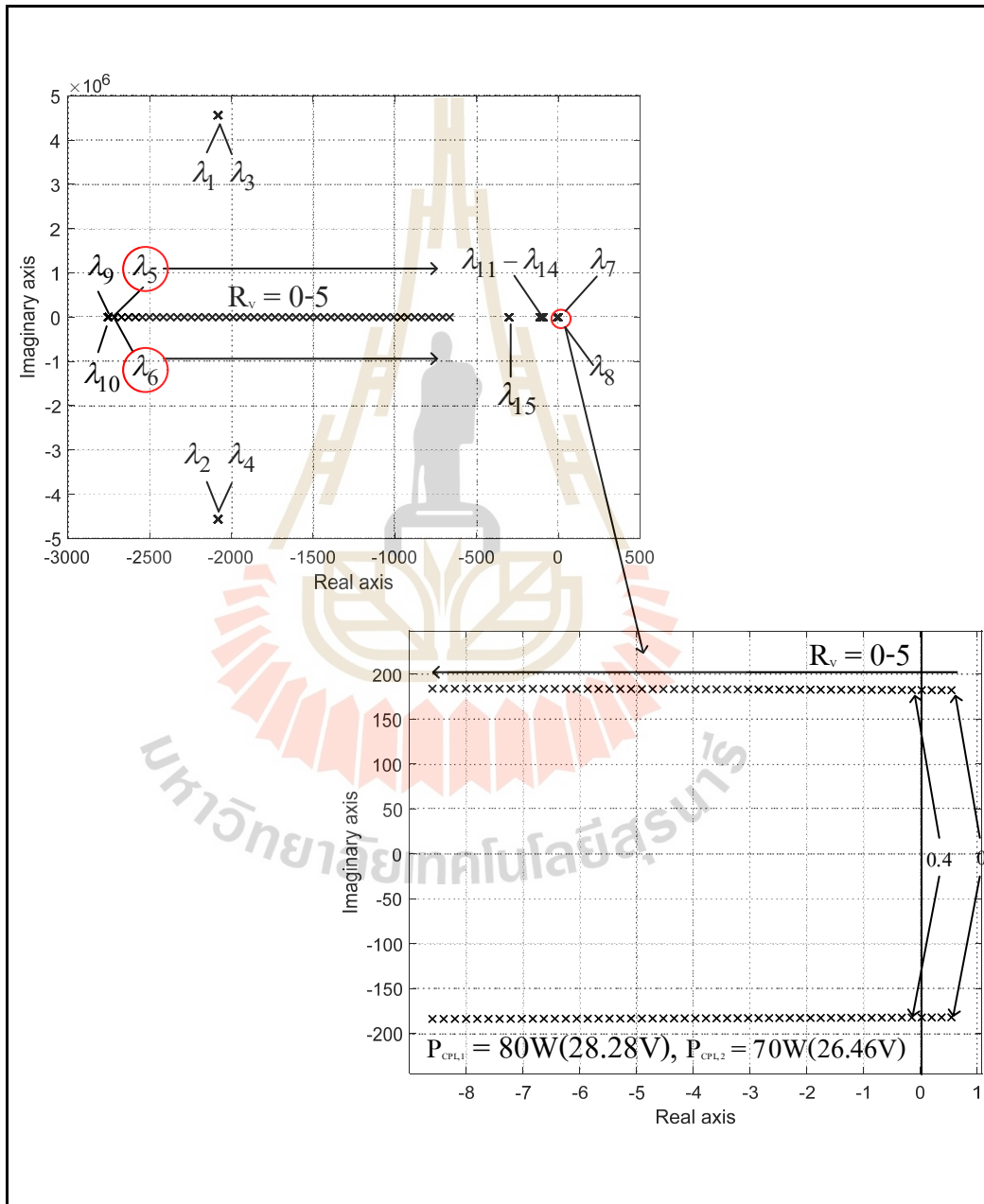
$$\det[\lambda I - A] = 0 \quad (5.6)$$

โดยระบบจะมีความเสถียรภาพตั้งเงื่อนไขในสมการที่ (5.7)

$$\text{real}(\lambda) < 0 \quad (5.7)$$

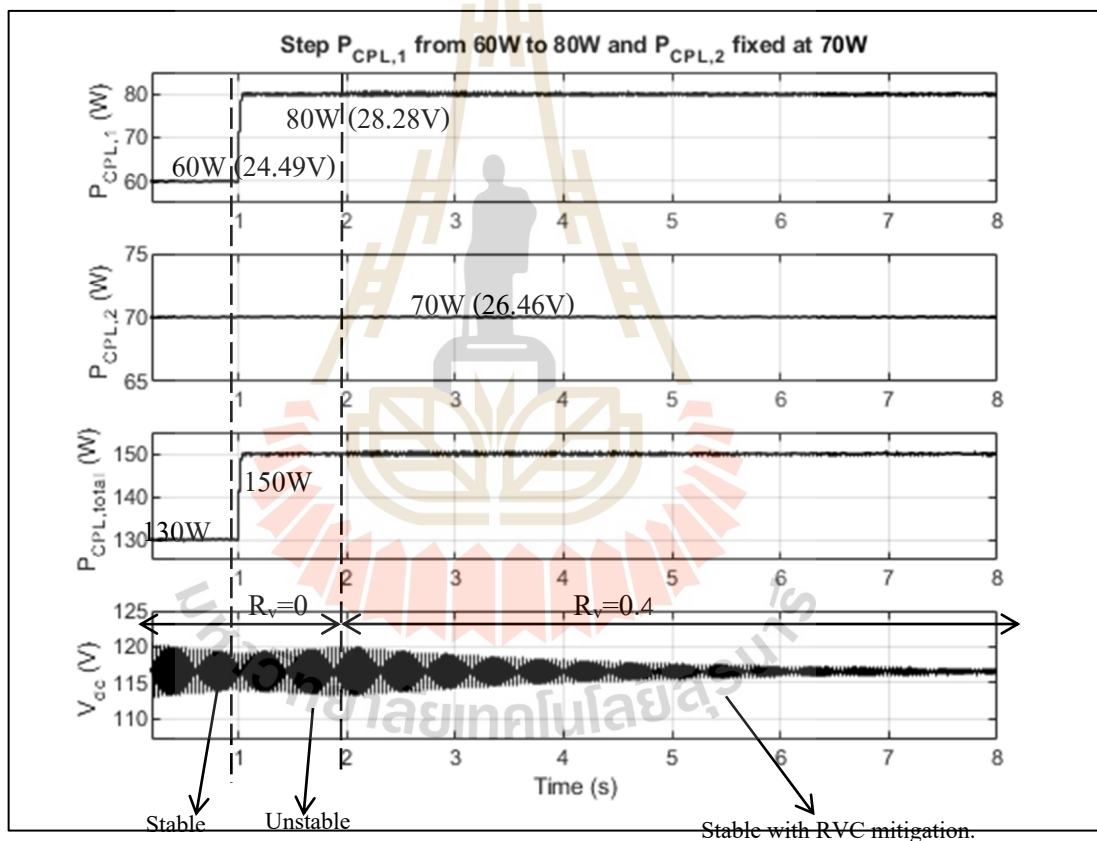
เมื่อ  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  (โดยที่  $n$  คือจำนวนตัวแปรสถานะของระบบ)

การตรวจสอบเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีดังรูปที่ 5.7 จะพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของ  $R_v$  จาก 0 ถึง 5 โดยกำหนดให้ค่าระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์รวม ( $P_{CPL,total}$ ) มีขนาด 150 W ประกอบไปด้วยวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ชดที่ 1 ( $P_{CPL,1}$ ) มีกำลังไฟฟ้าขนาด 80 W และโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ชดที่ 2 ( $P_{CPL,2}$ ) มีค่ากำลังไฟฟ้าขนาด 70 W



รูปที่ 5.7 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า  $R_v$  ที่มีผลต่อเสถียรภาพโดยที่กำหนดให้ผลรวมของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชดมีค่า 150 W

จากรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 150 W ที่ค่า  $R_v$  มีค่าเท่ากับ 0 (ยังไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี) ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ และเมื่อค่า  $R_v$  มีค่าเป็น 0.4 (วงจรการสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีเริ่มทำงาน) ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่ทำให้ขั้วเด่นของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งขวามาอยู่ที่ฝั่งซ้ายของระนาบเอส ซึ่งหมายถึงระบบที่ขาดเสถียรภาพสามารถกลับมาเสถียรภาพได้อีกครั้ง ซึ่งการยืนยันผลการวิเคราะห์ของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงดังรูปที่ 5.8 โดยที่มีการปรับตั้งค่าโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุตที่ 2 มีค่าคงที่ 70 W (26.46 V) และโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุตที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงจาก 60 W (24.49 V) ไปเป็น 80 W (28.28 V) ที่เวลา 1 วินาที และที่เวลา 2 วินาทีได้กำหนดให้วงจรสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีเริ่มทำงานโดยกำหนดให้ค่า  $R_v$  มีค่าเท่ากับ 0.4



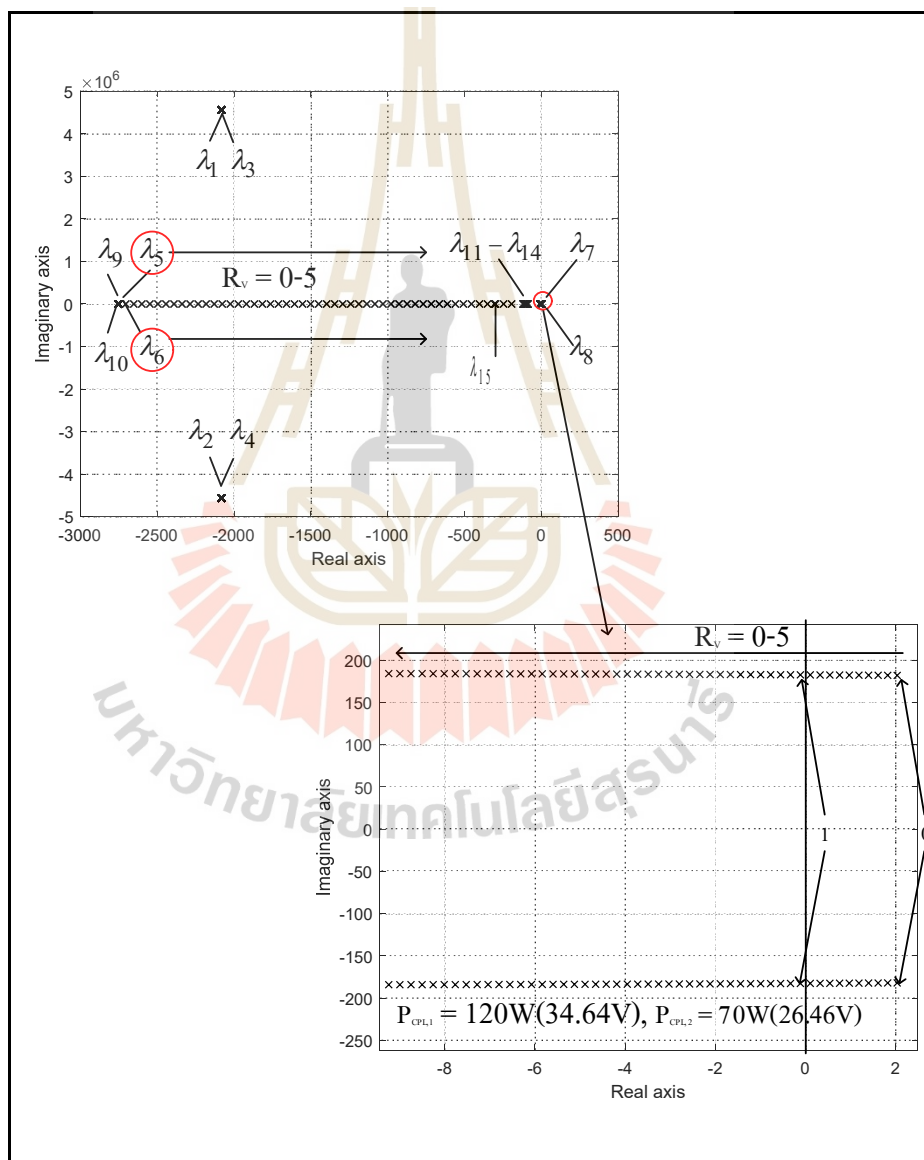
รูปที่ 5.8 การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพเมื่อผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุตมีค่าเท่ากับ 150 W

จากรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุตมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 80 W ไปเป็น 150 W ที่เวลา 1 วินาที จะให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัสดีซีที่มีค่าสูง และภายหลังจากที่เวลา 2 วินาทีที่กำหนดให้วงจรสร้าง



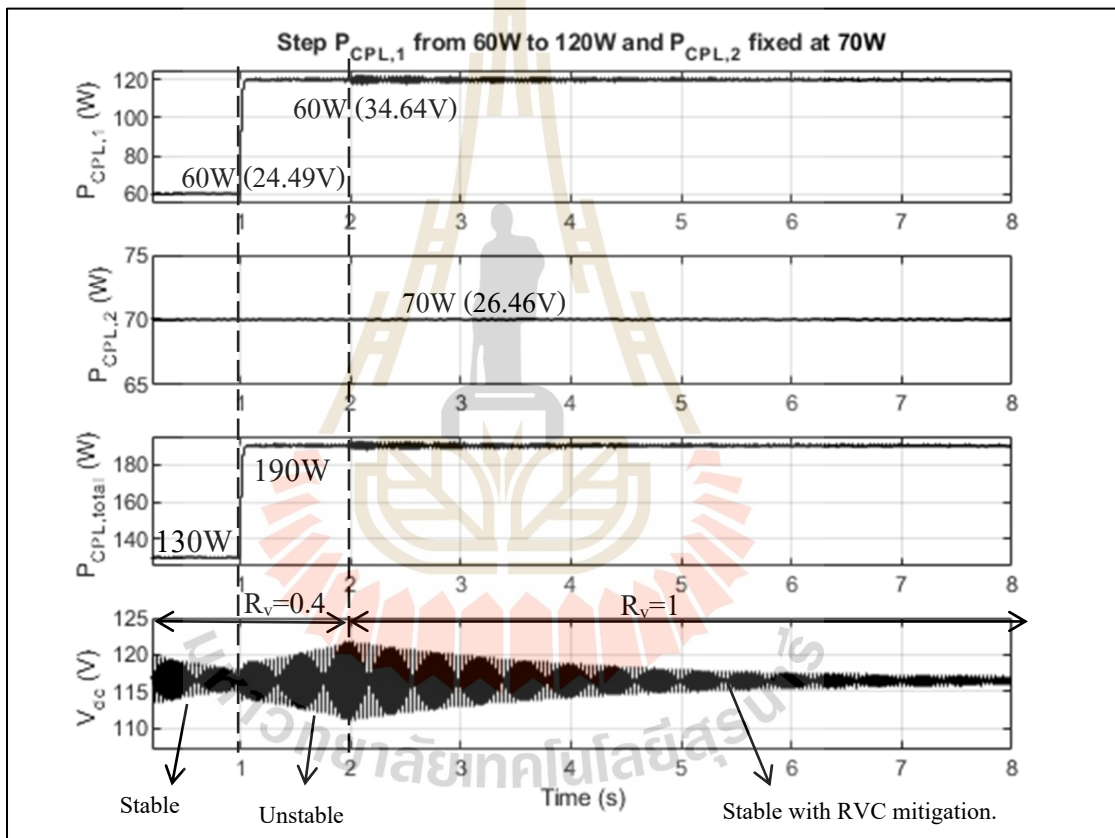
เสถียรภาพอาร์วีซีทำงาน ที่  $R_v = 0.4$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบจะกลับมามีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานโดยดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัสดีซีที่มีค่าลดลง และคงที่ในสภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป

จากนั้นทำการพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของ  $R_v$  จาก 0 ถึง 2 โดยกำหนดให้ค่าระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์กรวม ( $P_{CPL,total}$ ) มีขนาด 190 W ประกอบไปด้วย วงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ชดที่ 1 ( $P_{CPL,1}$ ) มีกำลังไฟฟ้าขนาด 120 W (34.64 V) และโหลดดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ชดที่ 2 ( $P_{CPL,2}$ ) มีกำลังไฟฟ้าขนาด 70 W (26.46 V) ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า  $R_v$  ที่มีผลต่อเสถียรภาพโดยที่กำหนดให้ผลรวมของวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้ง 2 ชุดมีค่า 190 W

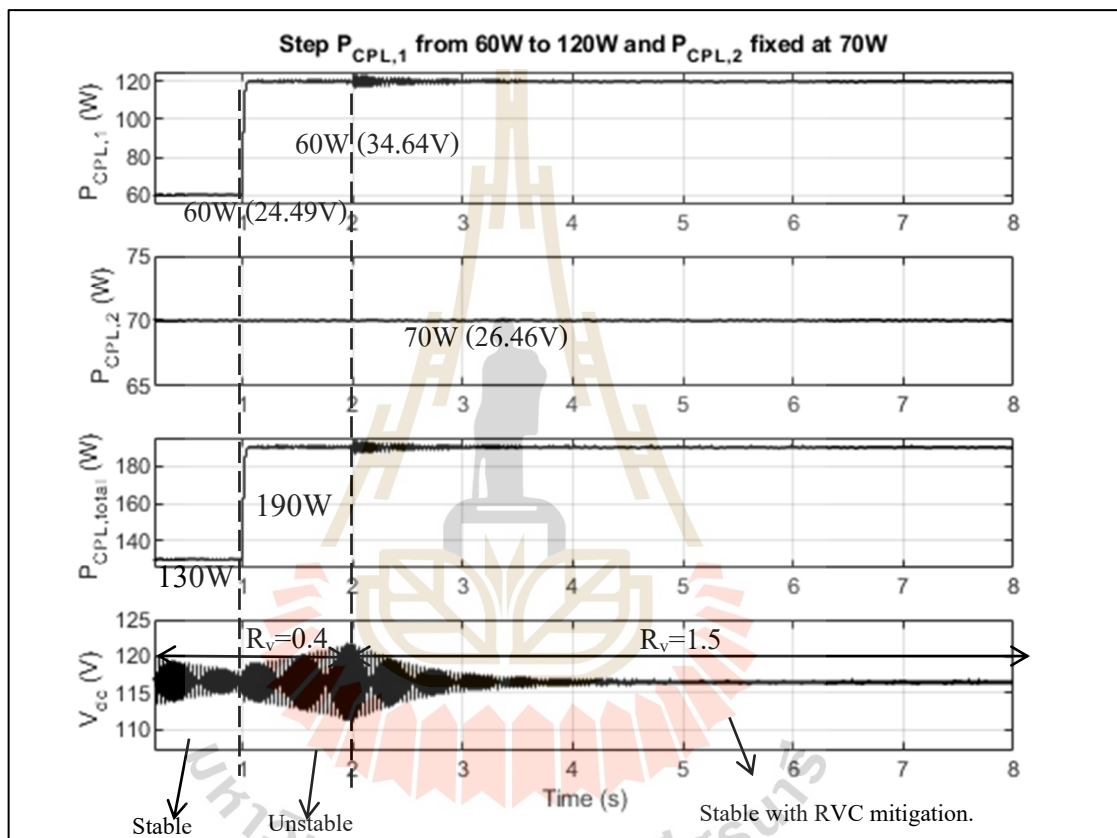
จากรูปที่ 5.9 แสดงการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีการปรับเพิ่มโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุดที่มีผลรวมระดับกำลังไฟฟ้าจาก 130 W ไปเป็น 190 W จะเห็นได้ว่าระบบที่ขาดเสถียรภาพสามารถกลับมาเสถียรภาพได้อีกครั้งเมื่อทำการเพิ่มค่า  $R_v$  จาก 0.4 มาเป็น 1 ซึ่งการยืนยันผลการวิเคราะห์ของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงดังรูปที่ 5.10 โดยที่มีการปรับตั้งค่าโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุดที่ 2 มีค่าคงที่ 70 W (26.46 V) และโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุดที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงจาก 60 W (24.49V) ไปเป็น 120 W (34.64 V) ที่เวลา 1 วินาทีและที่เวลา 2 วินาทีได้กำหนดให้วงจรสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $R_v$  จาก 0.4 ไปเป็น 1



รูปที่ 5.10 การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพเมื่อผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 190 W เมื่อเปลี่ยนแปลง  $R_v$  จาก 0.6 เป็น 1.2

จากรูปที่ 5.10 แสดงการปรับเพิ่มระดับกำลังของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเพิ่มขึ้นรวมเป็น 190 W โดยที่วงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีจะต้องทำการเพิ่มค่า  $R_v$  มีค่าเท่ากับ 1 จึงจะสามารถทำให้ระบบกลับมาเสถียรภาพได้อีกครั้ง ซึ่งการวิเคราะห์ผลของค่า  $R_v$  ที่เหมาะสมกับระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุด สามารถวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีบท

ค่าเจาะจง โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการที่ (5.5) อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ผลของค่าดังกล่าวพบว่าการกลับมาเสถียรภาพของระบบใช้เวลาเข้าที่ (Settling time) นาน ซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มค่า  $R_v$  ให้มากขึ้น โดยแสดงผลการจำลองสถานการณ์ได้ดังรูปที่ 5.11 โดยที่มีการปรับตั้งค่าโวลตจจรแปลงผันแบบบักค์ชุตที่ 2 มีค่าคงที่ 70 W (26.46 V) และโวลตจจรแปลงผันชุตที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงจาก 60 W (24.49 V) ไปเป็น 120 W (34.64 V) ที่เวลา 1 วินาทีและที่เวลา 2 วินาทีได้กำหนดให้วงจรสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $R_v$  จาก 0.4 ไปเป็น 1.5



รูปที่ 5.11 การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพเมื่อผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุตมีค่าเท่ากับ 190 W เมื่อเปลี่ยนแปลง  $R_v$  จาก 0.6 เป็น 1.5

จากรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุตมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 80 W ไปเป็น 190 W ที่เวลา 1 วินาที จะให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และเมื่อค่า  $R_v$  เพิ่มขึ้นจาก 0.4 เป็น 1.5 ที่เวลา 2 วินาที พบว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณา กลับมาเสถียรภาพได้อีกครั้งโดยใช้เวลาเข้าที่ (Settling time) น้อยกว่าที่ค่า  $R_v=1$  แต่สมรรถนะการควบคุมของโวลตจจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ชุตที่ 1 จะถูกรบกวนมากขึ้นสังเกตได้จากค่าแรงดันเอาต์พุตมีการแกว่งที่มากในช่วงสภาวะชั่วคราว

#### 5.4 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจกระเบียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชานกันที่มีอยู่ด้วยกัน 2 กรณีคือกรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีและกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ไว้แล้วในบทก่อนหน้านี้มาคำนวณผ่านทฤษฎีบทค่าเจาะจง จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทำให้ทราบถึงจุดการทำงานที่เกิดการขาดเสถียรภาพในระบบไฟฟ้า และการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้ตลอดย่านการทำงาน พร้อมทั้งทำการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง MATLAB/SIMULINK จากผลการยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์พบว่ากรณีวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้ดำเนินการในบทนี้มีความถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์อาจมีความน่าเชื่อถือไม่เพียงพอ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์จึงมีการสร้างชุดทดสอบจริงเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ รวมถึงผลของการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะได้รับการนำเสนอในบทถัดไป

## บทที่ 6

### การสร้างชุดทดสอบ

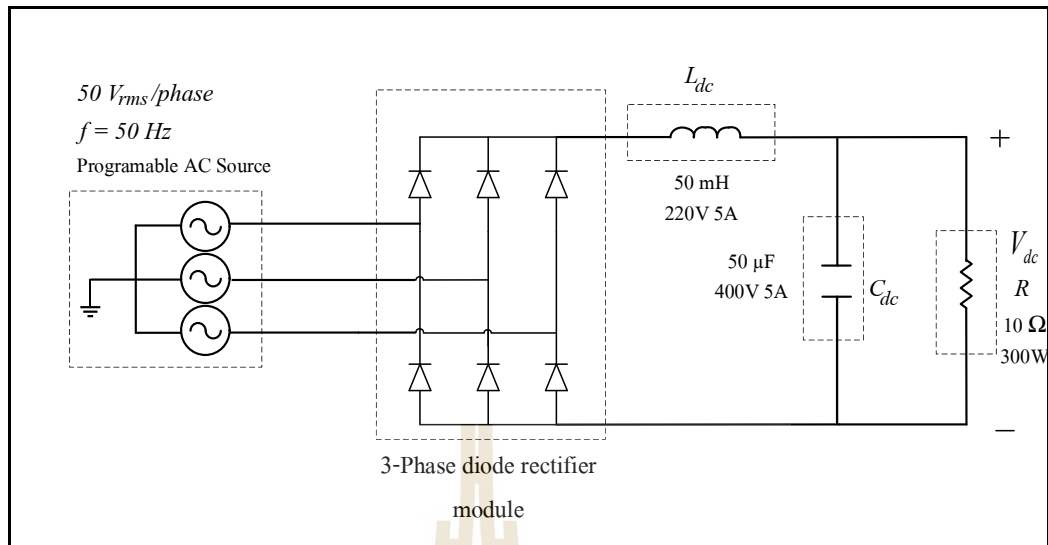
#### 6.1 บทนำ

การสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีในบทที่ผ่านมาเป็นเพียงการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ซึ่งได้รับการยืนยันโดยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพอาศัยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งอาจมีความน่าเชื่อถือที่ยังไม่เพียงพอ ดังนั้น เพื่อให้การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้นจึงมีความจำเป็นในการสร้างชุดทดสอบจริง เนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอเกี่ยวกับ การสร้างชุดทดสอบโดยแบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ๆ คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีการควบคุม และในส่วนของวงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี จะทำการโปรแกรมโดยใช้บอร์ดคอนโทรลเลอร์ ARDUINO AT MEGA 2560 ประกอบด้วยโปรแกรมตัวควบคุมพีไอและโปรแกรมสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี และนำเสนอถึงหลักการออกแบบของวงจรในแต่ละวงจร รวมถึงผลการทดสอบ

#### 6.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรตัวต้านทาน

##### 6.2.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ

การสร้างชุดทดสอบของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน แสดงได้ดังรูปที่ 6.1 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับค่าได้ โมดูลไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองทางฝั่งไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและโหลดความต้านทาน



รูปที่ 6.1 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

จากรูปที่ 6.1 สำหรับการเลือกพิกัดของมอดูลวงจรเรียงกระแสได้พิจารณาจากโหลดของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ทิง 2 ชุด ซึ่งมีพิกัดกำลังไฟฟ้า 150 W ต่อชุด และพิจารณาค่าตัวประกอบนิรภัย (Safety factor) 25 เปอร์เซ็นต์ มอดูลวงจรเรียงกระแสสามเฟสจะต้องรองรับกำลังไฟฟ้าที่มีค่าเป็น 375 W พิกัดแรงดัน 117 V และพิกัดกระแส 3.3A สำหรับการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ (N. Mohan, T.M. Underland, and W.P. Robbins, 2003) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6.1)

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad (6.1)$$

เมื่อ  $V_{dc}$  คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และ  $V_m$  คือ แรงดันค่ายอดต่อเฟสของไฟฟ้ากระแสสลับ

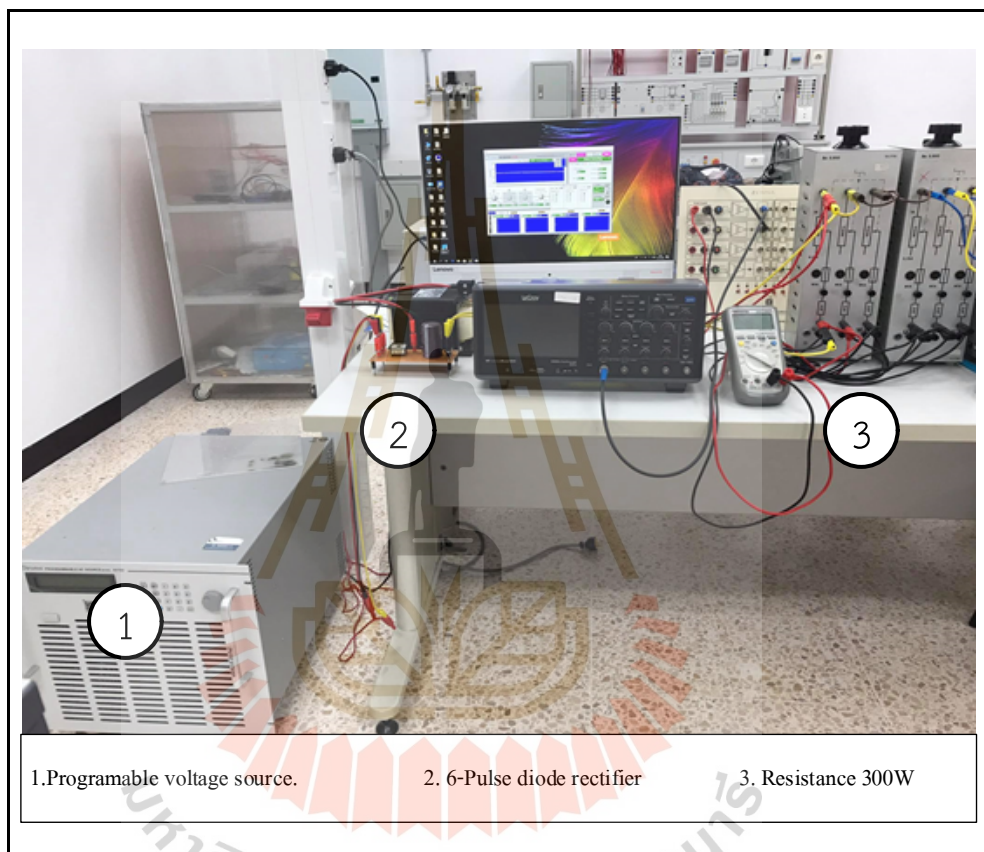
จากรูปที่ 6.1 แรงดันอินพุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีค่าแรงดันต่อเฟสเท่ากับ  $40 V_{rms}$  และ  $50 V_{rms}$  ตามลำดับ สามารถคำนวณค่าแรงดันดีซีเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ได้ดังสมการที่ (6.2)

$$\begin{cases} V_{dc1} = \frac{3\sqrt{3} \times \sqrt{2} \times 40}{\pi} = 93.56V \\ V_{dc1} = \frac{3\sqrt{3} \times \sqrt{2} \times 50}{\pi} = 116.95V \end{cases} \quad (6.2)$$

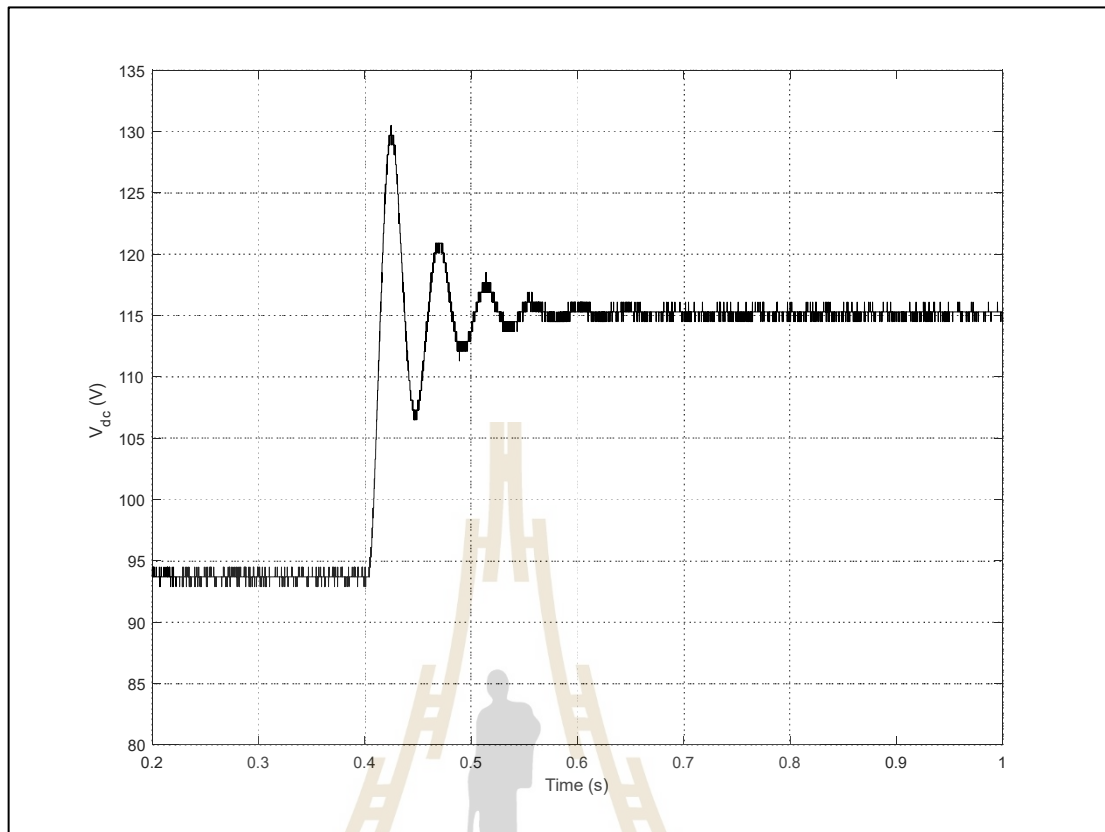


### 6.2.2 ผลการทดสอบและอภิปรายผล

สำหรับการทดสอบในหัวข้อนี้จะดำเนินการโดยการเปลี่ยนระดับแรงดันอินพุตของ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เพื่อดูผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการ จ่ายแรงดันอินพุตขนาด  $40 V_{rms}$  และทำการเปลี่ยนระดับแรงดันอินพุตเป็น  $50 V_{rms}$  ที่เวลา 0.2 วินาที โดยวงจรสำหรับการทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 6.2 และผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.2 ภาพถ่ายชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์



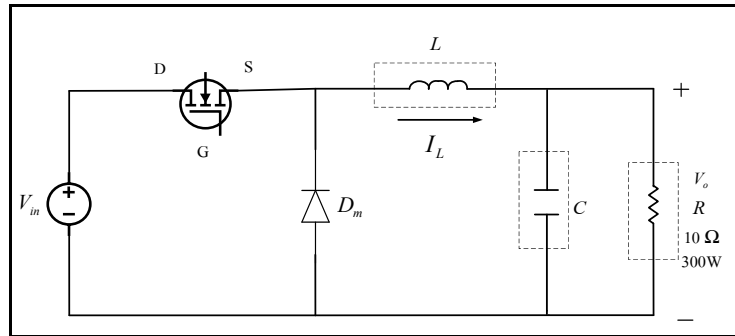
รูปที่ 6.3 ผลการทดสอบแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ )

จากรูปที่ 6.3 พบว่าแรงดันเอาต์พุตดีซี มีค่าประมาณ 93.56 โวลต์ เมื่อแรงดันอินพุตต่อเฟสมีค่าเท่ากับ  $40 V_{rms}$  และ แรงดันเอาต์พุตดีซี มีค่าประมาณ 116.95 โวลต์ เมื่อแรงดันอินพุตต่อเฟสมีค่าเท่ากับ  $50 V_{rms}$  ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (6.2)

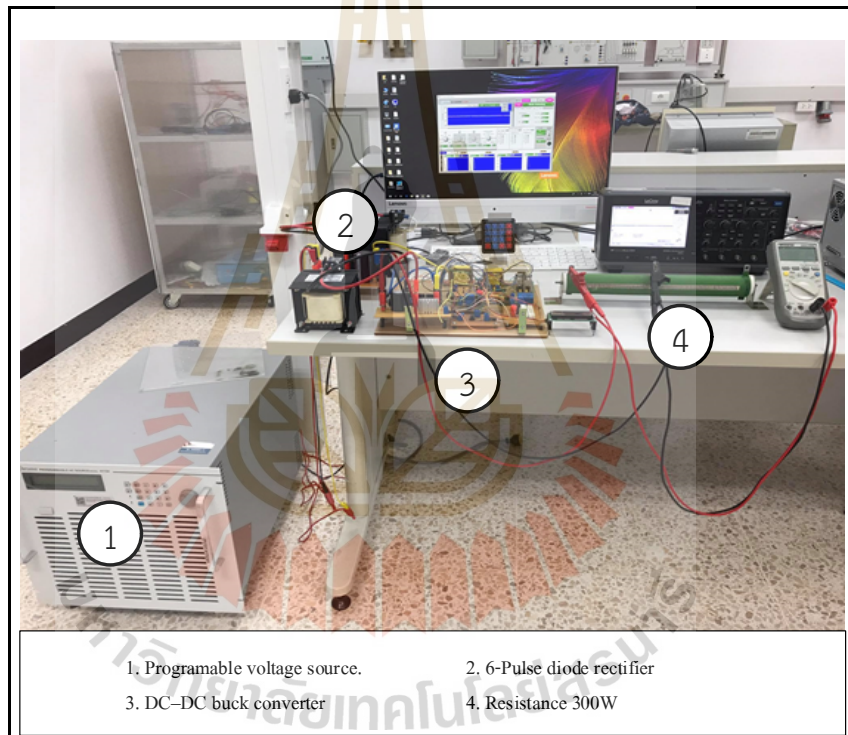
### 6.3 วงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ที่มีโหลดเป็นต้านทาน

การสร้างวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน เพื่อใช้สำหรับทดสอบจำเป็นต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในวงจร ซึ่งโครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบบักค์แสดงได้ดังรูปที่ 6.4 และชุดทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.5 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ชุดวงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ที่มีมอสเฟสเบอร์ IRF740 เป็นอุปกรณ์สวิตช์ ชุดสร้างสัญญาณ PWM ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และโหลดความต้านทาน





รูปที่ 6.4 โครงสร้างโดยรวมวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีโพลดเป็นตัวต้านทาน



รูปที่ 6.5 ชุดทดสอบวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีโพลดเป็นตัวต้านทาน

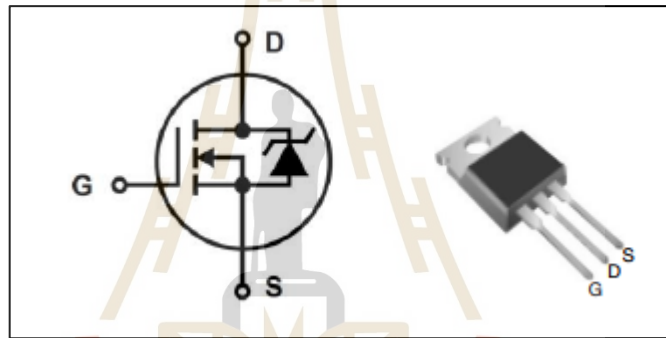
จากรูปที่ 6.5 สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ ( $V_o$ ) (N. Mohan, T.M. Underland, and W.P. Robbins, 2003) ดังสมการที่ (6.3)

$$V_o = dV_{in}$$

(6.3)

เมื่อ  $V_{in}$  คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตที่จ่ายให้วงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์  
 $d$  คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์

วงจรแปลงผันแบบบัคค์ จะใช้อุปกรณ์สวิตช์ที่เป็นลักษณะมอดูลโดยการออกแบบ อุปกรณ์จะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสเป็นสำคัญ โดยค่าพิกัดของแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 30 V ส่วนค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดจะมีค่าเท่ากับ 3 A และในการออกแบบต้องคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25% ดังนั้นมอดูลที่ใช้สำหรับ วงจรแปลงผันแบบบัคค์ จะต้องมีค่าพิกัดของแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 42 V และจะต้องมีค่าพิกัดของกระแสไฟฟ้ามากกว่า 3.75 A ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้มอดูลของมอสเฟตที่มีพิกัด แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 400 V ค่าพิกัดของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10 A ซึ่งมอดูลดังกล่าวแสดง ได้ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 มอดูลของมอสเฟตสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

#### การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุ

การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุ สิ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบ คือ ค่าแรงดันพลิว ( $\Delta V_c$ : ripple voltage) ของแรงดันที่ตกคร่อมโหลด และค่ากระแสพลิว ( $\Delta I_L$ : ripple current) ของกระแสที่ไหลผ่านโหลด โดยสมการที่ใช้สำหรับการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำ และค่าตัวเก็บประจุ แสดงดังสมการที่ (6.4) และ (6.5)

$$\Delta I_L = \frac{V_o(V_{in} - V_o)}{fL V_{in}} \quad (6.4)$$

$$\Delta V_c = \frac{\Delta I_L}{8fC} \quad (6.5)$$

โดยที่	$V_{in}$	คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุต
	$V_o$	คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
	$f$	คือ ความถี่ในการสวิตช์
	$L$	คือ ค่าความเหนี่ยวนำ
	$\Delta I_L$	คือ ค่ากระแสพลั่ว
	$C$	คือ ค่าความเก็บประจุ
	$\Delta V_C$	คือ ค่าแรงดันพลั่ว

การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำและค่าความเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคค์ มีแรงดันอินพุตเท่ากับแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส โดยมีค่าเท่ากับ 116.9 V จากการคำนวณด้วยสมการที่ (6.2) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจะทำการประมาณค่าแรงดันอินพุตให้มีค่าเท่ากับ 117 V โดยเงื่อนไขสำหรับการออกแบบวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์มีดังนี้

$$\begin{aligned} V_{in} &= 117 \text{ V} \\ V_o &= 5 - 100 \text{ V} \\ f &= 10 \text{ kHz} \\ \Delta I_L &\leq 0.2 \text{ A} \\ \Delta V_C &\leq 2.8 \text{ mV} \end{aligned}$$

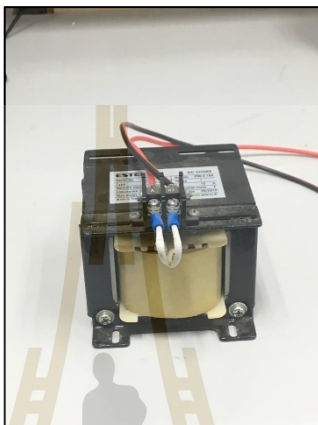
โดยการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำและค่าความเก็บประจุ จะพิจารณาที่แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 100 V เนื่องจากเป็นจุดการทำงานที่ครอบคลุมการทำงานทั้งหมดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุจะพิจารณาจากสมการที่ (6.4) และ (6.5) ตามลำดับ จะได้ผลการคำนวณดังสมการที่ (6.6)

$$\begin{cases} L \geq \frac{100(117-100)}{10 \times 10^3 \times 117 \times 0.2} = 7.265 \text{ mH} \\ C \geq \frac{0.2}{8 \times 10 \times 10^3 \times 2.8 \times 10^{-3}} = 892.857 \mu\text{F} \end{cases} \quad (6.6)$$

จากการออกแบบข้างต้น การเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุ จะต้องครอบคลุมการทำงานทั้งหมดของงานวิจัยวิทยานิพนธ์โดยมีเงื่อนไขว่าค่ากระแสพลั่วมีค่าไม่เกิน 0.2 A และค่าแรงดันพลั่วไม่เกิน 2.8 mV และเมื่อพิจารณาพิกัดโหลดค่าความต้านทาน ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์และคำนึงถึงตัวประกอบนิรภัย 25 % ค่าพิกัดกระแสขดลวดจะมีค่ามากกว่า 3.75 A และค่าพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุจะมีค่ามากกว่า 125 V

เพราะฉะนั้นค่าความเหนี่ยวนำ ของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุ ที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบักส์สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังรูปที่ 6.7 และ 6.8 ตามลำดับดังนี้

$L = 15 \text{ mH}$  พิกัดกระแส 10 A



รูปที่ 6.7 ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบักส์

$C=1000 \mu\text{F}$  พิกัดแรงดัน 200 V

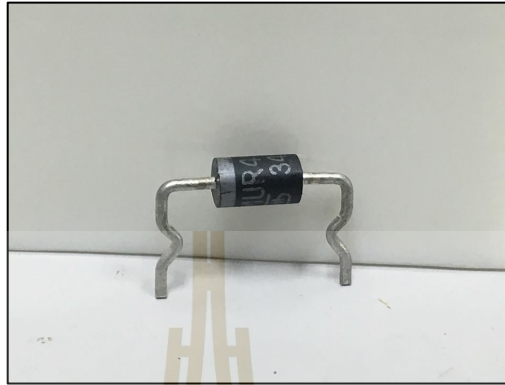


รูปที่ 6.8 ตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรแปลงผันแบบบักส์

### วิธีการออกแบบไดโอด ( $D_m$ )

พิจารณาจากวงจรแปลงผันแบบบักส์ในรูปที่ 6.4 ไดโอด ( $D_m$ ) ต้องมีพิกัดของแรงดันมากกว่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักส์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 116.9 V และพิจารณาตัวประกอบ

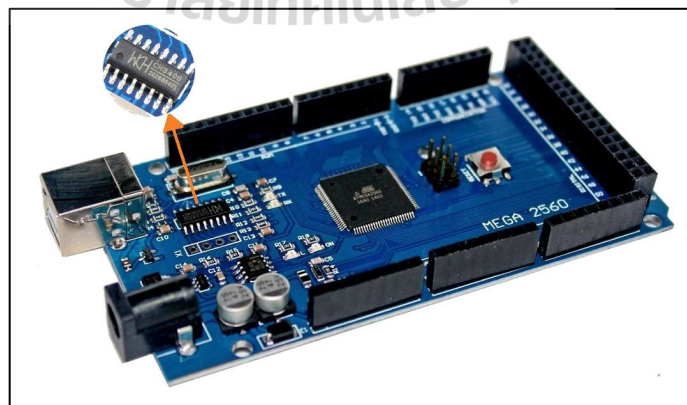
นิรภัย 25 % ค่าพิกัดของไดโอด  $D_m$  ต้องมีค่ามากกว่า 146.13 V ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้ค่าพิกัดของ ไดโอด  $D_m$  ที่ 400 V แสดงได้ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบักคัก

### 6.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์คือรุ่น ET - EASY MEGA2560 ของบริษัทอีทีทีที่ใช้ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega2560 ที่เป็นชิพตระกูล AVR ของบริษัท Atmel รองรับการเขียนโปรแกรมภาษา C ของ Arduino ซึ่งเป็นภาษาที่ง่ายและไม่ซับซ้อน และสามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย โดยตัวบอร์ดจะประกอบไปด้วย พอร์ตอินพุต, พอร์ตเอาต์พุต, พอร์ตดิจิตอล, พอร์ตอนาล็อก, พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM และพอร์ตสื่อสารอนุกรม ทางอีทีทีจึงได้นำ ATmega2560 มาพัฒนาเป็นบอร์ดโดยใช้ชื่อว่า ET-EASY MEGA2560 ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA2560

### คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับบอร์ด ET-EASY MEGA2560

- Overview

Arduino Mega 2560 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำงานบนพื้นฐานของ ATmega2560 ซึ่งประกอบด้วย

- 54 digital input/output pins (15 pin สามารถใช้เป็น PWM output ได้)
- 16 analog inputs
- UARTs
- 16 MHz crystal oscillator (ใช้สำหรับรองความถี่ให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์)
- USB connection
- ช่องเสียบแหล่งจ่าย
- ICSP header: In-Circuit Serial Programming (ส่วนที่เป็น AVR ขนาดเล็กสำหรับการโปรแกรม Arduino ซึ่งประกอบด้วย MOSI, MISO, SCK, RESET, VCC, GND)
- ปุ่มกด reset

- Power

Arduino Mega สามารถเชื่อมรับพลังงานโดยการเชื่อมต่อ micro USB connector หรือจาก power supply จากภายนอกได้ โดยแหล่งพลังงานจะถูกเลือกโดยอัตโนมัติ

แหล่งจ่ายจากภายนอกสามารถมาได้จาก AC-to-DC adapter หรือจากแบตเตอรี่ โดยต่อเข้ากับ 2.1mm center-positive plug ไปยังช่องเสียบแหล่งจ่าย และการต่อเข้ากับแบตเตอรี่สามารถทำได้โดยการต่อเข้ากับ GND และ Vin pin header ของ power connector

บอร์ดสามารถทำงานได้ในช่วงแรงดัน 6 ถึง 20 V ถ้า แหล่งจ่ายมีค่าต่ำกว่า 7 V อาจส่งผลให้ 5 V pin มีแรงดันที่ต่ำกว่า 5V และ บอร์ดอาจจะไม่เสถียร แต่ถ้าหากแรงดันมีค่าสูงกว่า 12 V อาจส่งผลให้บอร์ด Overheat และอาจทำให้บอร์ดเสียหายได้ ดังนั้นช่วงแรงดันที่เหมาะสมกับบอร์ดคือ 7 V ถึง 12 V โดยมีพอร์ตที่เกี่ยวข้องกับการจ่ายแรงดันประกอบด้วย

- VIN เป็น input voltage ของบอร์ด Arduino โดยใช้แหล่งจ่ายจากภายนอก
- 5V เป็น output pin ที่ควบคุม 5 V จากบอร์ด
- 3.3V เป็น 3.3-volt supply ที่สร้างขึ้นจาก regulator บนบอร์ด และให้กระแสได้สูงสุด 50 mA
- GND เป็น ground pin
- IOREF เป็น pin ที่ให้ voltage reference กับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อเลือกค่าแรงดันให้กับ shield ที่มาเชื่อมต่อกับบอร์ด



- Memory
 

ATmega2560 มีหน่วยความจำ 256 KB (8 KB ใช้สำหรับ bootloader) นอกจากนี้ยังมีอีก 8 KB สำหรับ SRAM และ 4 KB สำหรับ EEPROM
- Input and Output
 

ในแต่ละ digital pins ทั้ง 54 pins บนบอร์ด Arduino Uno สามารถเป็นได้ทั้ง input และ output โดยจะทำงานที่แรงดัน 5 V และให้กระแสสูงสุด 40 mA
- ฟังก์ชันอื่น ๆ เพิ่มเติม
  - Serial: 0 (Rx) และ 1(Tx); Serial 1: 19(Rx) และ 18 (Tx); Serial 2: 17 (Rx) และ 16(Tx); Serial 3:15 (Rx) และ 14 (Tx) ใช้สำหรับรับ (Rx) และส่ง (Tx) TTL serial data โดย pin 0 และ 1 จะถูกเชื่อมต่อไปยัง corresponding pins ของ ATmega16U2 USB-to-TTL serial chip
  - External Interrupts: 2 (interrupt 0), 3 (interrupt 1), 18 (interrupt 5), 19 (interrupt 4), 20 (interrupt 3), 21 (interrupt 2). pins เหล่านี้สามารถที่จะกำหนดค่าที่เรียก interrupt ในค่าต่ำๆ, ขอบขาขึ้นและลง หรือเปลี่ยนแปลงค่า
  - PWM: 2 ถึง 13 และ 44 ถึง 46 ให้ output PWM output 8-bits
  - SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS) ใช้สำหรับรองรับการสื่อสารแบบ SPI โดยที่ไม่เกี่ยวข้องข้องกันกับ ICSP header ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับ Uno, Duemilanove และ Diecimila
  - LED 13: เป็น build-in LED ที่เชื่อมต่อกับ digital pin 13 เมื่อ pin มีค่าเป็น HIGH LED จะติด, แต่เมื่อ pin เป็น LOW LED จะดับ
  - TWI: 20 (SDA) and 21 (SCL). รองรับการเชื่อมต่อแบบ TWI(I2C)
  - บอร์ด Mega2560 มี 16 analog inputs แต่ละ pins ให้ความละเอียด 10 bits
  - AREF. แรงดันอ้างอิง สำหรับ analog input
  - Reset ใช้ในการ reset ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยทั่วไปจะใช้โดยการเพิ่มปุ่ม reset ไว้บน sheild เพื่อป้องกันปุ่มที่อยู่บนบอร์ด
- Communication
 

Arduino Uno สามารถสื่อสารกับคอมพิวเตอร์, Arduino ตัวอื่น ๆ หรือ microcontroller ได้ โดยที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์บนบอร์ด คือ ATmega32U4 จะให้การสื่อสารแบบอนุกรม UART TTL (5 V) ซึ่งมีอยู่ใน pins 0 (Rx) และ 1 (Tx) นอกจากนี้ 32U4 สามารถใช้การสื่อสารแบบอนุกรมผ่าน USB และจะปรากฏเป็น COM port เสมือนไปยัง Software แต่อย่างไรก็ตามต้องใช้ ไฟล์ .inf บนระบบปฏิบัติการ Windows แต่ OSX และ Linux สามารถ recognize ได้โดยอัตโนมัติ เก็บข้อมูลได้กว่า 20 ปีที่อุณหภูมิ 85 °C และกว่า 100 ปีที่อุณหภูมิ 25 °C

- Programming

Arduino Uno สามารถรองรับการโปรแกรมด้วย Arduino Software โดยสามารถใช้ได้ทั้งในระบบปฏิบัติการ Windows, Mac OS X และ Linux

### การใช้งานพอร์ตสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล

สำหรับในพอร์ตนี้มีความสำคัญในการรับค่าจากชุดทดสอบโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR พอร์ตแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลหรือ ADC (Analog to digital converter) จะมีความละเอียดขนาด 10 บิต (10-bit resolution) ที่แรงดัน +5 V หมายความว่าสัญญาณอนาล็อกที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดเมื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลและจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 – 1024 โดยมีพอร์ต ADC จำนวน 16 ช่องอินพุตสัญญาณคือ ADC0-ADC15 สำหรับการใช้งานในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะใช้เพียง 1 ช่องสัญญาณคือ ADC0 ผลการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลคำนวณได้จากสมการที่ (6.7)

$$ADC = \frac{V_s \cdot 1024}{V_{ref}} \quad (6.7)$$

โดยที่  $V_s$  คือ แรงดันไฟฟ้าฝั่งทูดิยภูมิจากเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า  
 $V_{ref}$  คือ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจะถูกกำหนดไว้ที่ 5 V

### การสร้างสัญญาณ PWM กับไทมเมอร์/เคาเตอร์ 1

การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ จะใช้การทำงานในโหมด Phase and Frequency Correct PWM โดยการสร้างสัญญาณ Phase and Frequency Correct Pulse Width Modulation เป็นการสร้างเฟสและความถี่ของสัญญาณ PWM ความละเอียดสูง โดยความถี่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6-8)

$$f_{PWM} = \frac{f_c}{2 \cdot N \cdot TOP} \quad (6.8)$$

โดยที่  $N$  คือ ค่าปริสเกลเลอร์ซึ่งมีค่า 1, 8, 64, 256, 1024 โดยในที่นี้จะใช้  $N = 1$   
 $TOP$  คือ ค่าที่กำหนดให้รีจิสเตอร์ IRC1 ซึ่งมีขนาด 16 บิต  
 $f_c$  คือ ความถี่สัญญาณนาฬิกาที่ต้องใช้ในที่นี้ใช้ 16 MHz

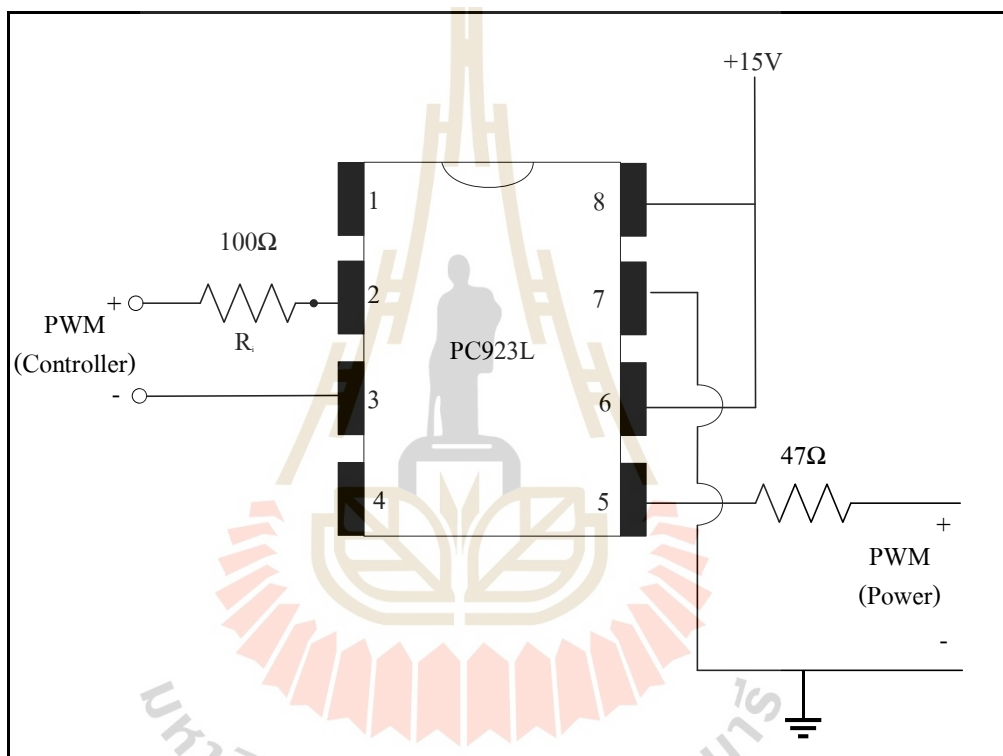
สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ความถี่ของสวิตซ์เท่ากับ 10 kHz โดยจะสามารถคำนวณค่า  $TOP$  หรือค่า IRC1 ได้จากสมการที่ (6.9)

$$TOP = \frac{16 \cdot 10^6}{2 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 10^3} = 800 \quad (6.9)$$



### วงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ

วงจรที่ใช้สำหรับขยายสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่สร้างขึ้นโดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มีระดับแรงดันไม่เพียงพอสำหรับใช้จุดชนวนสวิทช์ของวงจรแปลงผัน และมีการแยกโดดสัญญาณระหว่างฝั่งวงจรกำลังและฝั่งวงจรรีเลย์ทรอนิกส์แรงต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทางด้านวงจรแปลงผันเข้าไปรบกวนการทำงานของวงจรรางฝั่งอิเล็กทรอนิกส์ ชุดทดสอบวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณใช้ไอซีเบอร์ PC923L ซึ่งมีโครงสร้างการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 6.11



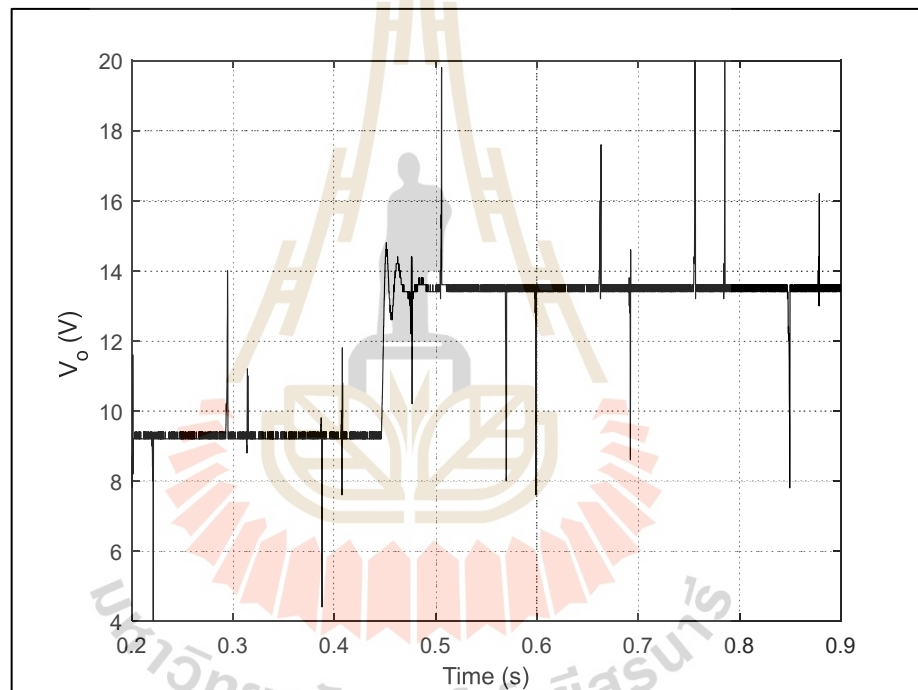
รูปที่ 6.11 โครงสร้างชุดทดสอบวงจรขยายแบบแยกโดดสัญญาณ

โดยสัญญาณควบคุมที่ได้จะถูกใช้ในการควบคุมอุปกรณ์สวิทช์ในวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะต้องมีการผ่านวงจรแยกโดดสัญญาณก่อน เพื่อแยกกราวด์และป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับอุปกรณ์โดยผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานจะถูกนำเสนอในหัวข้อต่อไป สำหรับโปรแกรมสำหรับการสร้างสัญญาณพัลส์แกว่งจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์แสดงไว้ในภาคผนวก ค.1

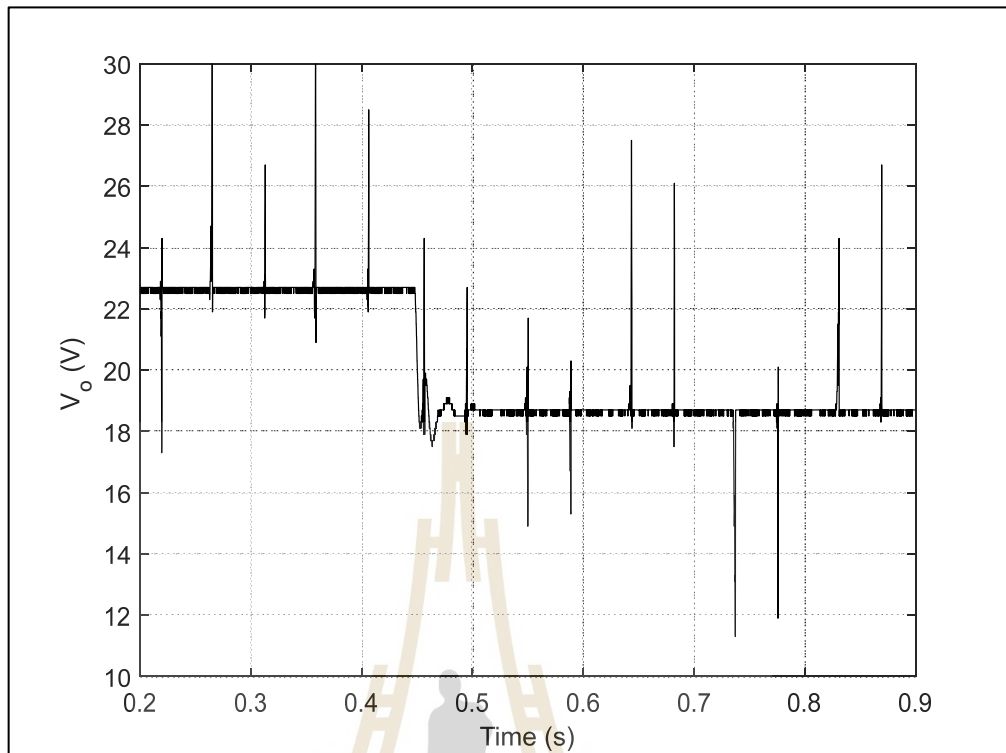
#### 6.3.2 ผลการทดสอบและอภิปรายผล

การสร้างชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานซึ่งได้นำเสนอถึงการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และยังได้กล่าวถึงการสร้างสัญญาณพัลส์ด้วย

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งการสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ เพื่อให้เห็นถึงความถูกต้องของผลการตอบสนองของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานแสดงไว้ดังรูปที่ 6.5 จึงทำการทดสอบการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันดังกล่าวโดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะทำการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่แบบขั้นบันไดเพื่อดูผลการตอบสนองและการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตและแรงดันอินพุตและทำการบันทึกผลการทดลองด้วยอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Flash drive) โดยผลการทดสอบจะทำการทดสอบโดยการทำให้ปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์จาก 25% เป็น 35% และจาก 55% เป็น 45% เมื่อแรงดันขาเข้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์มีค่า 40V แสดงได้ดังรูปที่ 6.12 และ 6.13 ตามลำดับ



รูปที่ 6.12 ผลการทดสอบการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 25% เป็น 35%



รูปที่ 6.13 ผลการทดสอบการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 55% เป็น 45%

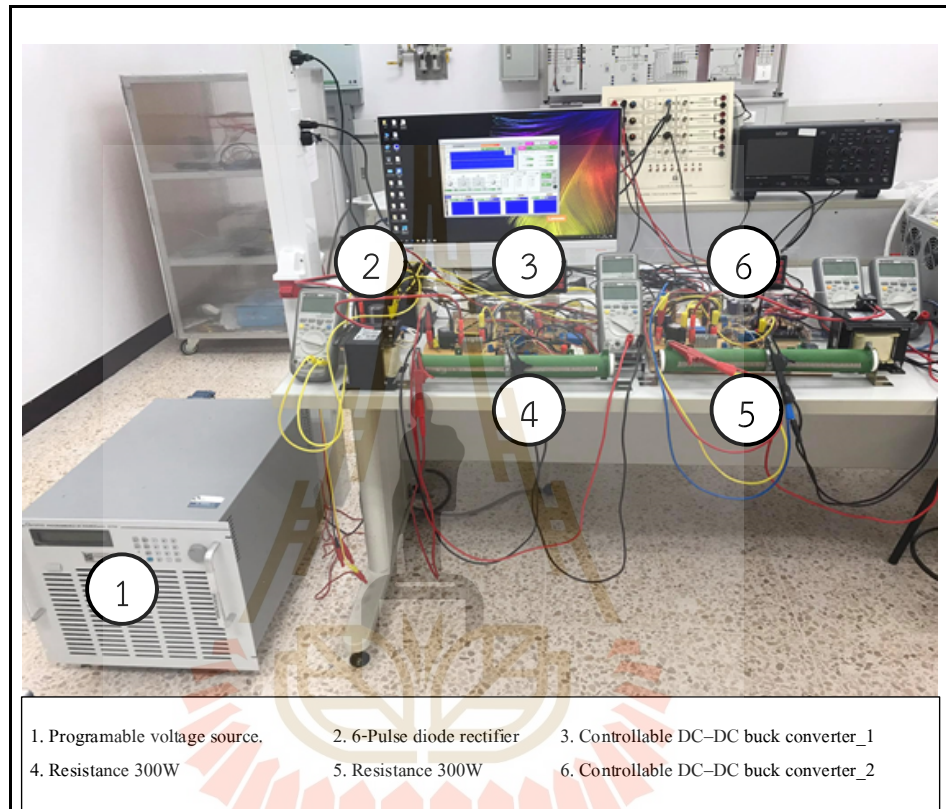
ผลการตอบสนองจากวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งในรูปที่ 6.12 และ 6.13 จะเห็นได้ว่า วงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่สร้างขึ้น สามารถทำงานได้ตรงตามค่าวัฏจักรหน้าที่ที่กำหนด โดยจากรูปที่ 6.12 เป็นการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 25% เป็น 35% หากคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตจากสมการที่ (6.3) เมื่อมีแรงดันอินพุตเท่ากับ 40 V จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 10 V และ 13 V ตามลำดับ และจากรูปที่ 6.13 เป็นการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 55% เป็น 45% หากคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตจะได้ 22 V และ 18 V ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเนื่องจากการสร้างชุดอุปกรณ์ในทางปฏิบัติอาจมีการผิดเพี้ยนจากแรงดันที่ตกรวมอุปกรณ์ตัวต่าง ๆ ไม่เหมือนในอุดมคติ ดังนั้นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักกิ้งที่มีโหนดเป็นตัวต้านทานจึงสามารถนำไปสร้างชุดทดสอบสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ในอนาคต ซึ่งจะนำไปใช้ในการควบคุมแบบวงรอบปิดในวงจรแปลงผันกำลังแบบบักกิ้งแบบขนานกันในตัวข้อที่ 6.4

## 6.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหนดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักกิ้งขนานกัน

### 6.4.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ

ชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหนดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักกิ้งขนานกันจะประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ วงจรเรียงกระแสสาม

เฟสแบบบริดจ์ วงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมแรงดันของ  
 วงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ วงจรตรวจจับสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก วงจร  
 สร้างสัญญาณฟันเลื่อย วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ และโหลดความต้านทานสำหรับวงจรแปลงผันกำลัง  
 แบบบักค์ แสดงได้ดังรูปที่ 6.14



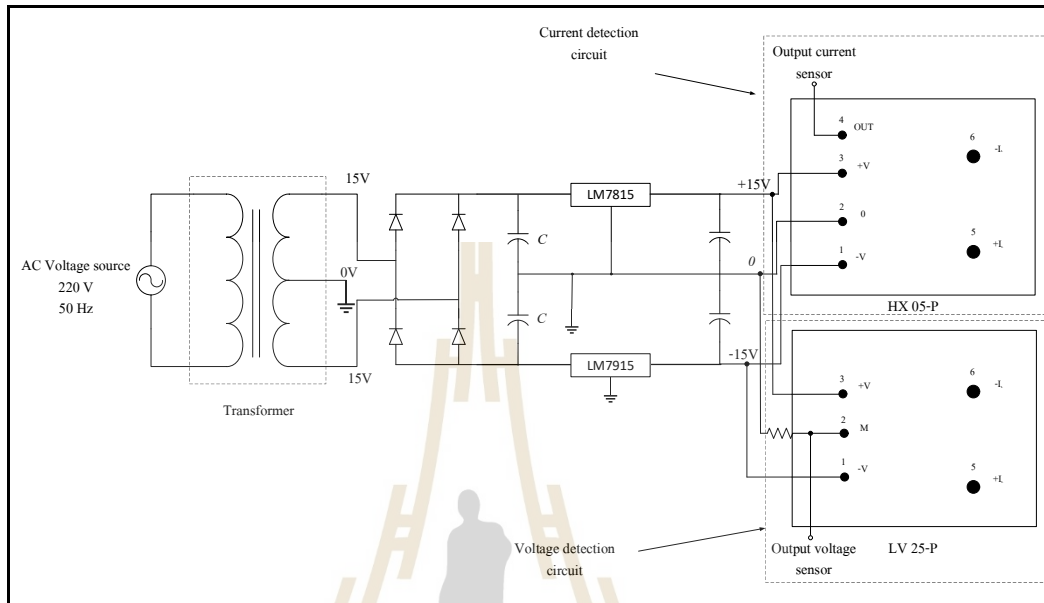
รูปที่ 6.14 ชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ขนานกัน

จากวงจรรูปที่ 6.14 เป็นการนำวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เชื่อมกับวงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน 2 ชุด ที่ได้ทำการออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 6.2 และ 6.3 มาเชื่อมต่อกัน และมีการควบคุมของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์จะพิจารณาแบบวงรอบปิด โดยการควบคุมแบบวงรอบปิดดังกล่าวจำเป็นต้องมีวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าต่อเพิ่มเข้ามาในวงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ที่จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

#### 6.4.2 การทดสอบชุดวงจรตรวจจับ

ชุดวงจรสำหรับตรวจจับสัญญาณของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ ประกอบด้วยวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P พิกัดแรงดันขนาด 100 V ทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันตกคร่อมของโหลดความต้านทานของวงจร และ วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP พิกัดกระแสขนาด

5 A โดยวงจรตรวจจับทั้งสองชนิดใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกันขนาด -15 V, 0V และ +15 V แสดงรายละเอียดของพร้อมอุปกรณ์วงจรดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 ชุดวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.15 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าจะต้องทำการออกแบบค่า  $R_{in}$  ซึ่งอยู่ทางด้านแรงดันสูง เพื่อให้กระแสทางด้านแรงดันสูง ( $I_{in}$ ) เกิน 10 mA เมื่อพิจารณาแรงดันพิกัดทางฝั่งแรงสูง 100 V จะได้สมการสำหรับออกแบบ  $R_{in}$  ดังสมการที่ (6.10)

$$R_{in} = \frac{V_{primary,max}}{10mA} = \frac{100}{10 \times 10^{-3}} = 10k\Omega \quad (6.10)$$

เมื่อ  $V_{primary,max}$  คือค่าแรงดันที่สามารถวัดได้สูงสุด

จากนั้นคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน  $R_{in}$  เพื่อนำไปใช้เลือกพิกัดกำลังของตัวต้านทาน แสดงดังสมการที่ (6.11) ดังนี้

$$P_{in} = \frac{V_{primary,max}^2}{R_{in}} = \frac{100^2}{10 \times 10^3} = 1W \quad (6.11)$$

เมื่อ  $P_{in}$  คือค่ากำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน  $R_{in}$

จากการออกแบบตัวต้านทาน  $R_{in}$  ดังสมการที่ (6.10) และ (6.11) งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้ตัวต้านทานขนาด  $15\text{ k}\Omega$ ,  $10\text{W}$  ซึ่งมีค่าความต้านทานตรงตามที่ยออกแบบและมีส่วนเผื่อในการรองรับกำลังไฟฟ้า

การนำตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไปใช้งานนั้น จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่ไหลเข้าวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า  $V_{in}$ ,  $I_{in}$  และแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและแรงดันที่วัดได้จากตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า  $V_{out}$  เพื่อให้ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์มีความสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริง ตัวตรวจจับแรงดันไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิและแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิด้วยมัลติมิเตอร์ และทำการคูณตัวปรับคูณในโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากฝั่งทุติยภูมิมีค่าเท่ากับฝั่งปฐมภูมิ ในส่วนของโปรแกรมสำหรับการควบคุม ที่ได้รับการตรวจจับค่าจากอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าจะใช้การควบคุมแบบพีไอ และใช้เทคนิคพีดีบีเบิลยูเอ็มทำการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม ด้วยวงจรเปรียบเทียบ ซึ่งจะอธิบายในส่วนถัดไป

#### 6.4.3 การสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

โดยทั่วไปโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอจะมีการทำงานแบบต่อเนื่อง (continuous) ซึ่งการนำตัวควบคุมพีไอมาใช้งานผ่านชุดไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น จำเป็นต้องแปลงสมการควบคุมของตัวควบคุมพีไอให้อยู่ในรูปของการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) ซึ่งสามารถดำเนินการได้ดังนี้โดยการสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR จะอาศัยพื้นฐานมาจากการนำ ตัวควบคุมทั้ง 2 แบบ คือ การควบคุมแบบสัดส่วน และการควบคุมแบบอินทิกรัล มาใช้ร่วมกัน โดยสามารถเขียนแทนด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (6.12)

$$V_{out} = K_p V_{error} + K_i \int V_{error} dt \quad (6.12)$$

โดยที่  $V_{out}$  คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ  
 $K_p$  คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน  
 $K_i$  คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล  
 $V_{erro}$  คือ สัญญาณอินพุตของตัวควบคุมพีไอ  
 $r$

จากสมการที่ (6.12) สามารถนำมาสร้างสมการใหม่ได้ โดยทำให้อยู่ในรูปแบบของเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete time) เพื่อใช้สำหรับเขียนโปรแกรมสร้างตัวควบคุมด้วยชุดทดสอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์



ขั้นที่ 1 หาสมการอนุพันธ์ของสมการตัวควบคุมพีไอที่พิจารณาในช่วงเวลาต่อเนื่องในสมการที่ (6.12) เพื่อกำจัดอินทิกรัล แสดงดังสมการที่ (6.13)

$$\frac{dV_{out}}{dt} = K_p \frac{dV_{error}}{dt} + K_i V_{error} \quad (6.13)$$

ขั้นที่ 2 กำหนดให้  $dt = T_s$  เมื่อ  $T_s$  คือ การสุ่มตัวอย่างเวลา (sampling time) และ เปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบของผลต่างจะได้ดังสมการที่ (6.14) ดังนี้

$$\frac{\Delta V_{out}}{T_s} = K_p \frac{\Delta V_{error}}{T_s} + K_i V_{error} \quad (6.14)$$

ขั้นที่ 3 กำหนดให้ผลต่างของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $\Delta V_{out}$  มีค่าเท่ากับ  $V_{out(i)} - V_{out(i-1)}$  และผลต่างของแรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อน  $\Delta V_{error}$  มีค่าเท่ากับ  $V_{error(i)} - V_{error(i-1)}$  แสดงได้ดังสมการที่ (6.15)

$$\frac{V_{out(i)} - V_{out(i-1)}}{T_s} = K_p \frac{V_{error(i)} - V_{error(i-1)}}{T_s} + K_i V_{error} \quad (6.15)$$

โดยที่  $V_{out(i)}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าปัจจุบัน  
 $V_{out(i-1)}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าอดีต  
 $V_{error(i)}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อนปัจจุบัน  
 $V_{error(i-1)}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าคลาดเคลื่อนอดีต

ขั้นที่ 4 คูณด้วยค่าการสุ่มเวลา  $T_s$  ทั้งสองข้างของสมการ จะได้สมการตัวควบคุมพีไอในช่วงเวลาไม่ต่อเนื่องดังสมการที่ (6.16)

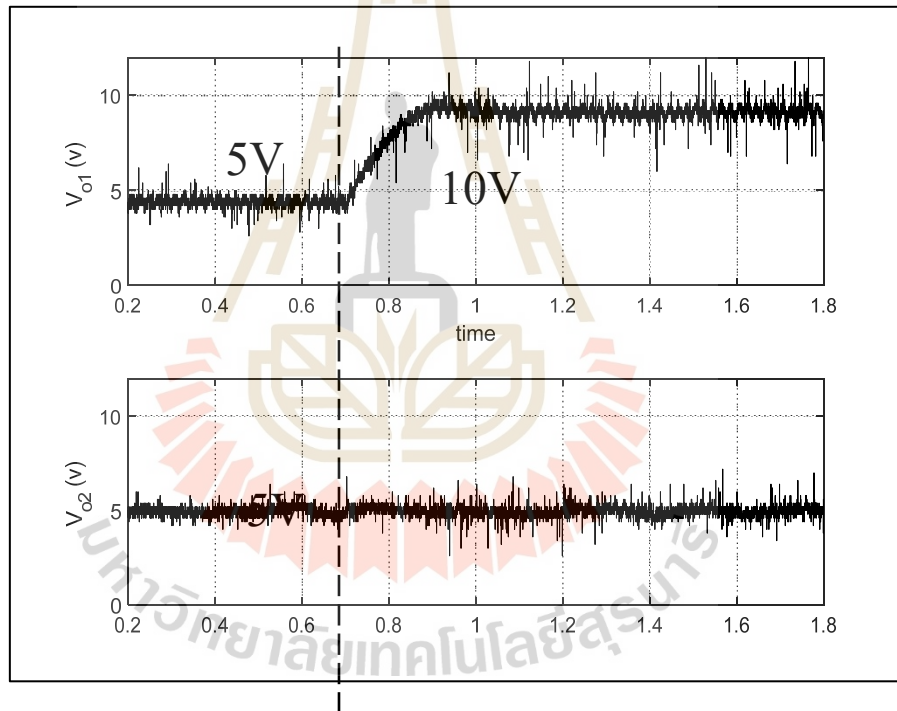
$$V_{out(i)} - V_{out(i-1)} = K_p (V_{error(i)} - V_{error(i-1)}) + K_i V_{error} T_s \quad (6.16)$$

จากสมการที่ (6.16) จะเป็นสมการที่ใช้สำหรับการโปรแกรมการควบคุมแบบพีไอในไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR Atmega 2560 สัญญาณควบคุมดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่สร้างจากวงจรสร้างสัญญาณสามเหลี่ยมในวงจรเปรียบเทียบสัญญาณเพื่อให้ได้

สัญญาณวัฏจักรหน้าที่สำหรับควบคุมสวิทช์ของอุปกรณ์สวิทช์ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ โดยรายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก ค.

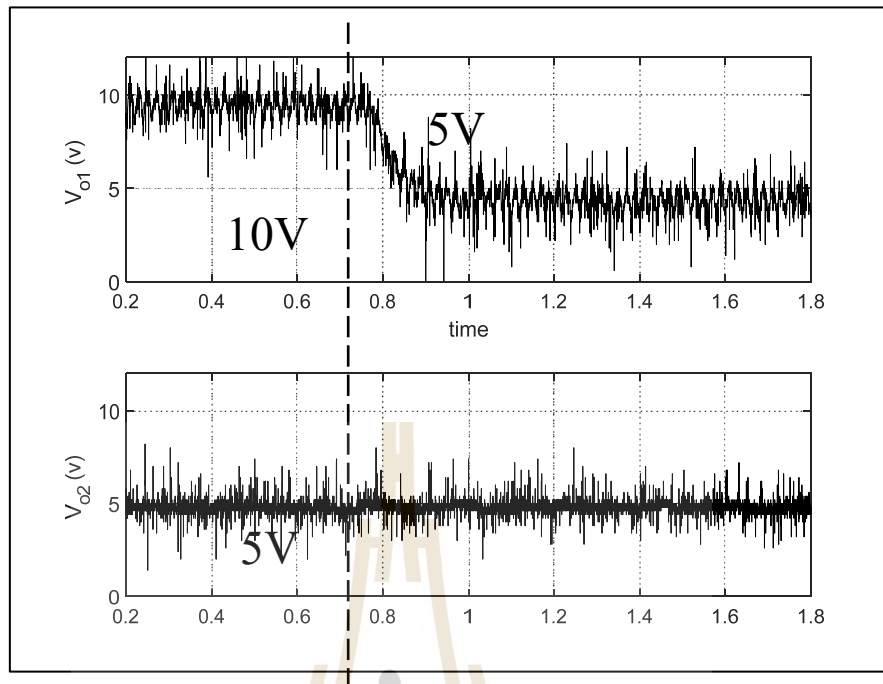
#### 6.4.4 ผลการทดสอบและอภิปรายผล

โดยการตรวจสอบความถูกต้องสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ขนานกันในรูปที่ 6.14 จะดำเนินการโดยเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ชุดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ ) จาก 5 V เป็น 10 V ที่เวลา 0.7 วินาทีและทำการคงค่าแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ชุดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) ที่ 10 V แสดงผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 6.16 และเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ชุดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ ) จาก 10 V เป็น 5 V ที่เวลา 0.7 วินาที และแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ชุดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) คงค่าไว้ที่ 5 V แสดงผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.16 การทดสอบของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.14 โดยเปลี่ยน  $V_{o1}^*$  จาก 5 V เป็น 10 V และคงค่าแรงดัน  $V_{o2}^*$  ที่ 5 V





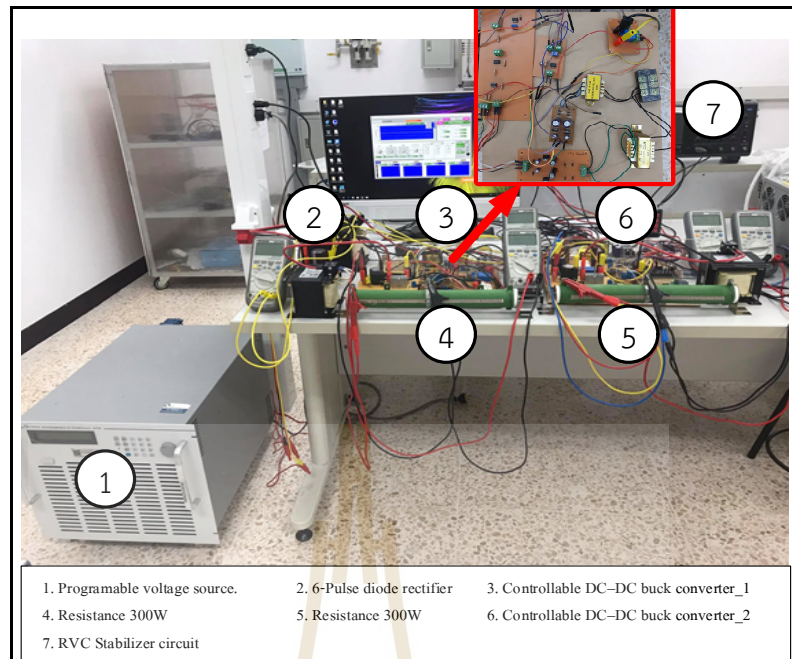
รูปที่ 6.17 การทดสอบของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 6.14 โดยเปลี่ยน  $V_{o1}^*$  จาก 10 V เป็น 5 V และคงค่าแรงดัน  $V_{o2}^*$  ที่ 5 V

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 6.16 และ รูปที่ 6.17 พบว่าผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตจากวงจรแปลงผันกำลังแบบบัตต์ทั้งสองชุด ที่มีการออกแบบโปรแกรมการควบคุมแบบพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR มีค่าคงที่ตามแรงดันอ้างอิงที่ป้อนในโปรแกรมที่ได้ออกแบบ ดังนั้นชุดทดสอบนี้จะถูกนำไปทดสอบการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีในหัวข้อถัดไป

## 6.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัตต์ขนานกันที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

### 6.5.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของชุดทดสอบสำหรับการสร้างเสถียรภาพวิธีอาร์วีซี

โดยชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัตต์ขนานกันที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรแปลงผันกำลังแบบบัตต์ วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมแรงดันของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัตต์ที่เพิ่มโปรแกรมการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี วงจรตรวจจับสัญญาณสำหรับค้วควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัตต์ วงจรตรวจจับสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุสำหรับการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี วงจรกรองสัญญาณผ่านต่ำสำหรับกรองสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ และโหลดความต้านทานสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัตต์ แสดงได้ดังรูปที่ 6.18

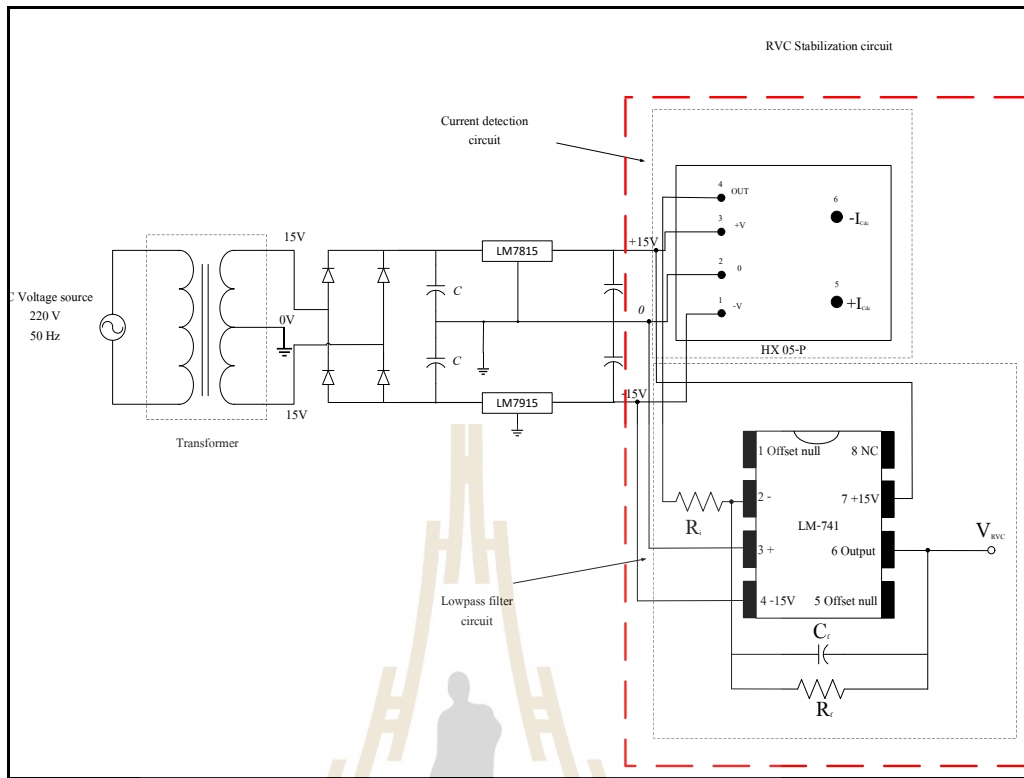


รูปที่ 6.18 ชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ขนานกันที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

จากวงจรรูปที่ 6.18 เป็นการเพิ่มเติมส่วนของการสร้างเสถียรภาพเข้าไปในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ชุดที่ 1 ที่ได้ทำการออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 6.4 โดยการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีมีการเพิ่มวงจรตรวจจับวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรรองต่อเพิ่มเข้ามา และสัญญาณที่ตรวจจับได้จะผ่านวงจรกรองผ่านต่ำละถูกส่งไปหักลบกับสัญญาณควบคุม ( $V_{ref}$ ) ที่ได้จากวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้ได้สัญญาณควบคุมใหม่ ( $V_{ref}^*$ ) และสัญญาณที่จากวงจรดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อให้ได้สัญญาณวงจรถูกหน้าที่เพื่อไปควบคุมการสวิทช์ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ชุดที่ 1 ตามหลักการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ขนานกัน ซึ่งชุดทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์หัวข้อที่ 4.3 โดยรายละเอียดสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีจะแสดงในหัวข้อถัดไป

### 6.5.2 วงจรสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

ชุดวงจรสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี ประกอบด้วย วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP พิกัดกระแสขนาด 5 A วงจรความถี่ต่ำผ่านโดยใช้โอปแอมป์เบอร์ LM741 โดยวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าและวงจรความถี่ต่ำผ่านใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกันกับวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าและวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ ขนาด -15V, 0V และ +15V รายละเอียดของวงจรสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีแสดงดังรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 ชุดวงจรสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการวีซี

ส่วนของวงจรตรวจจับวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรกรอง มีหลักการการออกแบบตัวต้านทานทางฝั่งปฏุมุมและฝั่งทุติยภูมิดังหัวข้อที่ 6.4.2 และค่าที่ได้จากการตรวจจับกระแสฝั่งปฏุมุมและแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิจะถูกวัดด้วยมัลติมิเตอร์ และแรงดันไฟฟ้าฝั่งทุติยภูมิจะถูกปรับคูนด้วยอัตราขยายโดยวงจรขยายสัญญาณเพื่อให้มีค่าเท่ากับกระแสปฏุมุมที่อ่านค่าได้

สำหรับวงจรกรองสัญญาณผ่านตัวสำหรับกรองสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุถูกสร้างขึ้นโดยใช้ไอซีออปแอมป์เบอร์ LM741 ต่อร่วมกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ โดยความถี่ผ่านต่ำต้องมีค่ามากกว่าความถี่สั้นพ้องของวงจรกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Mohamed, Y.R., Radwan, A.A.A. and Lee, T. 2012.) และการออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรกรองผ่านต่ำทำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของอัตราขยาย และค่าความถี่ผ่านต่ำ ดังสมการที่ (6.19) และ (6.20) ตามลำดับ

$$k = \frac{R_f}{R_i} \tag{6.19}$$

$$\omega_c = \frac{1}{R_f C_f} \quad (6.20)$$

เมื่อ  $k$  ในวงจรกรองสัญญาณผ่านต่ำคือค่า อัตราขยาย  $R_v$  ของชุดสร้างเสถียรภาพอาร์วีซี และ  $\omega_c$  คือความถี่ผ่านต่ำกำหนดให้มีค่ามากกว่าความถี่สั้นพ้องของวงจรกรองผ่านต่ำของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดยให้  $\omega_c$  มีขนาด 300 rad/s โดยสัญญาณที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำจะถูกส่งส่งไปที่หักลบออกจากสัญญาณควบคุม  $V_{ref}$  ที่ออกจากวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยวงจรขยายผลรวมโดยมีหลักการการออกแบบตัวต้านทานดังสมการที่ (6.21)

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i}(V_1 + V_2) \quad (6.21)$$

โดยในที่นี้ต้องการให้อัตราขยายมีค่าเท่ากับ 1 จะได้ว่าต้องออกแบบ  $R_f$  ให้มีค่าเท่ากับ  $R_i$  ในวงจรนี้ใช้  $R_f$  และ  $R_i$  ขนาด 10 k $\Omega$

และทำการกลับรูปคลื่นสัญญาณด้วยวงจรขยายแบบกลับเฟสโดยสมการสำหรับการออกแบบตัวต้านทานแสดงดังสมการที่ (6.22)

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i}V_i \quad (6.22)$$

โดยต้องการให้อัตราขยายมีค่าเท่ากับ 1 เช่นเดียวกับวงจรขยายผลรวม จะได้ว่าต้องออกแบบ  $R_f$  ให้มีค่าเท่ากับ  $R_i$  ในวงจรนี้ใช้  $R_f$  และ  $R_i$  มีขนาด 10 k $\Omega$  และทำการจำกัดขนาดของสัญญาณให้มีค่าไม่เกิน 5 V ด้วยวงจรจำกัดแรงดันโดยสัญญาณที่ได้จะถูกส่งไปทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อให้ได้ค่าวัฏจักรหน้าที่สำหรับควบคุมวงจรแปลงผันกำลังแบบบับคัทต่อไป ในส่วนของการเขียนโปรแกรมสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีจะถูกอธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป

### 6.5.3 การโปรแกรมชุดสร้างเสถียรภาพวิธีอาร์วีซี

โดยโปรแกรมสำหรับการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีจะมีส่วนของค่ากระแสที่ตรวจจับจากตัวเก็บประจุในวงจรกรองที่ผ่านวงจรกรองผ่านต่ำและขยายด้วยอัตราขยาย  $R_v$  เพิ่มเข้าไปในตัวควบคุมพีไอที่พิจารณาในรูปแบบการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง โดยขั้นตอนของการสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.4.3 สามารถเขียนแทนด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (6.23)-(6.24)

$$V_{out(i)}^* = V_{out(i)} - V_{RVC} \quad (6.23)$$

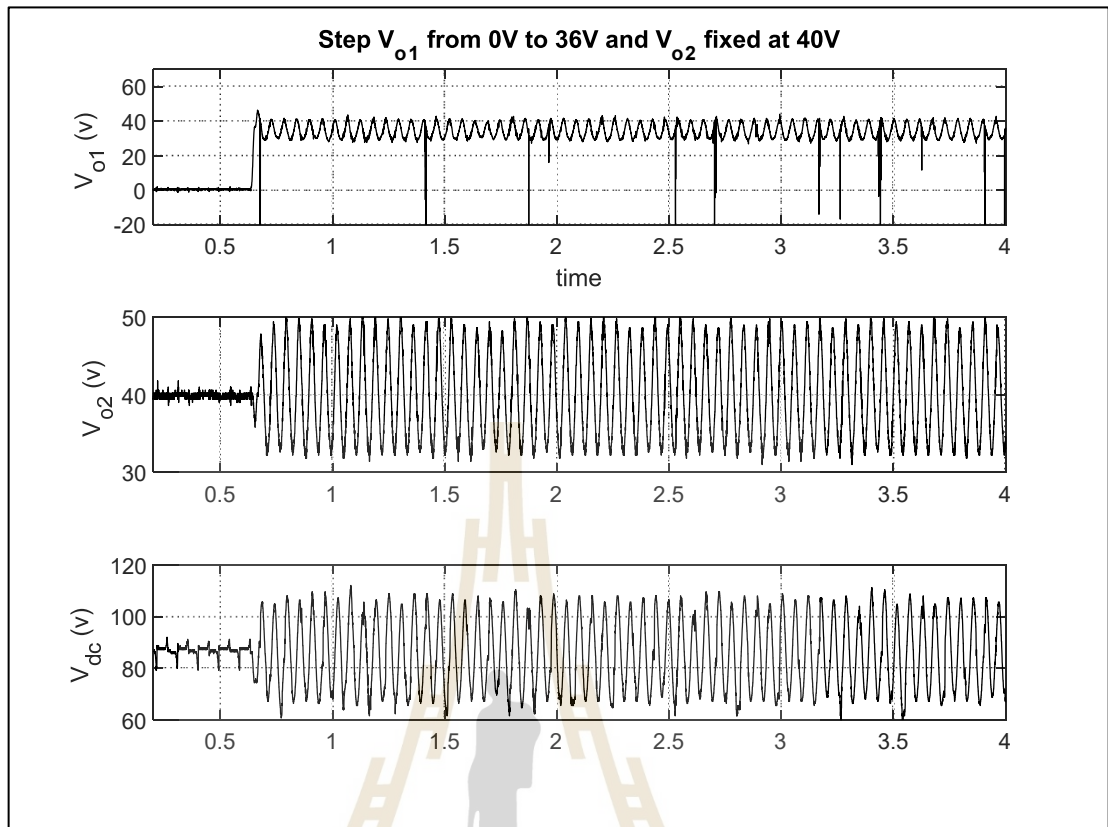
$$V_{RVC} = R_V I_{Cdcf} \quad (6.24)$$

โดยที่	$V_{out(i)}$	คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ
	$V_{RVC}$	คือ แรงดันจากการสร้างเสถียรภาพวิธีอาร์วีซี
	$V_{out(i)}^*$	คือ สัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์
	$R_V$	คือ อัตราขยายสำหรับตัวสร้างเสถียรภาพวิธีอาร์วีซี
	$I_{Cdcf}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในวงจรกรองที่ผ่านตัวกรองผ่านต่ำ

จากสมการที่ (6.23) และ (6.24) จะเป็นสมการที่ใช้สำหรับการโปรแกรมการควบคุมแบบพีไอที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีในไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR Atmega 2560 โดยรายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก จ.

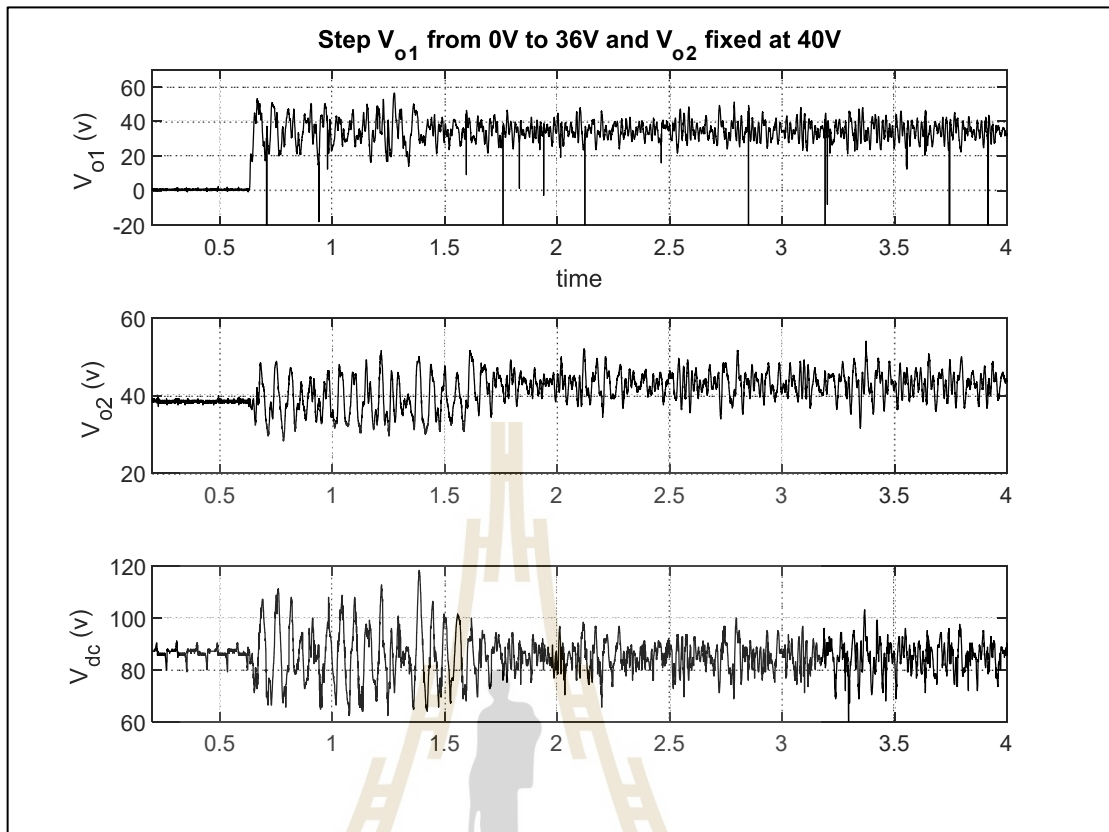
#### 6.5.4 การทดสอบการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การตรวจสอบความถูกต้องสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันกำลังแบบบัสกึ่งขานานกันที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีในรูปที่ 6.18 จะดำเนินการโดยทำการปรับค่าโหลดกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสกึ่งขุดที่ 1 เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆจนกว่าจะพบจุดการทำงานที่ขาดเสถียรภาพโดยทำการคงค่าแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสกึ่งขุดที่ 2 ไว้ที่ 40 V จากการทดสอบพบว่าแรงดันที่บัสส่งจ่าย ( $V_{dc}$ ) เกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสกึ่งขุดที่ 1 มีขนาด 36 V จากนั้นทำการบันทึกผลการทดสอบการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีแก่ระบบ โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสกึ่งขุดที่ 1 จาก 0 V เป็น 36 V โดยทำการคงค่าแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสกึ่งขุดที่ 2 ที่ 40 V แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6.20 และทำการทดสอบอีกครั้งพร้อมด้วยสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีให้แก่ระบบ แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.20 การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า





รูปที่ 6.21 ผลการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

จากรูปที่ 6.20 จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักค์ชดที่ 2 มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 0V ไปเป็น 36 V ที่เวลา 0.6 วินาที จะให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ สังเกตได้จากการเกิดการแกว่งของแรงดันบัสดีซีที่มีค่าสูง และจากรูปที่ 6.21 ทำการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีที่  $R_v = 2$  จะเห็นได้ว่าระบบจะกลับมามีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานโดยดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัสดีซีที่มีค่าลดลง ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าชุดสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีทำงานได้อย่างถูกต้อง

## 6.6 สรุป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวการสร้างชุดทดสอบสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ขนานกันที่มีการควบคุม พร้อมทั้งวงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี โดยแบ่งการนำเสนอการทดสอบวงจรออกเป็น 3 ส่วนคือส่วนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายแก่วงจรอินกร์ณีที่เกิดความผิดพลาดในระบบ วงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานโดยนำเสนอถึงหลักการออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบัก์พร้อมนำเสนอโปรแกรมตัวควบคุมพีไอสำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อชุดทดสอบดังกล่าวทั้ง 2 ชุดให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำจึงนำมาเชื่อมต่อกันให้ได้ชุดทดสอบที่มีความสอดคล้องกับระบบไฟฟ้าที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 และนำเสนอถึงการสร้างชุดอุปกรณ์และโปรแกรมสำหรับการสร้างเสถียรภาพวิธีอาร์วีซีพร้อมการทดสอบการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีในวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุม ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้ตลอดย่านการทำงาน





## บทที่ 7

### การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจริง

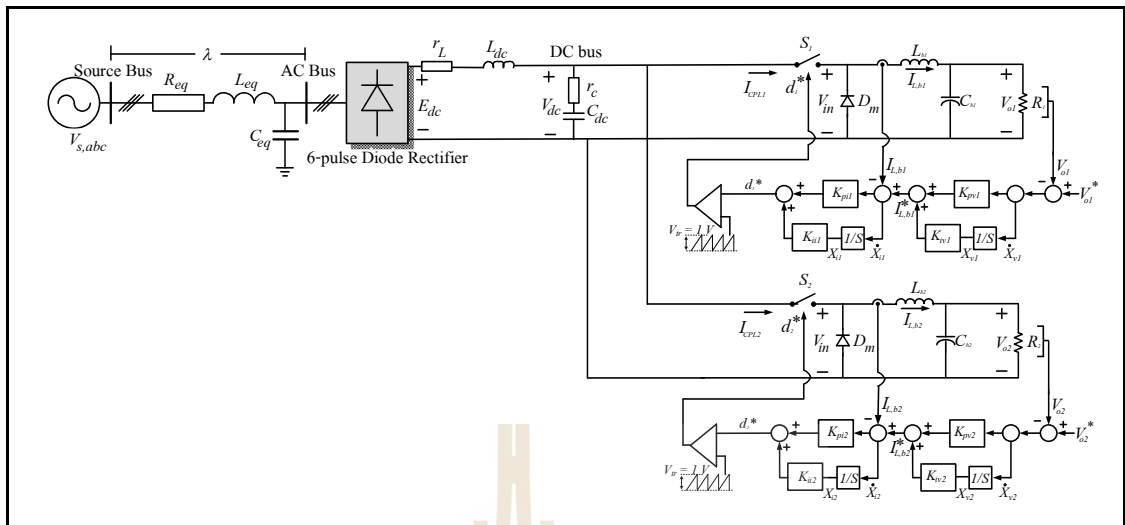
#### 7.1 บทนำ

พารามิเตอร์ในชุดทดสอบจริงที่ทำการทดสอบในบทที่ 6 มีค่าเปลี่ยนไปจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 5 จึงมีความจำเป็นในการยืนยันความถูกต้องสำหรับการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี โดยทำการวิเคราะห์หาจุดการทำงานที่ขาดเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมขนานกันกรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี และกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี ผ่านการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง และทำการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ร่วมกับการทดสอบจากชุดทดสอบจริง

#### 7.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจริง

##### 7.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงกรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงดังรูปที่ 7.1 ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสสามเฟสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ วงจรกรองสัญญาณดีซีและโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีการควบคุม 2 ชุด ต่อขนานกันซึ่งระบบไฟฟ้างกล่าวเป็นระบบที่ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงไว้ในหัวข้อที่ 5.2 ในบทที่ 5 โดยหลักการวิเคราะห์เสถียรภาพดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริงซึ่งโครงสร้างของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์คที่มีการควบคุม 2 ชุดต่อขนานกัน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริงจะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการสร้างไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ของบทที่ 4 ประกอบด้วย  $\lambda_1 - \lambda_{14}$  โดยค่าเจาะจงสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาเฉพาะขั้วเด่นที่มีเส้นทางการเคลื่อนที่ในบริเวณที่มีค่าใกล้เคียง 0 เนื่องจากเป็นค่าเจาะจงที่มีผลต่อเสถียรภาพมากที่สุด โดยค่าพารามิเตอร์ของชุดทดสอบจริงจะได้จากการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีทางปัญญาระดับสูงชุดเดียวกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ของ จุฑาทิพย์ กล้าสงคราม (จุฑาทิพย์ กล้าสงคราม (2563).) แสดงดังตารางที่ 7.1 และพารามิเตอร์ดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไป

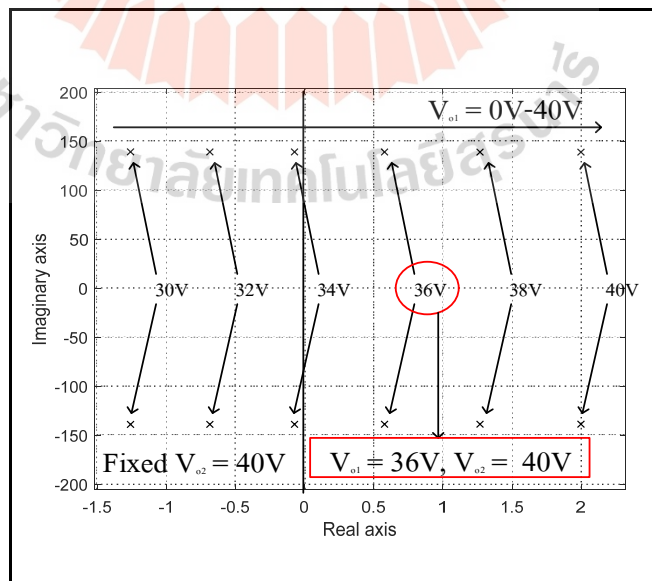
ตารางที่ 7.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริจด์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์คที่ใช้ในการทดสอบจริง

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_s$	50 V <sub>rms/phase</sub>	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
$\omega$	$2\pi \times 50$ rad/sec.	ความถี่ของระบบ
$R_{eq}$	0.05604 $\Omega$	ความต้านทานภายในสายส่ง
$L_{eq}$	0.16875 mH	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
$C_{eq}$	2 nF	ความเก็บประจุไฟฟ้าของสายส่ง
$r_L$	0.2756 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$r_c$	0.556 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

ตารางที่ 7.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้ที่ใช้ในการทดสอบจริง (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$L_{dc}$	39 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$C_{dc}$	1300 $\mu$ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$L_1=L_2$	15 mH	ความเหนี่ยวนำของโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้
$C_1=C_2$	1000 $\mu$ F	ความจุไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้
$R_1=R_2$	10 $\Omega$	ความต้านทานของโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้
$K_{pv1} = K_{pv2}$	0.07	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่โวลุ่มแรงดันไฟฟ้า
$K_{iv1} = K_{iv2}$	4.44	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่โวลุ่มแรงดันไฟฟ้า
$K_{pi1} = K_{pi2}$	1.538	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่โวลุ่มกระแสไฟฟ้า
$K_{ii1} = K_{ii2}$	7211	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่โวลุ่มกระแสไฟฟ้า
$a$	300	ค่าส่วนกลับของความถี่ตัดผ่านของวงจรสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

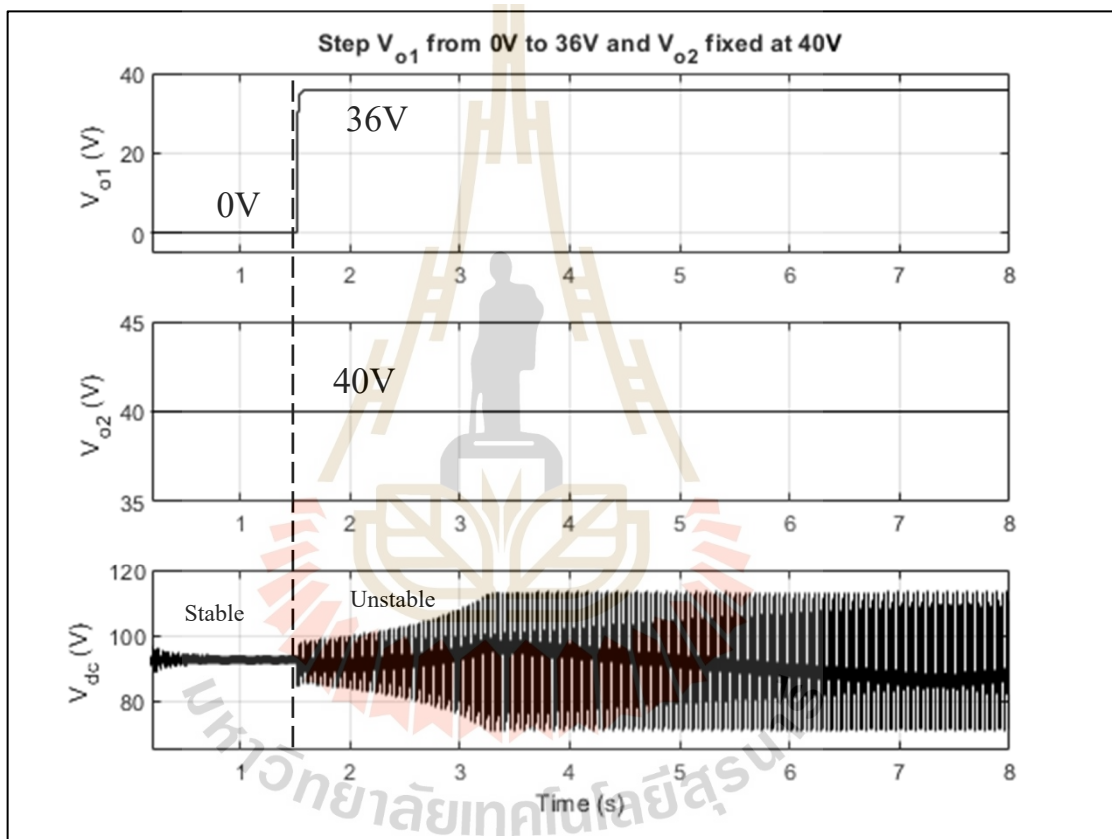
การวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำการพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้ ชุดที่ 1 ( $V_{o1}$ ) จาก 0-40 V โดยกำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้ชุดที่ 2 มีแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตคงที่ที่ค่าพิกัด 40 V



รูปที่ 7.2 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากรูปที่ 7.2 สังเกตได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถเปลี่ยนไปเป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชุดที่ 1 มีค่า 36 V และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชุดที่ 2 มีค่าคงที่ 40 V

การยืนยันผลการวิเคราะห์ของระบบที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยที่มีการปรับตั้งค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ ชุดที่ 1 ( $V_{o1}$ ) เปลี่ยนแปลงจาก 0 V ไปเป็น 36 V ที่เวลา 1.5 วินาที และแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ ชุดที่ 2 ( $V_{o2}$ ) มีค่าคงที่ 40 V แสดงดังรูปที่ 7.3

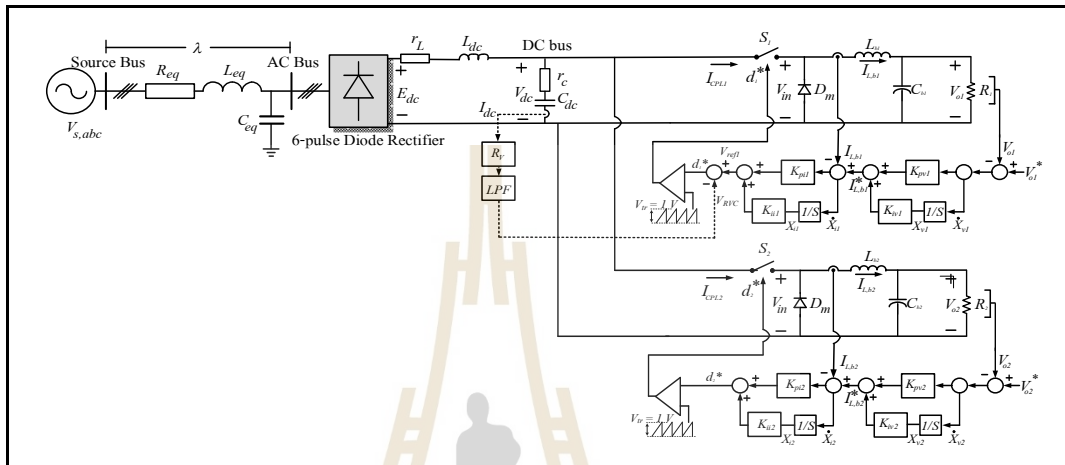


รูปที่ 7.3 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 7.3 สังเกตได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถเปลี่ยนไปเป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพได้เมื่อแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซ์ชุดที่ 1 มีค่า 36 V จะทำให้แรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) เกิดการกระเพื่อมเพิ่มมากขึ้นนั่นคือระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นที่อาศัยทฤษฎีค่าเฉลี่ยจะมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพนั้นสามารถคาดเดาจุดที่ทำให้เกิดการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง สอดคล้องกับผลการยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

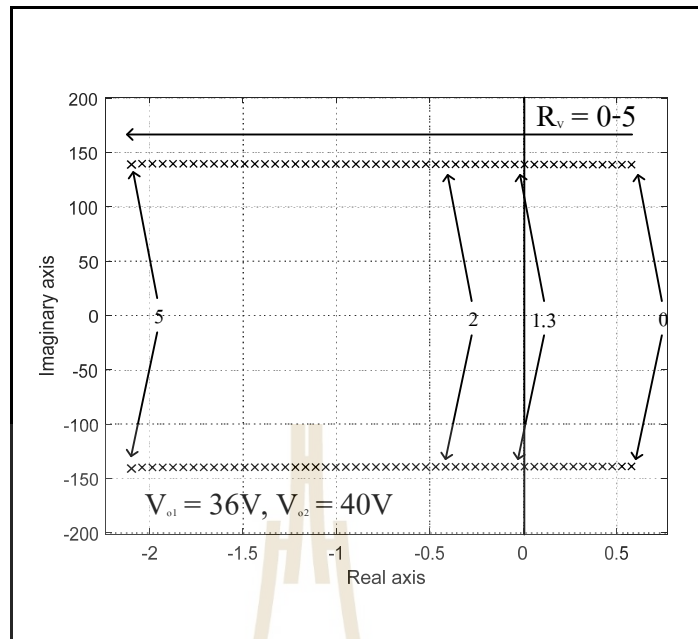
7.2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การตรวจสอบเสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีของระบบไฟฟ้าจริงที่มีโครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 7.5



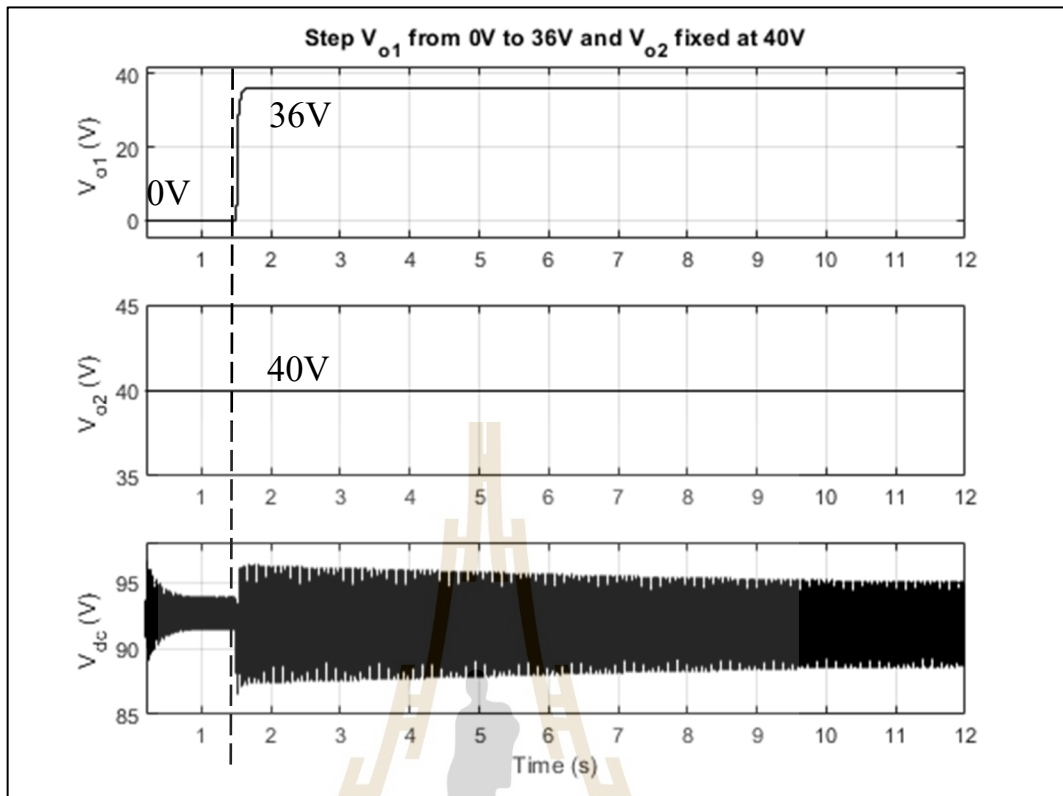
รูปที่ 7.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ขนานกันที่มีการควบคุม และมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีจะพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของ  $R_v$  จาก 0 ถึง 5 โดยกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ ชุดที่ 1 ( $V_{c1}$ ) มีค่า 36 V และแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ ชุดที่ 2 ( $V_{o2}$ ) มีค่า 40 V ดังรูปที่ 7.5 และพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของ  $R_v$  จาก 0 ถึง 5 ดังรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.5 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า  $R_v$  ที่มีผลต่อเสถียรภาพเมื่อ  $V_{o1} = 36 \text{ V}$  และ  $V_{o2} = 40 \text{ V}$

จากรูปที่ 7.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อและแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัพคัก ชุดที่ 1 ( $V_{o1}$ ) มีค่า 36 V ที่ค่า ( $R_v$ ) มีค่าเท่ากับ 0 (ยังไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี) ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และเมื่อค่า  $R_v$  มีค่าเป็น 1.3 (วงจรการสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีเริ่มทำงาน) ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่ทำให้ขั้วเด่นของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมายู่ที่ฝั่งซ้าย ซึ่งหมายถึงระบบที่ขาดเสถียรสามารถกลับมาเสถียรได้อีกครั้ง ซึ่งการยืนยันผลการวิเคราะห์ของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยที่มีการปรับตั้งค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัพคัก ชุดที่ 1 ( $V_{o1}$ ) เปลี่ยนแปลงจาก 0 V ไปเป็น 36 V ที่เวลา 1.5 วินาที และแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัพคัก ชุดที่ 2 ( $V_{o2}$ ) มีค่าคงที่ 40 V พร้อมทั้งกำหนดให้วงจรสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีเริ่มทำงานโดยกำหนดให้ค่า  $R_v$  มีค่าเท่ากับ 1.3 แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.6 การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

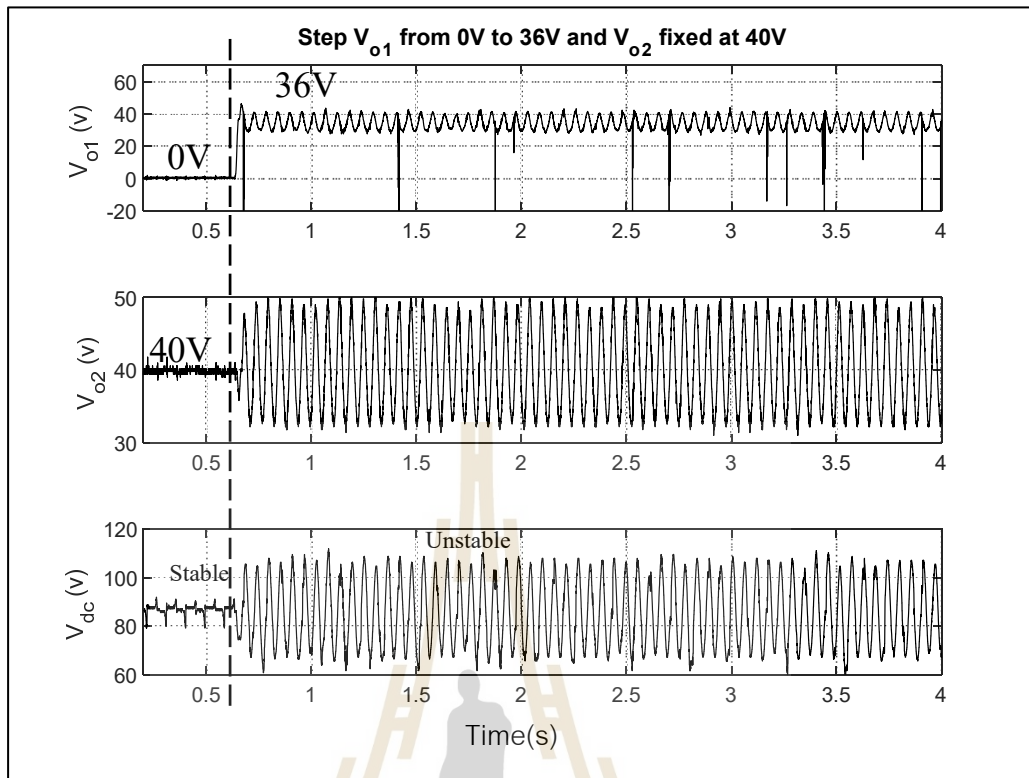
จากรูปที่ 7.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ชุดที่ 1 มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 0 V ไปเป็น 36 V ที่เวลา 1.5 วินาที และกำหนดให้วงจรสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีทำงาน ที่  $R_v = 1.3$  ตั้งแต่เริ่มต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานโดยดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัคส์ซีซีที่มีค่าลดลง และคงที่ในสภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป

### 7.3 การสร้างเสถียรภาพจากชุดทดสอบจริง

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพและการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถยืนยันความถูกต้องทั้งกรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีและกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีได้โดยการทดสอบจากชุดทดสอบจริงที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 6.5 ของบทที่ 6 โดยมีพารามิเตอร์ดังตารางที่ 7.1

การทดสอบจากวงจรจริงกรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีจะดำเนินการทดสอบโดยทำการปรับตั้งค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ ชุดที่ 1 ( $V_{o1}$ ) เปลี่ยนแปลงจาก 0V ไปเป็น 36 V และทำการคงค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ ชุดที่ 2 ( $V_{o2}$ ) ที่ 40 V โดยที่ระบบไฟฟ้ายังไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี หรือ  $R_v = 0$  ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7.7

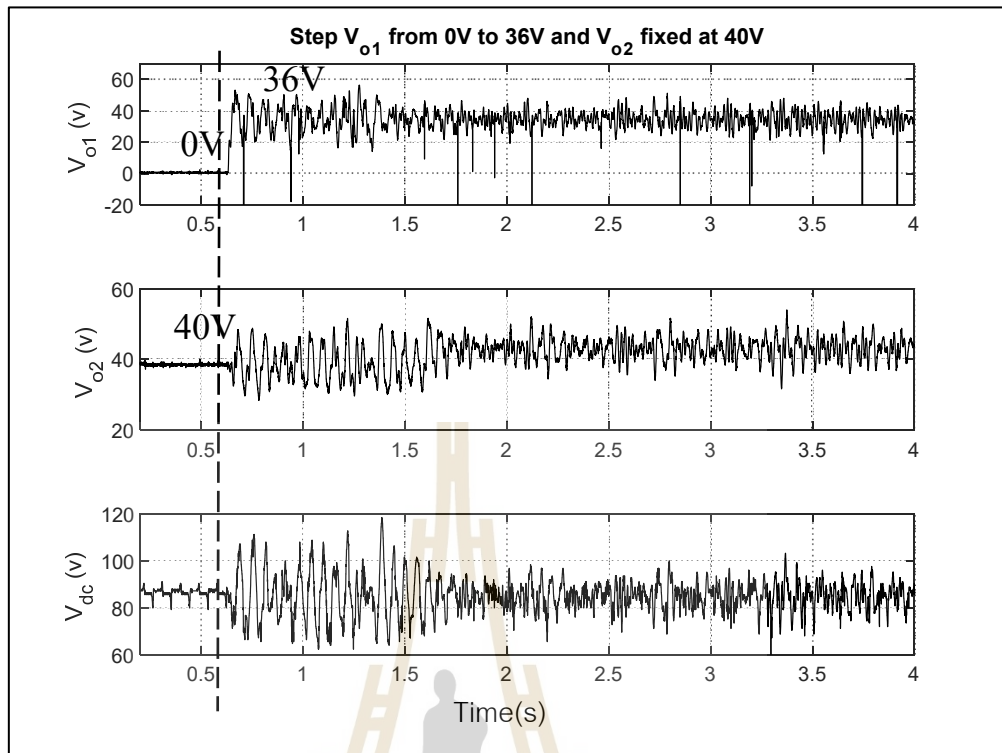




รูปที่ 7.7 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพจากชุดทดสอบจริงกรณีที่ยังไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

จากรูปที่ 7.7 สังเกตได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถเปลี่ยนไปเป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพได้เมื่อแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้กชุดที่ 1 มีค่า 36 V ที่เวลา 0.65 วินาที จะทำให้แรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) เกิดการกระเพื่อมเพิ่มมากขึ้นนั่นคือระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นที่อาศัยทฤษฎีค่าเจาะจงมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพนั้นสามารถคาดเดาจุดที่ทำให้เกิดการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและผลการยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

การพิจารณาชุดทดสอบจริงกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีจะดำเนินการทดสอบโดยทำการปรับตั้งค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้ก ชุดที่ 1 ( $V_{o1}$ ) เปลี่ยนแปลงจาก 0 V ไปเป็น 36 V และทำการคงค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบับค้ก ชุดที่ 2 ( $V_{o2}$ ) ที่ 40 V โดยที่ระบบมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีจะกำหนดให้  $R_v = 2$  เนื่องจากคำนึงถึงผลของค่าความต้านทานภายในของอุปกรณ์ในชุดทดสอบซึ่งจะทำให้การสั่นไหวของรูปสัญญาณมีค่าน้อยลงและเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระบบมีเสถียรภาพ โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.8 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพจากชุดทดสอบจริงกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

จากรูปที่ 7.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัตค์ ชุดที่ 1 มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 0 V ไปเป็น 36 V ที่เวลา 0.65 วินาที และกำหนดให้วงจรสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีทำงาน ที่  $R_v = 2$  ตั้งแต่เริ่มต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบมีเสถียรภาพตลอดการทำงานโดยดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัสดีซีที่ไม่เกิดการกระเพื่อมเพิ่มเติม และคงที่ในสภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป แต่สมรรถนะของโหลดกำลังไฟฟ้ที่มีการควบคุมจะถูกรบกวน (Areerak, K-N., Sopapirm, T., Bozhko, S.V., Hill, C., Suyapan, A. and Areerak, K-L. 2018.)

#### 7.4 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับชุดทดสอบจริงของวงจรงเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบuckขนานกันในกรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีและกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีด้วยหลักทฤษฎีบทค่าเจาะงที่ได้จากบทที่ 5 โดยคำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ไว้แล้วในบทที่ 4 และทำการแทนค่าพารามิเตอร์ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในชุดทดสอบจริง พร้อมทั้งทำการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK พร้อมกับการทดสอบจากชุดทดสอบจริง จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและผลการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพ พบว่าจุดการทำงานที่เกิดการขาดเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ามีความสอดคล้องกับผลการทดสอบชุดทดสอบจริงคือมีจุดการทำงานที่เกิดการขาดเสถียรภาพที่จุดเดียวกัน และยืนยันถึงการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีซึ่งสามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้ตลอดย่านการทำงาน



## บทที่ 8

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอถึงหลักการการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ขนานกันที่มีการควบคุม โดยเริ่มจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า และการสร้างเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจาก โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานสำคัญสำหรับการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยได้นำเสนอไว้ในส่วนของปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในบทที่ 2

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีการควบคุม พร้อมหลักการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุม โดยอาศัยวิธีการตีควรร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยการทำให้เป็นเชิงเส้นจะอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับ 1 พร้อมทั้งคำนวณค่าในสถานะคงตัว และได้นำเสนอถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการดั้งเดิม และหลักการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี พร้อมการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ได้ กับระบบไฟฟ้าบนชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งผลตอบสนองที่ได้มีความสอดคล้องกันทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว องค์ความรู้ในบทที่ 3 เป็นพื้นฐานสำคัญที่ใช้ในการประยุกต์ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันกำลังแบบบัสกันได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ซึ่งพิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม กรณีที่มีตัวควบคุม และกรณีที่มีตัวควบคุมพร้อมตัวสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีพร้อมหลักการสร้าง เสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสกัน ได้อาศัยวิธีคิดร่วมกับวิธี ค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยมีองค์ความรู้พื้นฐานความรู้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การทำให้เป็นเชิงเส้น และการหาค่าในสถานะคงตัวจากบทที่ 3 และตรวจสอบความถูกต้องของ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ ได้ กับระบบไฟฟ้าบนชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งจากผลการ เปรียบเทียบ พบว่าผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ได้สอดคล้องกับ ผลตอบสนองของชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังในโปรแกรมดังกล่าว ทั้งในสถานะชั่วคราว และในสถานะอยู่ตัว

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัสกัน ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงในการ วิเคราะห์เสถียรภาพกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามเวลาที่ได้พิสูจน์ไว้ในบทที่ 4 จาก ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทำให้ทราบถึงจุดการทำงานที่เกิดการขาดเสถียรภาพในระบบไฟฟ้า และ การสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้ตลอด ย่างการทำงาน พร้อมทั้งทำการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง MATLAB/SIMULINK จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ดำเนินการในบท นี้มีความถูกต้อง และผลการวิเคราะห์เสถียรภาพนี้ได้รับการยืนยันความถูกต้องโดยการสร้างชุดทดสอบ จริงซึ่งขั้นตอนการสร้างได้ถูกอธิบายไว้ในบทที่ 6 โดยการสร้างชุดทดสอบแบ่งการทดสอบวงจร ออกเป็น 3 ส่วนคือส่วนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานเพื่อป้องกัน ไม่ให้เกิดความเสียหายแก่วงจรอื่นกรณีที่เกิดความผิดปกติในระบบ วงจรแปลงผันกำลังแบบบัสที่มี โหลดเป็นตัวต้านทานโดยนำเสนอถึงหลักการออกแบบพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบัสพร้อม นำเสนอโปรแกรมตัวควบคุมพีไอสำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อชุดทดสอบดังกล่าวทั้ง 2 ชุด ให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำจึงนำมาเชื่อมต่อกันให้ชุดทดสอบที่มีความสอดคล้องกับระบบ ไฟฟ้าที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 และนำเสนอถึงการสร้างชุดอุปกรณ์และโปรแกรมสำหรับการสร้าง เสถียรภาพวิธีอาร์วีซีพร้อมการทดสอบการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีในวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัสที่มีการควบคุม ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการสร้าง เสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้ตลอดย่นการ ทำงาน อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ในชุดทดสอบจริงมีค่าเปลี่ยนไปจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง สถานการณ์ในบทที่ผ่านมา ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ไฟฟ้าจริงในบทที่ 7 โดยทำการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับชุดทดสอบจริงของวงจรเรียงกระแสสาม เฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสกันกรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีและ กรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยคำนวณได้จากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ไว้แล้วในบทที่ 4 และทำการแทนค่าพารามิเตอร์ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในชุด ทดสอบจริง พร้อมทั้งทำการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและผลการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพ

พบว่าจุดการทำงานที่เกิดการขาดเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ามีความสอดคล้องกับผลการทดสอบชุดทดสอบจริงคือมีจุดการทำงานที่เกิดการขาดเสถียรภาพที่จุดเดียวกัน และยืนยันถึงการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีซึ่งสามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้ตลอดย่านการทำงาน

## 8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

- ชุดฮาร์ดแวร์ของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์อาจเลือกใช้ฮาร์ดแวร์ที่มีสมรรถนะสูงกว่านี้เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำชัดเจนมากขึ้น
- ในอนาคตสามารถทำการศึกษาการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีร่วมกับระบบปัญญาประดิษฐ์ได้ต่อไป
- ควรมีการทดสอบการขาดเสถียรภาพและ การสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีในระบบไฟฟ้าชุดอื่นที่มีค่าพารามิเตอร์แตกต่างกัน
- ในขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ควรมีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อยืนยันความถูกต้อง
- ในอนาคตสามารถศึกษาผลของการขนานวงจรที่เพิ่มเข้ามาในระบบไฟฟ้าที่มากขึ้น และผลของการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีกับระบบไฟฟ้างกล่าว



## รายการอ้างอิง

- Jusoh, A.B. (2004). The Instability Effect of Constant Power Loads. **PECon 2004. Proceedings. National Power and Energy Conference.** :175-179.
- Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A. (2006). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives. **IEEE Trans. on Vehicular Tech.** 55(4): 1112- 1125.
- Emadi, A.,Khaligh, A.,Rivetta, C.H., Geoffrey A. (2010). Discontinuous-Conduction Mode DC/DC Converters Feeding Constant-Power Loads **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS.** 57(4): 1318-1329.
- Sulligoi, G., Vicenzutti, A.,Voltage, Arcidiacono, V., and Khersonsky, Y. (2016) Stability in Large Marine-Integrated Electrical and Electronic Power Systems. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS.**52(4):358-3594.
- Middlebrook, R.D. (1967). Input Filter Consideration in Design and Application of Switching Regulators. **IEEE Industry Application Society Annual Meeting.**: 366-382.
- Slotine, J.J.E.and Li, W. (1991). Applied Nonlinear Control. **Prentice-Hall.**
- 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.
- Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M. (1997). Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach. **IEEE Trans. On Circuit and Systems.** 44: 767-770.
- Han, S.B., Choi, N.S., Rim, C.T., and Cho, G.H. (1998). Modeling and Analysis of Static and Dynamic Characteristics for Buck-Type Three-Phase PWM Rectifier by Circuit DQ Transformation. **IEEE Trans. on Power Electronics.** 13(2): 323-336.



- Emadi, A. (2004). Modelling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems using the Generalized State Space Averaging Method. **IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. 21: 1008-1014.
- Emadi, A. (2004). Modeling and Analysis of Multi converter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. **IEEE Trans. on Indus. Elect.** 51(3): 661-668.
- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P. (2008). Stability Analysis and Modelling of AC-DC System with Mixed Load Using DQ-Transformation Method. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)**. : 19-24.
- Chajjarunudomrung, 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.
- Magne, P., Marx, D., Nahid, M.B., Pierfederici, S., and Davat, B.. (2012). Large Signal Stability Analysis Tools in DC Power Systems with Constant Power Loads and Variable Power Loads – A Review. **IEEE Trans. on Power Electronics**. 27(4): 1773-1786.
- Areerak, K-N, BOZHKO, S. V., ASHER, G. M., DE LILLO, L., and THOMAS, D. W. P. (2012). Stability Study for a Hybrid AC-DC More-Electric Aircraft Power System. **IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS**. 48(1): 329-347.
- Liu, X., Bian, Y., Fan, S. (2015) Large Signal Stabilization Method of Constant Power Loads by Adding R Parallel Damping Filters. **2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**.: 1314-1319.
- Dahono, P.A. (2003) A Method to Damp Oscillations on the Input LC Filter of Current-Type AC-DC PWM Converters by Using a Virtual Resistor. **INTELEC'O3**.
- Usman, I.M., Godoy, E., Lefranc, P., Sadarnac, D., and Karimi, C. (2008) A Control Strategy to Stabilize PWM DC-DC Converters with Input Filters Using State-Feedback and Pole-Placement. **INTELEC 2008 - 2008 IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference**.: 1-5.
- 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," **IEEE Trans. Ind. Electron.** 56(5): 1428-1439.
- Rahimi A.M., Williamson G.A. and Emadi A. (2010). Loop-Cancellation Technique: A Novel Nonlinear Feed to Overcom the Destabilizing Effect of Constant-Power Loads. **IEEE Trans. On Vehicular Technology**. 59(2):650-661.

- Liutannakul P., Awan A-B., Pierfederici S., Nahid-Mobarakeh B. and Meibody-Tabor F. (2010). Linear stabilization of a DC bus supplying a constant power load: A general design approach. *IEEE Trans. Power Electronics*. 25(2):475-488.
- Mohamed Y.R., Radwan A.A.A. and Lee T. (2012). Decoupled reference-voltage-based active dc-link stabilization for PMSM drives with tight-speed regulation. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 59(12) : 4523–4536.
- Wu, M. and Lu D.D-C. (2014) A Novel Stabilization Method of LC Input Filter With Constant Power Loads Without Load Performance Compromise in DC Microgrids. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**. 62(7): 4552-4562.
- Wu M. and Lu D. D. C. (2015). Investigation on active method for stabilization of LC input filter and dc/dc buck converter under voltage mode control. **IEEE Power Electron. Drive Syst. (PEDS)**. :721–726.
- Mahmoudi, H., Aleenejad, M., and Ahmadi, R. (2016) A New Modulated Model Predictive Control Method for Mitigation of Effects of Constant Power Loads. **IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)**. :1-5.
- Liu, X., Bian, Y., Fan, S. (2017) Active Stabilization Control Strategy for Storage System Paralleled with Constant Power Loads. **20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**. :1-5.
- Sopapirm, T. (2018) Instability Mitigation of a Three-Phase Diode Rectifier Feeding a Controlled Buck Converter By using the Active Damping Method. **21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**. :745-748.
- Areerak, K-N., Sopapirm, T., Bozhko, S., Hill, C.I., Suyapan, A., and Areerak, K-L. (2018) Adaptive Stabilization of Uncontrolled Rectifier Based AC–DC Power Systems Feeding Constant Power Loads. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**. 33(10): 8927-8935.
- Mohan, N., Underland, T.M., and Robbins, W.P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. John Wiley & Son.
- Tsang K.M., and Chan W.L. (2005). Cascade controller for DC/DC buck convertor. *IEE Electric Power Applications*. 152(4):827-831.
- Mishra, R., Hussain, M.N., and Agarwal, V. A. (2016) Sliding Mode Control Based Stabilization Solution for Multiple Constant Power Loads with Identical Input Filters Interfaced with the DC bus of a ‘More Electric’ Aircraft.
- Rivetta, C., Williamson, G.A., and Emadi, A. (2005). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Sea and Undersea Vehicles: Statement of the Problem and Comprehensive Large-Signal Solution. **Proc. IEEE Electric Ship Tech. Symposium.**: 313-320.

- Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M. (1997). Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach. **IEEE Trans. on Circuit and Systems**. 44: 767-770.
- Emadi, A. (2004). Modeling and Analysis of Multiconverter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. **IEEE Trans. on Indus. Elect**. 51(3):661-668.
- Emadi, A., Ehsani, M., and Miller, J.M. (2004). Vehicular Electric Power Systems: Land, Sea, Air, and Space Vehicles.
- Emadi, A. (2004). Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. **IEEE Trans. on Indus. Elect**. 51(5): 992-1000.
- Chao, K-H. (2009). Dynamic Modeling and Robust Control of Multi-Module Parallel Soft-Switching-Mode Rectifiers. **WSEA Transactions on Systems**. 8: 659-672.
- Han, L., Wang, J., and Howe, D. (2007). State-space average modelling of 6- and 12-pulse diode rectifiers. **The 12<sup>th</sup> European Conf. on Power Elect. and Appl**.
- Baghrmian, A., and Forsyth, A.J. (2004). Averaged-Value Models of Twelve-Pulse Rectifiers for Aerospace Applications. **Power Electronics, Machines, and Drives (PEMD 2004)**: 220-225.
- Uan-Zo-li, A., Burgos, R.P., Lacaux, F., Wang, F., and Boroyevich, D. (2004). Assessment of Multi-Pulse Converter Average Models for Stability Studies Using a Quasi-Stationary Small-Signal Technique. **Power Electronics and Motion Control Conference 2004**. : 1654-1658.
- Sudhoff, S.D., and Wasynczuk, O. (1993). Analysis and Average-Value Modeling of Line-Commutated Converter-Synchronous Machine Systems. **IEEE Trans. on Energy Conversion**. 8(1): 92-99.
- Sudhoff, S.D. (1993). Waveform Reconstruction from the Average-Value Model of Line-Commutated Converter-Synchronous Machine Systems. **IEEE Trans. on Energy Conversion**. 8(3): 404-410.
- Sudhoff, S.D. (1993). Analysis and Average-Value Modeling of Dual Line-Commutated Converter-6-Phase Synchronous Machine Systems. **IEEE Trans. on Energy Conversion**. 8(3): 411-417.
- Sudhoff, S.D., Corzine, K.A., Hegner, H.J., and Delisle, D.E. (1996). Transient and Dynamic Average-Value Modeling of Synchronous Machine Fed Load-Commutated Converters. **IEEE Trans. on Energy Conversion**. : 508-514.
- Jadric, I., Borojevic, D., and Jadric, M. (2000). Modeling and Control of a Synchronous Generator with an Active DC Load. **IEEE Trans. on Power Electronics**. 15(2): 303- 311.

- Rim, C.T., Hu, D.Y., and Cho, G.H. (1990). Transformers as Equivalent Circuits for Switches: General Proofs and D-Q Transformation-Based Analyses. **IEEE Trans. on Indus. Appl.** 26(4): 777-785.
- 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 CircuitD-Q Transformation. **IEEE Trans. on Power Electronics.** 9(4): 390-396.
- 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. **13<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008)**.
- Areerak, K-N., Bozhko, S., Asher, G., Lillo, L.de., Watson, A., Wu, T., and Thomas, D.W.P. (2009). The Stability Analysis of AC-DC Systems including Actuator Dynamics for Aircraft Power Systems. **13<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2009)**.
- Mohan, N., Underland, T.M., and Robbins, W.P. (2003). Power Electronics: Converters, Applications, and Design. **John Wiley & Son.**
- Ong, C-M. (1998). Dynamic Simulation of Electric Machinery using MATLAB/SIMULINK. Gamelin, T.W. (2000). Complex Analysis.
- Emadi, A., Fahimi, B., and Ehsani, M. (1999). On the Concept of Negative Impedance Instability in the More Electric Aircraft Power Systems with Constant Power Loads. **Soc. Automotive Eng. Journal.** : 689-699.
- Kulworawanichpong, T., Areerak, K-L., Areerak, K-N., Puangdownreong, D., and Sujitjorn, S. (2005). Dynamic parameter identification of induction motors using intelligent search techniques. **IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC2005).** : 328-332.
- Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M. and Thomas D.W.P. (2008). Stability Analysis and Modelling of AC-DC System with Mixed Load Using DQ-Transformation Method. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08).** :19-24.
- Areerak K-N., Bozhko S.V. Asher G.M. and Thomas D.W.P. (2008). DQ-Transformation Approach for Modelling and Stability Analysis of AC-DC Power System with Controlled PWM Rectifier and Constant Power Loads. **13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008).** :2049-2054.
- Areerak K-N., Bozhko S., Asher G., Lillo L.de., Watson A., Wu T. and Thomas D.W.P. (2009). The Stability Analysis of AC-DC Systems including Actuator Dynamics for Aircraft Power Systems. **13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2009).** :1-10.

- Baghrmian A. and Forsyth A.J. (2004). Averaged-Value Models of Twelve-Pulse Rectifiers for Aerospace Applications. **Power Electronics, Machines, and Drives (PEMD 2004)**. 1:220-225.
- Chao K-H. (2009). Dynamic Modeling and Robust Control of Multi-Module Parallel Soft-Switching-Mode Rectifiers. **WSEA Transactions on Systems**. 8:659-672.
- Cespedes M., Xing L. and Sun J. (2011). Constant-Power Loads System Stabilization by Passive Damping. **IEEE Trans. Power Electronics**. 26(7):1832-1836.
- Dong P., Cheng K.W.E., Ho S.L., Yang J.M. and Choi W.F. (2006). Modeling and Examination of Class-E DC-DC Converter using Piezoelectric Transformer for Automotive Applications. Power Electronics Specialists Conference. :1-6.
- Middlebrook R. D. (1967). Input filter consideration in design and application of switching regulators. in Conf, Rec. IEEE IAS Annu. Meeting,:366-382.
- Rivetta C., Williamson G.A. and Emadi A. (2005). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Sea and Undersea Vehicles: Statement of the Problem and Comprehensive Large-Signal Solution. Proc. IEEE Electric Ship Tech. Symposium. : 313-320.
- Mahdavi J., Emadi A., Bellar M.D. and Ehsani M. (1997). Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach. **IEEE Trans. on Circuit and Systems**. 44:767-770.
- Emadi A. (2004). Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. **IEEE Trans. on Indus. Elect**. 51(5): 992-1000.
- Han S.B., Choi N.S., Rim C.T. and Cho G.H. (2002). Modeling and Analysis of Static and Dynamic Characteristics for Buck-Type Three-Phase PWM Rectifier by Circuit DQ Transformation. **IEEE Trans. on Power Electronics**. 13(2): 323-336.
- Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M. and Thomas D.W.P. (2008). Stability analysis and modelling of AC-DC system with mixed load Using DQ-transformation method. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)**, Cambridge, UK, : 19-24.
- Areerak K-N., Sopapirm T., Bozhko S.V., Hill C., Suyapan A. and Areerak K-L. (2018). Adaptive Stabilization of Uncontrolled Rectifier Based AC-DC Power Systems Feeding Constant Power Loads. **IEEE Trans. Power Electronics**. 33(10) : 8927-8935.
- Cespedes M., Xing L. and Sun J. (2011). Constant-power loads system stabilization by passive damping. **IEEE Trans. Power Electron**. 26(7) : 1832-1836



- 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
- 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 Trans. on Power Electronics. 9(4):390-396.
- Iftikhar M., Godoy E., Lefranc P., Sadarnac D., and Karimi C. (2008). A control strategy to stabilize PWM dc-dc converters with input filters using state-feedback and pole-placement. in Proc. IEEE Telecommun. Energy Conf. (INTELEC). :pp. 1-5.
- Weichel R., Wang G., Mayer J., and Hofmann, H. (2010). Active stabilization of dc-dc converters with input LC filters via current-mode control and input voltage feedback. in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE). :pp. 3409-3413.
- Puangdownreong D., Areerak K-N., Srikaew A. and Sujitjorn S. (2002). System Identification via Adaptive Tabu Search. IEEE ICIT'02. 2:915-920.
- Liutanakul P., Pierfederici S., Bilal A. and Nahid-Mobarakeh B. (2008). Stability investigation of inverter motor drive system with input filter - Optimization of the DC-link capacitance value. Power Electronics Specialists Conference. :3728-3734.



ภาคผนวก ก.

โปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตัน-ราฟสัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



\*\*\*\*\*  
 ภาคผนวก ก.1 โปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตัน-ราฟสัน สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟส  
 แบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักก์ที่ไม่มีการควบคุม  
 \*\*\*\*\*

Vs=30;

f=50;

Req=0.1;

Leq=24e-6;

Ceq=2e-9;

Cf=1000e-6;

rf=0.1;

Lf=30e-3;

ru=(3\*Leq\*2\*pi\*f)/pi;

d=0.6;

Z=sqrt(Req^2+(2\*pi\*f\*Leq)^2);

Gamma=atand((2\*pi\*f\*Leq)/Req);

R=10;

Vbus(1)=30;

Lambda(1)=0.000001;

alpha=0;

ea\_Vbus=100;

ea\_Lambda=100;

es=1e-10;

k=1;

Idc\_0 = sqrt(3)/(sqrt(3/2)\*2\*sqrt(3)/pi)\*abs((Vs-Vbus(k)\*exp(-  
 j\*Lambda(k)))/(Z\*exp(j\*Gamma)));

edc\_0=3\*sqrt(3)\*sqrt(2)\*Vbus(k)/pi

vdc\_0=edc\_0-(ru+rf)\*Idc\_0

vo1=d\*vdc\_0

```

Ploss=(ru+rf)*(Idc_0^2);
Pb=vo1^2/R;
Pbus=Pb;
Qbus=Pbus*tand(alpha);

while 1
f1=(Vbus(k)*Vs*cosd(Gamma-Lambda(k))/Z-(((Vbus(k)^2)*cosd(Gamma))/Z)-Pbus/3;
f2=(Vbus(k)*Vs*sind(Gamma-Lambda(k))/Z-(((Vbus(k)^2)*sind(Gamma))/Z)+Qbus/3;
f1_Vbus=(Vs*cosd(Gamma-Lambda(k))/Z-(((2*Vbus(k))*cosd(Gamma))/Z);
f1_Lambda=(Vbus(k)*Vs*sind(Gamma-Lambda(k))/Z;
f2_Vbus=(Vs*sind(Gamma-Lambda(k))/Z-(((2*Vbus(k))*sind(Gamma))/Z);
f2_Lambda=-(Vbus(k)*Vs*cosd(Gamma-Lambda(k))/Z;

Vbus(k+1)=Vbus(k)-(((f2_Lambda*f1)-(f1_Lambda*f2))/((f1_Vbus*f2_Lambda)-
(f1_Lambda*f2_Vbus)));
Lambda(k+1)=Lambda(k)-(((f1_Vbus*f2)-(f2_Vbus*f1))/((f1_Vbus*f2_Lambda)-
(f1_Lambda*f2_Vbus)));

Idc=(Vs-
Vbus(k+1)*cosd(Lambda(k+1))+i*Vbus(k+1)*sind(Lambda(k+1)))/(Z*cosd(Gamma)+i*(Z*
sind(Gamma)));
Idc=(abs(Idc)*sqrt(3))/(sqrt(3/2)*2*sqrt(3)/pi);

Edc1=((3*sqrt(3)*sqrt(2)*Vbus(k+1))/pi)*cosd(alpha);
Vdc=Edc1-(ru*Idc)-(rf*Idc);
vo=d*Vdc
Ploss=(ru+rf)*(Idc^2);
Pb=vo^2/R;
Pload=Pb;
Ploss=(ru+rf)*(Idc^2);

Pbus=Pload+Ploss;
Qbus=0;

ea_Vbus=abs((Vbus(k+1)-Vbus(k))/Vbus(k+1))*100;
ea_Lambda=abs((Lambda(k+1)-Lambda(k))/Lambda(k+1))*100;

```

```
if ea_Vbus<=es&&ea_Lambda<=es
    Lambda_degree=Lambda(k)
    Lambda_radius=Lambda(k)*(pi/180)
    Vdc=Vdc
    break
end
```

```
k=k+1;
```

```
end
```

ค่าสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณของลูปโปรแกรมการค้นหาวัดด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

```
Lambda = Lambda_degree
```

```
Vdc=vdc
```



\*\*\*\*\*  
 ภาคผนวก ก.2 โปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตัน-ราฟสัน สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟส  
 แบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบับคักที่มีการควบคุม  
 \*\*\*\*\*

Vs=50;  
 f=50;  
 Req=0.1;  
 Leq=24e-6;  
 Ceq=2e-9;  
 Cf=1000e-6;  
 rf=0.1;  
 Lf=30e-3;  
 ru=(3\*Leq\*2\*pi\*f)/pi;

vo1=35;

Z=sqrt(Req^2+(2\*pi\*f\*Leq)^2);  
 Gamma=atand((2\*pi\*f\*Leq)/Req);

R=10;  
 Pb=vo1^2/R;  
 alpha=0;

Kpv=0.1;  
 Kiv=10;  
 Kpi=0.7210;  
 Kii=2060.1;

Vbus(1)=50;  
 Lambda(1)=0;

Pbus=Pb;  
 Qbus=Pbus\*tand(alpha);  
 ea\_Vbus=100;  
 ea\_Lambda=100;  
 es=1e-6;



```

k=1;

while 1
f1=(Vbus(k)*Vs*cosd(Gamma-Lambda(k)))/Z-(((Vbus(k)^2)*cosd(Gamma))/Z)-Pbus/3;
f2=(Vbus(k)*Vs*sind(Gamma-Lambda(k)))/Z-(((Vbus(k)^2)*sind(Gamma))/Z)+Qbus/3;

f1_Vbus=(Vs*cosd(Gamma-Lambda(k)))/Z-(((2*Vbus(k))*cosd(Gamma))/Z);
f1_Lambda=(Vbus(k)*Vs*sind(Gamma-Lambda(k)))/Z;
f2_Vbus=(Vs*sind(Gamma-Lambda(k)))/Z-(((2*Vbus(k))*sind(Gamma))/Z);
f2_Lambda=-(Vbus(k)*Vs*cosd(Gamma-Lambda(k)))/Z;

Vbus(k+1)=Vbus(k)-(((f2_Lambda*f1)-(f1_Lambda*f2))/((f1_Vbus*f2_Lambda)-
(f1_Lambda*f2_Vbus)));
Lambda(k+1)=Lambda(k)-(((f1_Vbus*f2)-(f2_Vbus*f1))/((f1_Vbus*f2_Lambda)-
(f1_Lambda*f2_Vbus)));

Idc=(Vs-
Vbus(k+1)*cosd(Lambda(k+1))+i*Vbus(k+1)*sind(Lambda(k+1)))/(Z*cosd(Gamma)+i*(Z*
sind(Gamma)));
Idc=(abs(Idc)*sqrt(3))/(sqrt(3/2)*2*sqrt(3)/pi);
Edc1=((3*sqrt(3)*sqrt(2)*Vbus(k+1))/pi)*cosd(alpha);
Vdc=Edc1-(ru*Idc)-(rf*Idc);
Pload=Pb;
Ploss=(ru+rf)*(Idc^2);
Pbus=Pload+Ploss;
Qbus=Pbus*tand(alpha);

ea_Vbus=abs((Vbus(k+1)-Vbus(k))/Vbus(k+1))*100;
ea_Lambda=abs((Lambda(k+1)-Lambda(k))/Lambda(k+1))*100;

if ea_Vbus<=es&&ea_Lambda<=es
    Lambda_degree=Lambda(k);
    Lambda_radius=Lambda(k)*(pi/180);
    Vdc=Vdc;
    break
end

```

```
k=k+1;
```

```
end
```

```
iL=vo1/R;
```

```
Xv=((iL)+(Kpv*vo1)-(Kpv*vo1))/Kiv;
```

```
Xi=(vo1)/(Vdc*Kii);
```

```
Vdc00=Vdc;
```

```
Xi00=Xi;
```

```
Xv00=Xv;
```

```
Ib00=iL;
```

```
Vo00=vo1;
```

```
Idc00=Idc;
```

ค่าสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณของลูบโปรแกรมการค้นหาด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

```
Lampda = Lambda_degree
```

```
Vdc=vdc
```

ค่าสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณค่าในสภาวะคงตัว

```
vo=vo1;
```

```
iL=vo/R;
```

```
Xv=((iL)+(Kpv*vo)-(Kpv*vo))/Kiv;
```

```
Xi=(vo)/(vdc*Kii);
```

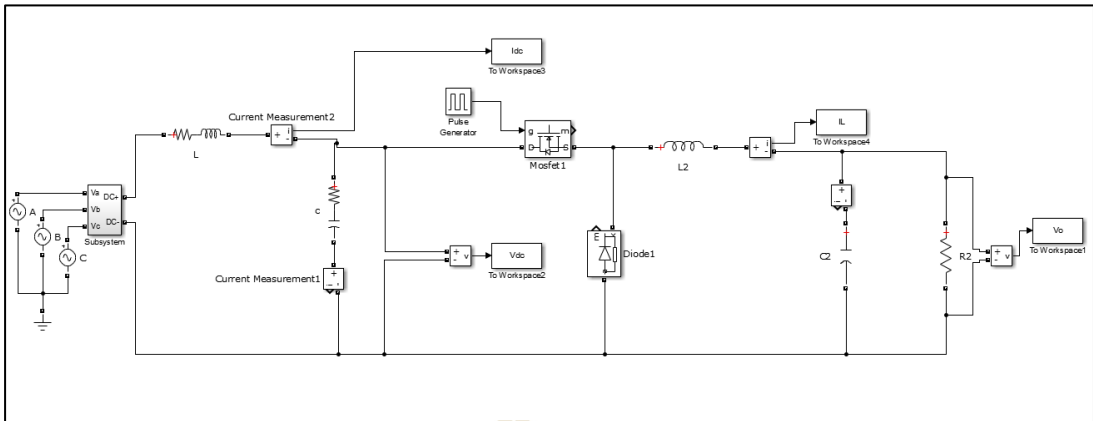
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



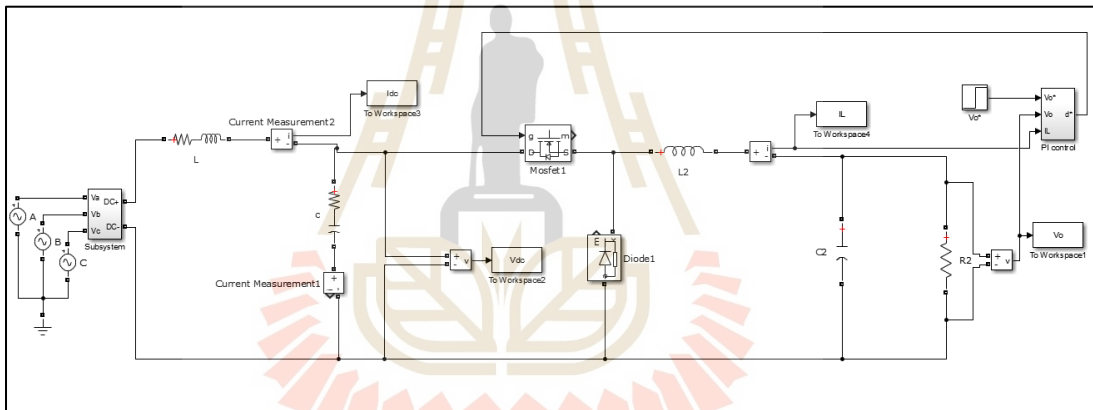
ภาคผนวก ข

ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

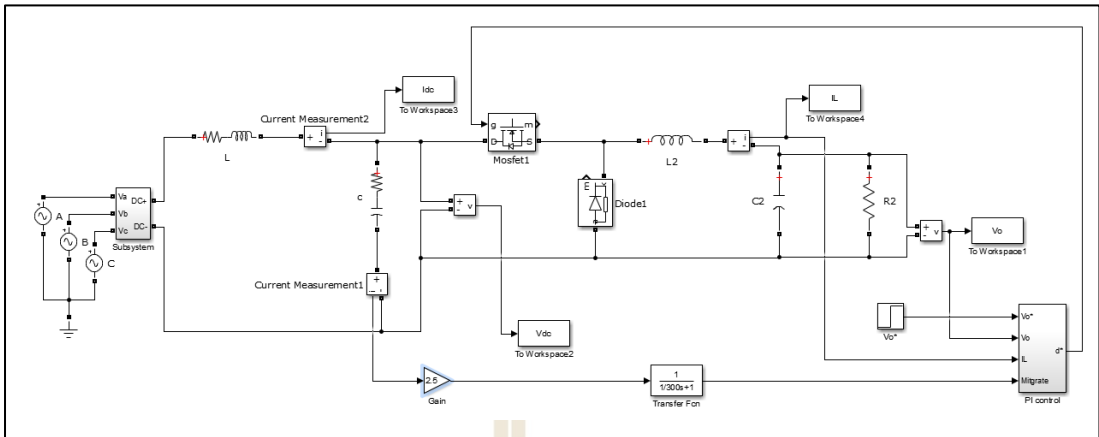




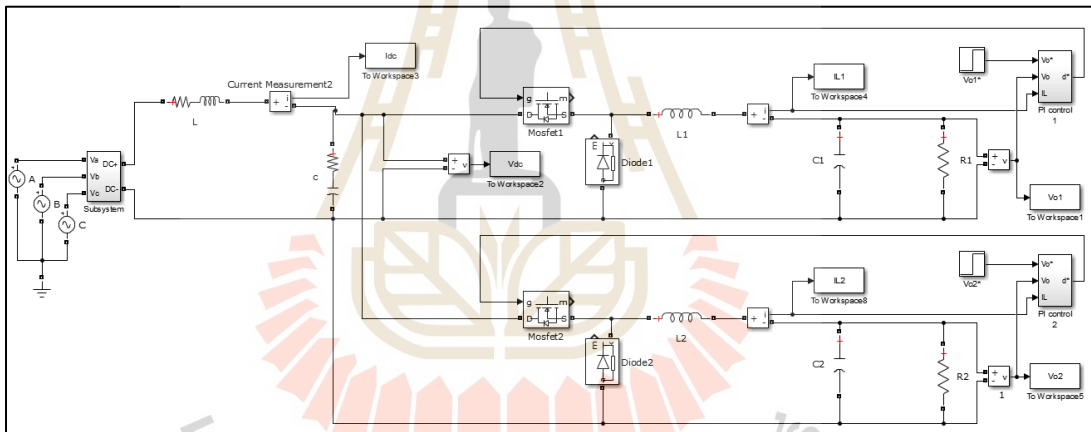
รูปที่ ข.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่ไม่มีการควบคุม



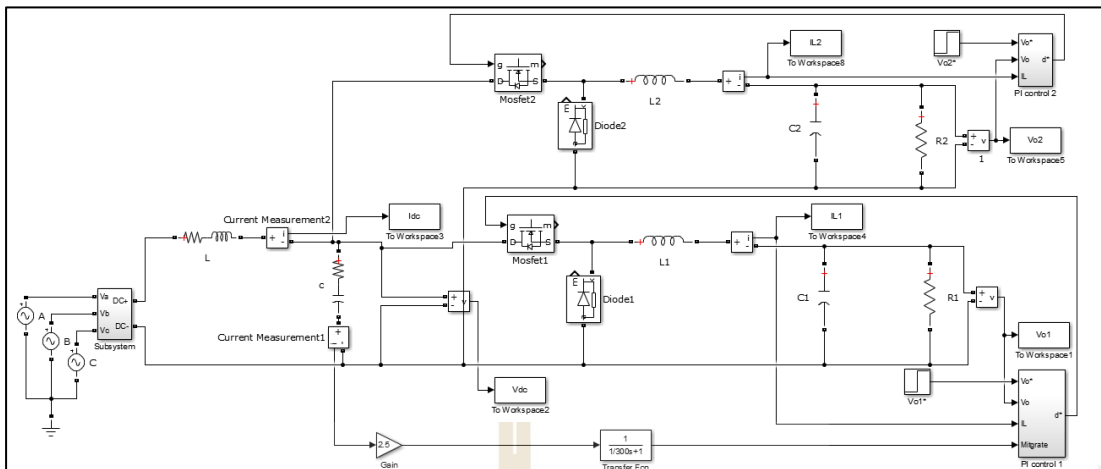
รูปที่ ข.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีการควบคุม



รูปที่ ข.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ที่มีการควบคุมและมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี



รูปที่ ข.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักค์ที่มีการควบคุม 2 ชุดขนานกัน



รูปที่ ข.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบักก์ที่มีการควบคุม 2 ชุดขนานกันและมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี



ภาคผนวก ค

โปรแกรมสำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

```

*****
ภาคผนวก ค.1 โปรแกรมการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino AT
mega 2560 สำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่ไม่มีที่การควบคุม
*****

#include<avr/io.h>
int EN = 11;
int duty_cycle = 0;
int d = 0;
int sensorValue;
void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(EN,OUTPUT);
  TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A1);
  TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B1);
  TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
  TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);
  TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
  ICR1 = 800;
  OCR1A = 0;
  OCR1B = 0;
  TCNT0 = 0; }
void loop(){
  //sensorValue = analogRead(A0);
  //d = map(sensorValue,0,1023,0,100);
  duty_cycle = 1;
  OCR1A = duty_cycle*8; }

```

```

*****
ภาคผนวก ค.2 โปรแกรมตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino AT
mega 2560 ในวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่มีการควบคุม แบบพีไอ
*****

#include <Keypad.h>
#include<avr/io.h>
#include<avr/interrupt.h>

const byte ROWS = 4; //four rows
const byte COLS = 4; //three columns
char keys[ROWS][COLS] = {
  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'}
};

byte rowPins[ROWS] = {31, 33, 35, 37}; //connect to the row pinouts of the keypad
byte colPins[COLS] = {39, 41, 43, 45}; //connect to the column pinouts of the keypad
Keypad keypad = Keypad( makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS );

//----->Variable
int num[5],count_num,num1,i;
float
V_o_buck=0,I_L_buck=0,V_o_act,V_o,I_L_act,I_L,V_o_buck_keep,I_L_buck_keep,V_o_
buck_keep_old=0,co_LPF=0.68,I_L_buck_keep_old=0;
int port_PWM = 11;
int duty_cycle;
float d;
float kpv=0.07, kiv=4.44,kpi=1.535,kii=7211;//ATS Ts_old=0.0058,kpv=0.08,kiv=2.5
float Ts_v=0.001,Ts_i=0.0003;////#2

```

```
//float Ts_v=0.002,Ts_i=0.0004;//#1
float err_v,Upv,Uiv,Uiv_1=0,Upi_v;

float err_i,Upi,Uii,Uii_1=0,Upi_i,V=0,V_o1=0,I_L1=0;

//loopspeedchecker
int ledpin = 9;

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  //----->LCD
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(1,0);
  lcd.print("Please press Vo");
  lcd.setCursor(1,1);
  lcd.print("Vo=");
  //----->keypad
  keypad.addEventListener(keypadEvent);
  count_num=0;
  i=1;
  num[5]=0;
  while(i!=0){ number(); }
  V=num1;
  lcd.clear();
```



```

/////-----> TIMER1_PWM <-----//////////
pinMode(port_PWM, OUTPUT);
TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A1);
TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B1);
TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);
TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
ICR1 = 800; OCR1A = 0; OCR1B = 0; TCNT1=0;

//loopspeedchecker (use ossilloscope to chek waveform)
pinMode(ledpin,OUTPUT);
}

void number(){
  keypad.getKey();
}

void keypadEvent(KeypadEvent eKey){
  switch (keypad.getState()){
    case PRESSED:
      lcd.setCursor(5+count_num,1);
      if(eKey!='A'){lcd.print(eKey);};
      switch (eKey){
        case '1':num[count_num]=1;count_num=count_num+1;break;
        case '2':num[count_num]=2;count_num=count_num+1;break;
        case '3':num[count_num]=3;count_num=count_num+1;break;
        case '4':num[count_num]=4;count_num=count_num+1;break;
        case '5':num[count_num]=5;count_num=count_num+1;break;
        case '6':num[count_num]=6;count_num=count_num+1;break;
        case '7':num[count_num]=7;count_num=count_num+1;break;
        case '8':num[count_num]=8;count_num=count_num+1;break;
        case '9':num[count_num]=9;count_num=count_num+1;break;
        case '0':num[count_num]=0;count_num=count_num+1;break;
        case 'A':check_num();return;
      }
    }
  }
}
}

```

```

void keypadEvent_stop(KeypadEvent eKey){
  switch (keypad.getState()){
    case PRESSED:
      //Serial.println(count_num);
      Serial.print(eKey);
      switch (eKey){
        case 'D':check_num();setup();
      }
    }
}

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

void loop()
{
  test1();
}

void test1()
{
  while(1)
  {
    digitalWrite(ledpin, LOW);
    //V = 15;
    ////-----> Get the Voltage <-----////////////////////
    V_o_buck=analogRead(A0);
    V_o_buck_keep_old=V_o_buck;
    V_o_buck_keep = V_o_buck;
    V_o_act=V_o_buck_keep*5/1023;
    //V_o=V_o_act*100+0.5; //1
  }
}

```

```

//V_o=V_o_act*100+2.3; // #2
V_o=V_o_act*100+3.3; // #2adj

/////-----> Get the Current <-----//////////
I_L_buck=analogRead(A1);
I_L_buck_keep_old=I_L_buck;
I_L_buck_keep=I_L_buck;
I_L_act=I_L_buck_keep*5/1023;
I_L=I_L_act*1.3-0.0028;

// ----- > PI controller
// voltage loop
err_v=V-V_o;
Upv=kpv*err_v;
Uiv=(kiv*Ts_v*err_v)+Uiv_1;
Upi_v=Upv+Uiv;
if (Upi_v >= 799)
  {Upi_v=799;}
else if (Upi_v <=-799)
  {Upi_v=-799;}
// Serial.print(err_v);

// current loop
err_i=Upi_v-I_L;
Upi=kpi*err_i;
Uii=(kii*Ts_i*err_i)+Uii_1;
Upi_i=Upi+Uii;
if (Upi_i >= 700)
  {Upi_i=700;}
else if (Upi_i <=0)
  {Upi_i=0;}

// Serial.print(V_o);
// Serial.print(" ");
// Serial.println(Upi_i);
d=Upi_i;

```

```
OCR1A = d;  
keypad.addEventListener(keypadEvent_stop);  
keypad.getKey();  
Uiv_1=Uiv;  
Uii_1=Uii;  
digitalWrite(ledpin, HIGH);  
}  
}
```



```

*****
ภาคผนวก ค.3 โปรแกรมสร้างเสถียรภาพอาร์วี่ซีสำหรับชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduimo AT
mega 2560 ในวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคค์ที่มีการควบคุม แบบพีไอ
*****

#include <Keypad.h>
#include<avr/io.h>
#include<avr/interrupt.h>

const byte ROWS = 4; //four rows
const byte COLS = 4; //three columns
char keys[ROWS][COLS] = {
  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'}
};

byte rowPins[ROWS] = {31, 33, 35, 37}; //connect to the row pinouts of the keypad
byte colPins[COLS] = {39, 41, 43, 45}; //connect to the column pinouts of the keypad
Keypad keypad = Keypad( makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS );

//----->Variable
int num[5],count_num,num1,i;
float
V_o_buck=0,I_L_buck=0,V_o_act,V_o,I_L_act,I_L,V_o_buck_keep,I_L_buck_keep,V_o_
buck_keep_old=0,co_LPF=0.68,I_L_buck_keep_old=0;

float Rv=2,Vrvc=0,lcdca=0,lcdcf=0,lcdcfrw=0;

int port_PWM = 11;
int duty_cycle;
float d;
float kpv=0.07, kiv=4.44,kpi=1.535,kii=7211;//ATS Ts_old=0.0058,kpv=0.08,kiv=2.5
//float Ts_v=0.0022,Ts_i=0.0006;///#1
float Ts_v=0.0033,Ts_i=0.0009;
float err_v,Upv,Uiv,Uiv_1=0,Upi_v;
float err_i,Upi,Uii,Uii_1=0,Upi_i,V=0,V_o1=0,I_L1=0;

```

```

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  //----->LCD
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(1,0);
  lcd.print("Please press Vo");
  lcd.setCursor(1,1);
  lcd.print("Vo=");
  //----->keypad
  keypad.addEventListener(keypadEvent);
  count_num=0;
  i=1;
  num[5]=0;
  while(i!=0){ number(); }
  V=num1;
  lcd.clear();
  /////-----> TIMER1_PWM <-----////////////////////
  pinMode(port_PWM, OUTPUT);
  TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A1);
  TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B1);
  TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
  TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);
  TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
  ICR1 = 800; OCR1A = 0; OCR1B = 0; TCNT1=0;
}

void number(){
  keypad.getKey();
}

void keypadEvent(KeypadEvent eKey){
  switch (keypad.getState()){

```

```

case PRESSED:
  lcd.setCursor(5+count_num,1);
  if(eKey!='A'){lcd.print(eKey);};
  switch (eKey){
    case '1':num[count_num]=1;count_num=count_num+1;break;
    case '2':num[count_num]=2;count_num=count_num+1;break;
    case '3':num[count_num]=3;count_num=count_num+1;break;
    case '4':num[count_num]=4;count_num=count_num+1;break;
    case '5':num[count_num]=5;count_num=count_num+1;break;
    case '6':num[count_num]=6;count_num=count_num+1;break;
    case '7':num[count_num]=7;count_num=count_num+1;break;
    case '8':num[count_num]=8;count_num=count_num+1;break;
    case '9':num[count_num]=9;count_num=count_num+1;break;
    case '0':num[count_num]=0;count_num=count_num+1;break;
    case 'A':check_num();return;
  }
}
}
}
void keypadEvent_stop(KeypadEvent eKey){
  switch (keypad.getState()){
    case PRESSED:
      //Serial.println(count_num);
      Serial.print(eKey);
      switch (eKey){
        case 'D':check_num();setup();
      }
    }
}
}
void check_num(){
  if(count_num==0){Serial.println("Invalid Number");delay(2000);setup();}
  if(count_num==1){num1=num[0];i=0; return;}
  if(count_num==2){num1=num[0]*10+num[1];i=0; return;}
  if(count_num==3){num1=num[0]*100+num[1]*10+num[2];i=0; return;}
  if(count_num==4){num1=num[0]*1000+num[1]*100+num[2]*10+num[3];i=0; return;}
  if(count_num>4){Serial.println("Invalid Number");delay(2000);setup();}
}
}

```



```

void loop()
{
  test1();
}
void test1()
{
  while(1)
  {
    // V = 40;
    ////-----> Get the Voltage <-----////////////////////
    V_o_buck=analogRead(A0);
    V_o_buck_keep_old=V_o_buck;
    V_o_buck_keep = V_o_buck;
    V_o_act=V_o_buck_keep*5/1023;
    //V_o=V_o_act*100+0.5; //#1
    V_o=V_o_act*100+2.8; //#2

    ////-----> Get the Current <-----////////////////////
    I_L_buck=analogRead(A1);
    I_L_buck_keep_old=I_L_buck;
    I_L_buck_keep=I_L_buck;
    I_L_act=I_L_buck_keep*5/1023;
    I_L=I_L_act*1.3-0.0028;

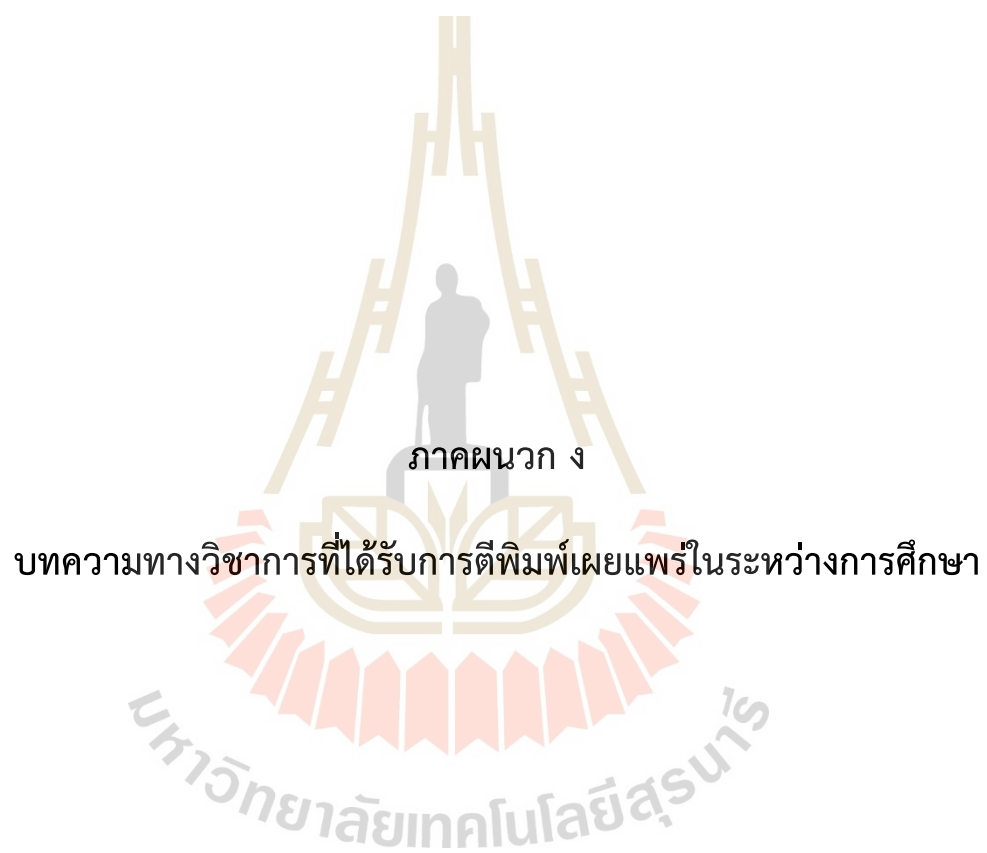
    // ----- > PI controller
    // voltage loop
    err_v=V-V_o;
    Upv=kpv*err_v;
    Uiv=(kiv*Ts_v*err_v)+Uiv_1;
    Upi_v=Upv+Uiv;
    if (Upi_v >= 799)
      {Upi_v=799;}
    else if (Upi_v <=-799)
      {Upi_v=-799;}
    // Serial.print(err_v);
  }
}

```

```
// current loop
err_i=Upi_v-l_L;
Upi=kpi*err_i;
Uii=(kii*Ts_i*err_i)+Uii_1;
Upi_i=Upi+Uii;
if (Upi_i >= 799)
    {Upi_i=799;}
else if (Upi_i <=0)
    {Upi_i=0;}
    lcdcfraw=analogRead(A2);
//lcdcfraw=0;
lcdca = 2.5*lcdcfraw*5/1023;
lcdf = lcdca-(3.3*2.5);
Vrvc=lcdf*Rv*400/5;
d=Upi_i+Vrvc;
OCR1A = d;
keypad.addEventListener(keypadEvent_stop);
keypad.getKey();
Uiv_1=Uiv;
Uii_1=Uii;
}
}
```



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

กษมา รุ่งรัตน์ธวัชชัย, เทพพนม โสภภาพิม และกองพัน อารีรักษ์. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่เชื่อมต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี. การประชุมวิชาการ งานวิจัย และ พัฒนาเชิงประยุกต์ครั้งที่ 11, อุบลราชธานี, 4-7 มิถุนายน 2562, Vol. 1, หน้า 111-114.

กษมา รุ่งรัตน์ธวัชชัย, เทพพนม โสภภาพิม และกองพัน อารีรักษ์. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่เชื่อมต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42, นครราชสีมา, 30 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน 2562, Vol. 1, หน้า 141-144.

กษมา รุ่งรัตน์ธวัชชัย, เทพพนม โสภภาพิม และกองพัน อารีรักษ์. การสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลัง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน - ธันวาคม พ.ศ.2562. หน้า 73-83.



## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 11

11<sup>th</sup> ECTI-CARD 2019, Ubon Ratchathani Thailand

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่เชื่อมต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว  
ที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

**Mathematical Model of AC-DC Power System feeding Constant Power Loads with Instability Mitigation  
using Reference-Voltage-Based Active Compensator Method.**

กนกมา รุ่งรัตน์วิจัย<sup>1</sup> เทพพนม โสภณเพิ่ม<sup>2</sup> กองพัน อารีรักษ์<sup>3</sup>

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี E-mail kongpan@sut.ac.th<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

## บทคัดย่อ

บทความนี้มาเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบัค ที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี (Reference-Voltage-Based Active Compensator : RVC) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา เนื่องจากการสวิตซ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในระบบ ซึ่งสามารถพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีดีคิว(DQ) และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป (generalized state space averaging : GSSA) เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไป การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำได้โดยทำการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink พบว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันทั้งในสภาวะชั่วคราว และในสภาวะอยู่ตัว

คำสำคัญ: การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ, โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว, วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม.

## Abstract

This paper proposes the mathematical model of 3 phase AC-DC converter feeding controlled buck converter with instability mitigation using Reference-Voltage-Based active compensator method. Normally, the model of power converter is time-varying because the switching behavior of power electronic devices. Time-invariant mathematical model can be derived by using DQ and generalized state

space method which can use for stability analysis later. The model is validated by simulation of exact topological model in MATLAB/Simulink. The result shows the responses of exact topological model agree with the mathematical model for both transient response and steady-state response.

Keywords: Mitigation, Instability, Constant power loads (CPL), Controlled converters.

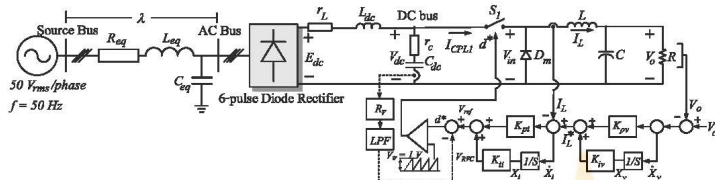
## 1. บทนำ

ปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้านิยมใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant power loads : CPLs) โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเหล่านี้จะไปลดทอนเสถียรภาพของระบบส่งจ่าย ซึ่งการขาดเสถียรภาพจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำงานของระบบควบคุม [1-2] ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ซึ่งในบทความนี้ใช้วิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแบบแอคทีฟด้วยวิธีอาร์วีซี [3] การวิเคราะห์เสถียรภาพและการออกแบบตัวบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่เหมาะสมจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งแบบจำลองของระบบไฟฟ้าในบทความนี้เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจากผลของการสวิตซ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งจะทำให้มีความยุ่งยากสำหรับการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งมีหลากหลายวิธี สำหรับวิธีการพิสูจน์ที่เหมาะสมกับระบบนี้คือวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป (generalized state space averaging : GSSA) [4] และ วิธีดีคิว (DQ) [5]

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 11

11<sup>th</sup> ECTI-CARD 2019, Ubon Raichathani Thailand



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการบรรเทาเสถียรภาพด้วยวิธีอวีวีซี

**2. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการพิจารณา**

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น วงจรกรองที่มีตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบักที่มีการควบคุมแบบฟีดแบ็คแบบปิดแบบที่ 1 โดยวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่โอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบักสามารถพบได้ในบทความที่ [7] และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอวีวีซี ทำได้โดยใช้เช่นเซอร์วิคกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่วงจรกรอง ( $I_c$ ) เพื่อมาค้ำคังกล่าวไปลงกับชุดควบคุมฟีดแบ็คซึ่งจะทำให้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น [3] การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาเฉพาะโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่พิจารณาส่วนอื่นที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 3 จะใช้วิธีค้ำคังเพื่อแปลงแหล่งจ่ายสามเฟสสมดุลที่เชื่อมต่อกับสายส่งเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสให้อยู่บนแกนค้ำคังเพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ฟิงแหล่งจ่ายและใช้วิธีค้ำคังเพื่อปรับสถานะทั่วไปมาพิจารณาทางฝั่งโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบักที่มีการควบคุมพร้อมทั้งพิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ทางฝั่งโหลด โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการใช้สองวิธีร่วมกันจะเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบตัวบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่เหมาะสมต่อไป

**3. การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

ในบทความนี้จะเริ่มทำการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการค้ำคังเป็นอันดับแรกเพื่อขจัดฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสให้อยู่บนแกนค้ำคัง เมื่อพิจารณาว่าวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ใช้ไดโอดพบว่าผลกระทบที่เกิดจาก  $E_{dc}$  ในรูปที่ 1 ส่งผลทำให้เกิดมุมเหลือและทำให้เกิดแรงดันตกทางฝั่งแรงดันเอาต์พุทของวงจรเรียงกระแส ซึ่งแรงดันตกดังกล่าวถูกแทนด้วย  $r_o$  [6] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$r_o = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \tag{1}$$

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสสามเฟสโดยใช้วิธีค้ำคังสามารถเปลี่ยนสมการฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอดให้เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กัเวลาค้ำคังได้ดังสมการที่ (2)

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi - \phi) \\ \sin(\phi - \phi) \end{bmatrix} \tag{2}$$

โดยที่  $\phi$  คือ มุมเฟสของแกนหมุนค้ำคัง  $\phi$  คือ มุมเฟสของบัสแรงค้ำคัง

แหล่งจ่ายแรงค้ำคังไฟฟ้ากระแสสามเฟสที่ต่อผ่านสายส่งเข้าวงจรเรียงกระแสสามเฟสสามารถแปลงให้อยู่บนแกนค้ำคังและนำไปเขียนเป็นวงจรมุมบนแกนค้ำคังสำหรับการแปลงค้ำคังทางด้านแหล่งจ่ายได้ดังรูปที่ 2 โดยกำหนดมุมของแกนหมุนค้ำคังให้มีค่าเท่ากับมุมเฟสของแรงค้ำคังบัสเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง [5]

จากนั้นใช้วิธีค้ำคังเพื่อปรับสถานะทั่วไปทางฝั่งโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบักที่มีการควบคุมและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ทางฝั่งโหลด โดยแสดงฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักในสมการที่ (3)

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT \\ 0, & dT < t < T \end{cases} \tag{3}$$

โดย  $T$  และ  $d$  คือ คาบการสวิตช์และค่าวัฏจักรหน้าที่ยังวงจรแปลงผันแบบบัก ตามลำดับ

พิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ด้วยวิธีค้ำคังปรับสถานะทั่วไป โดยพิจารณาเฉพาะความถี่มูลฐานและโหมดกระแสต่อเนื่อง [4] ได้ดังสมการที่ (4)

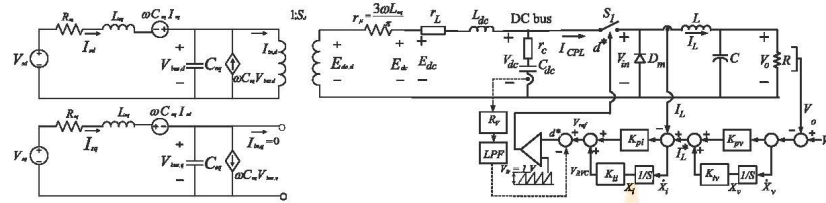
$$\langle u(t) \rangle_0 = d \tag{4}$$



บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 11

11<sup>th</sup> ECTI-CARD 2019, Ubon Raichathani Thailand



รูปที่ 2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแบบแกนตีคว

$$d^* = V_{ref} - V_{RVC} \tag{5}$$

โดยที่  $V_{ref}$  คือสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมที่โอซึ่งมี

ขั้นตอนการออกแบบดังบทความที่ [7] และ  $V_{RVC}$  คือสัญญาณชดเชยการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณต่ำค่า [8] สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$V_{ref} = K_{pi} K_{pv} V_o^* - K_{pi} K_{pv} V_o + K_{pi} K_{iv} X_v - K_{pi} I_{L,b} + X_i K_{ii} \tag{7}$$

$$V_{RVC} = -C_{dc} R_a a V_{dc,filter} + C_{dc} R_a a V_{dc} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{d1} &= -\frac{R_{eq} I_{d1}}{L_{eq}} + \omega I_{q1} + \left( \frac{1}{L_{eq}} \right) \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right) V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{q1} &= -\frac{R_{eq} I_{q1}}{L_{eq}} - \omega I_{d1} + \left( \frac{1}{L_{eq}} \right) \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right) V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} &= \frac{I_{d1}}{C_{eq}} + \omega V_{bus,q} - \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left( \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) \left( \frac{I_{dc}}{C_{eq}} \right) \\ \dot{V}_{bus,q} &= \frac{I_{q1}}{C_{eq}} - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} &= \left( \frac{1}{L_{dc}} \right) \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left( \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) V_{bus,d} - \frac{I_{dc} (r_s + r_r + r_e)}{L_{dc}} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}} - \frac{K_{pr} I_{L,b}^2}{L_{dc}} \\ &\quad - \frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,b} V_o^* + K_{iv} K_{pi} I_{L,b} X_v + K_{ii} I_{L,b} X_i}{L_{dc}} \\ &\quad + \frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,b} V_o^* + R_a a V_{dc,filter} r_{L,b} C_{dc} - R_a a V_{dc} r_{L,b} C_{dc}}{L_{dc}} \\ \dot{V}_{dc} &= \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pr} I_{L,b}^2}{C_{dc}} + \frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,b} V_o^* - K_{iv} K_{pi} I_{L,b} X_v}{C_{dc}} \\ &\quad - \frac{K_{ii} I_{L,b} X_i - K_{pv} K_{pi} I_{L,b} V_o^* - R_a a V_{dc,filter} r_{L,b} + R_a a V_{dc} r_{L,b}}{C_{dc}} \\ I_{L,b} &= -\frac{K_{pv} V_{dc} I_{L,b}}{L_b} + \frac{K_{pv} K_{pi} V_o^*}{L_b} + \frac{K_{iv} K_{pi} V_o X_v}{L_b} + \frac{K_{ii} V_o X_i}{L_b} \\ &\quad + \frac{K_{pv} K_{pi} V_o V_o^*}{L_b} - \frac{V_o}{L_b} + \frac{R_a a V_{dc,filter} r_{L,b} C_{dc} - R_a a V_{dc} r_{L,b} C_{dc}}{L_b} \\ \dot{V}_o &= \frac{I_{L,b}}{C_b} - \frac{V_o}{RC_b} \\ \dot{X}_v &= V_o^* - V_o \\ \dot{X}_i &= -I_{L,b} - K_{pv} V_o + K_{iv} X_v + K_{ii} V_o^* \\ \dot{V}_{dc,filter} &= -a V_{dc,filter} + a V_{dc} \end{aligned} \tag{6}$$

4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากสมการที่ (5) เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยใช้ทฤษฎีลอรังจ์อันดับหนึ่ง จะได้สมการที่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ (9) โดยค่าต่างๆในเมทริกซ์ A B C และ D ขึ้นอยู่กับจุดการทำงานจากระบบ โดยเรียกสมการนี้ว่า แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ด้วยทฤษฎีค่าเฉพาะจะแสดง [5]

$$\begin{cases} \delta \dot{x} = A(x_0, u_0) \delta x + B(x_0, u_0) \delta u \\ \delta \dot{y} = C(x_0, u_0) \delta x + D(x_0, u_0) \delta u \end{cases} \tag{9}$$

การตรวจสอบความถูกต้องของระบบจะพิจารณาในรูปแบบสัญญาณขนาดเล็กซึ่งจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า และออกแบบตัวบรรเทาเสถียรภาพต่อไป โดยการตรวจสอบความถูกต้องกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณาที่มีค่าดังนี้

การวิเคราะห์ห้วงจรโดยที่ไม่พิจารณาตัวควบคุมที่โอหรือระบบแบบวงเปิด จะกำหนดให้ค่า  $d$  เป็นตัวแปรหนึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อพิจารณาตัวควบคุมแบบที่โอที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจากรูปที่ 2 จะได้สมการวิจัยกรหน้าสำหรับระบบแบบวงรอบปิดคือค่า  $d^*$  ดังสมการที่ (5) โดยนำค่าดังกล่าวไปแทนค่าในตัวแปร  $d$  จะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังสมการที่ (6)

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 11

11<sup>th</sup> ECTI-CARD 2019, Ubon Raichathani Thailand

$$V_s = 50 \text{ V}_{\text{rms}}/\text{phase}, \omega = 2\pi \times 50 \text{ rad/sec}, R_{eq} = 0.1 \Omega,$$

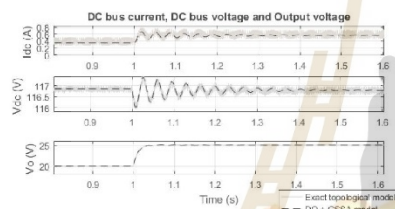
$$L_{eq} = 0.24 \text{ mH}, C_{eq} = 2 \text{ nF}, r_L = 0.1 \Omega, r_c = 0.1 \Omega,$$

$$L_{dc} = 30 \text{ mH}, C_{dc} = 1000 \mu\text{F}, L = 15 \text{ mH}, C = 1000 \mu\text{F},$$

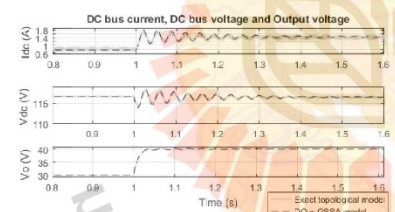
$$R = 10 \Omega, R_v = 2.5, a = 300, K_{pv} = 0.01, K_{iv} = 10,$$

$$K_{pi} = 0.7210, K_{ii} = 2060.1$$

เงื่อนไขการตรวจสอบการถูกต้องของแบบจำลองจะดำเนินการโดยเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ( $V_o^*$ ) แบบขั้นบันได จาก 20 V เป็น 25 V ที่วินาทีที่ 1 และเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิง ( $V_o^*$ ) จาก 30 V เป็น 40 V ที่วินาทีที่ 1 โดยหามิตอร์อื่น ๆ กำหนดให้มีค่าคงที่ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 การจำลองสถานการณ์โดยเปลี่ยน  $V_o^*$  จาก 20 V เป็น 25 V



รูปที่ 4 การจำลองสถานการณ์โดยเปลี่ยน  $V_o^*$  จาก 30 V เป็น 40 V

จากผลการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 3 และ รูปที่ 4 พบว่า ผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ที่สูงสุดในบทความนี้ สอดคล้องกับผลตอบสนองของชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB/Simulink ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัวแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ได้นั้นมีความถูกต้อง



## 5. สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์โดยวิธีคิดวิเคราะห์ร่วมกับค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไปสามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากบทความนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ และการออกแบบตัวบรรเทาการขาดเสถียรภาพและตัวควบคุมที่เหมาะสมต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Rivetta, G.A. Williamson, and A. Emadi, "Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Sea and Undersea Vehicles: Statement of the Problem and Comprehensive Large-Signal Solution," Proc. IEEE Electric Ship Tech Symposium., July 2005, pp. 313-320.
- [2] A.M. Rahimi and A. Emadi, "Active Damping in dc/dc power electronic converters: a novel method to overcome the problems of constant power loads," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 5, pp. 1428-1439, Feb. 2009.
- [3] Y. R. Mohamed, A. A. Radwan, and T. Lee, "Decoupled reference-voltage-based active dc-link stabilization for PMSM drives with tight-speed regulation," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 12, pp. 4523-4536, Dec. 2012.
- [4] 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.
- [5] 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, pp. 19-24, June/Jul. 2008.
- [6] N. Mohan, "Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2002
- [7] Tsang K.M., and Chan W.L., "Cascade controller for DC/DC buck converter," IEE Electric Power Application, vol. 152, no. 4, 2005, pp. 827-831.
- [8] A. M. Rahimi, G. A. Williamson, and A. Emadi, "Loop-cancellation technique: A novel nonlinear feedback to overcome the destabilizing effect of constant-power loads," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 59, no. 2, pp. 650-661, Feb. 2010.



แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีซีที่เชื่อมต่อกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกัน  
ที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

**Mathematical Model of AC-DC Power System feeding Paralleled Constant Power Loads with  
Stabilization using Reference-Voltage-Based Active Compensator Method**

กนกมา รุ่งรัตน์ชัยชัย เทพพนม โสภณพินธุ์ และกองพัน อวีร์รักษ์<sup>1</sup>

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี \*E-mail kongpan@sut.ac.th

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

**บทคัดย่อ**

โดยทั่วไปแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา เนื่องจากการผลของการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาที่พิสูจน์ด้วยวิธีดีคิว (DQ) ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป (generalized state space averaging : GSSA) สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบรีดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังแบบบิลค์ขนานกันที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี (Reference-Voltage-Based Active Compensator : RVC) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำได้โดยทำการเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK พบว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันทั้งในสภาวะชั่วคราว และในสภาวะอยู่ตัว

**คำสำคัญ:** การสร้างเสถียรภาพ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม

**Abstract**

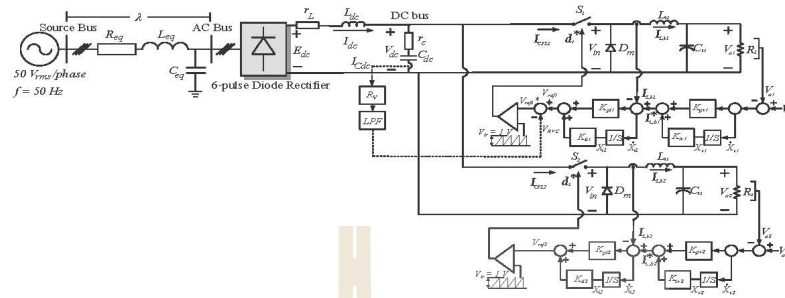
Normally, the model of power converter is time-varying due to the switching behavior of power electronic devices Therefore, this paper presents the time invariant mathematical model which derived by using DQ and generalized state space method for three phase AC-DC converter feeding paralleled controlled buck converter with stabilization using reference-voltage-based active compensator method. The proposed model is suitable for stability analysis. The model validation has been done by simulation of exact topological model in MATLAB/SIMULINK. The result shows that the good agreement between the proposed model and the exact topological model can be achieved for both transient and steady-state responses.

**Keywords:** Stabilization, Instability, Constant power loads (CPL), Controlled converters.

**1. บทนำ**

ระบบไฟฟ้าที่มีการควบคุมเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายทั้งในงานอุตสาหกรรม หรือระบบไฟฟ้าในยานพาหนะชนิดต่างๆซึ่งระบบดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant power loads : CPLs) โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเหล่านี้ส่งผลต่อเสถียรภาพต่อระบบไฟฟ้ากำลังและอาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้และการขาดเสถียรภาพดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าที่มีการควบคุม [1] ซึ่งการทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้จะอาศัยวิธีการสร้างเสถียรภาพแบบอาร์วีซีซึ่งเป็นวิธีการสร้างเสถียรภาพทางด้านโหลดเนื่องจากแหล่งจ่ายของระบบในบทความนี้ไม่สามารถควบคุมได้ซึ่งจะส่งผลให้สมรรถนะในการควบคุมของโหลดถูกลดทอนลง [2] และเป็นวิธีการสร้างเสถียรภาพแบบแอคทีฟ [3] ในขั้นตอนการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับตัวสร้างเสถียรภาพที่เหมาะสมสามารถออกแบบได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นแบบจำลองของระบบไฟฟ้าในบทความนี้เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจากการผลของการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพในระบบดังกล่าวมีความซับซ้อน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งมีหลากหลายวิธี สำหรับวิธีการพิสูจน์ที่เหมาะสมกับระบบนี้คือวิธีดีคิว (DQ) [4] และ ค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป (generalized state space averaging : GSSA) [5]

บทความนี้ประกอบด้วย ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการพิจารณาใน ส่วนที่ 2 สำหรับส่วนที่ 3 เป็นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในส่วนที่ 4 จะนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และส่วนสุดท้ายคือการสรุปผลของบทความ



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีวีซี

2. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการพิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่ใช้พิจารณาในบทความนี้ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น วงจรกรองที่มีตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำอีกทั้งยังนำโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบดักที่มีการควบคุมแบบฟีดแบ็คย้อนกลับ 2 ชุดมาพิจารณาแทน โหลดกำลังไฟฟ้าทั้งชุดควบคุมเกิดขึ้นจากวงจรแปลงผันกำลังแบบบดักที่มีแบบจำลองการสวิตซ์ที่ไม่ซับซ้อนและมีความเป็นเชิงเส้นรวมถึงสามารถนำมาสร้างจริงได้ง่ายกว่าระบบอื่น และมีการสร้างเสถียรภาพในวงจรแปลงผันกำลังแบบบดักชุดที่ 1 แสดงในรูปที่ 1 โดยวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟีดแบ็คสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบดักสามารถพบได้ในบทความที่ [6] และการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีวีซี ที่ได้โดยใช้เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่โหลดผ่านตัวเก็บประจุที่วงจรกรอง ( $I_{cd}$ ) และนำมาถูกปรับคูณด้วยค่าอัตราขยาย จากนั้นค่าที่ได้จะถูกกรองผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter : LPF) และนำค่าดังกล่าวไปลบออกจากสัญญาณควบคุมจากชุดควบคุมซึ่งจะทำให้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น [2] การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาเฉพาะ โหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่พิจารณาโหมดอื่นที่เกิดขึ้นในระบบ

3. การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทความนี้จะเริ่มทำการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการตีความเชิงฟังก์ชันการสวิตซ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสให้ขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดเป็นอันดับแรก เมื่อพิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ใช้ไดโอดพบว่าผลกระทบที่เกิดจาก  $L_{eq}$  ในรูปที่ 1 ส่งผลทำให้เกิดมุมเหลื่อมและทำให้เกิดแรงดันตกทางฝั่งแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส ซึ่งแรงดันตกดังกล่าวถูกแทนด้วย  $r_\mu$  [7] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \tag{1}$$

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการสวิตซ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสโดยใช้วิธีตีความสามารถเปลี่ยนสมการฟังก์ชันการสวิตซ์ของไดโอดให้เป็นฟังก์ชันที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาได้ดังสมการที่ (2)

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi - \theta) \\ \sin(\phi - \theta) \end{bmatrix} \tag{2}$$

โดยที่  $\theta$  คือ มุมเฟสของแกนหมุนดีคิว  
 $\phi$  คือ มุมเฟสของบัสแรงดันดีคิว

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ต่อผ่านสายส่งเข้าวงจรเรียงกระแสสามเฟสสามารถแปลงให้อยู่บนแกนดีคิวและนำไปเขียนเป็นวงจรมูลบนแกนดีคิวสำหรับการแปลงดีคิวฝั่งแหล่งจ่ายได้ดังรูปที่ 2 โดยกำหนดมุมเฟสของแกนหมุนดีคิวให้มีค่าเท่ากับมุมเฟสของแรงดันบัสดีคิวเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง [4]

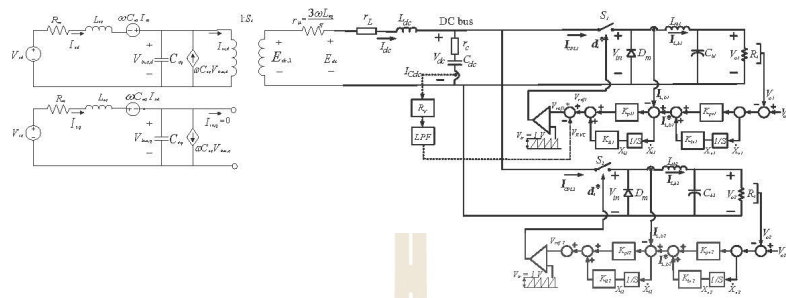
จากนั้นใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปทางฝั่งโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบดักที่มีการควบคุมและการสร้างเสถียรภาพเพื่อจำกัดฟังก์ชันการสวิตซ์ทางฝั่งโหลด โดยแสดงฟังก์ชันการสวิตซ์ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบดักข้างบนในสมการที่ (3)

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT \\ 0, & dT < t < T \end{cases} \tag{3}$$

โดย  $T$  และ  $d$  คือ คาบการสวิตซ์และค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบดัก ตามลำดับ

พิจารณาฟังก์ชันการสวิตซ์ของวงจรแปลงผันกำลังแบบบดักชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยพิจารณาเฉพาะความถี่มูลฐานและโหมดกระแสต่อเนื่อง [5] ได้ดังสมการที่ (4)

$$\begin{aligned} \langle u_1(t) \rangle_0 &= d_1 \\ \langle u_2(t) \rangle_0 &= d_2 \end{aligned} \tag{4}$$



รูปที่ 2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแบบจำลอง

$$\begin{aligned}
 d_1^* &= V_{ref1} - V_{RVC} \\
 d_2^* &= K_{p12}K_{pv1}V_{o1}^* - K_{p12}K_{pv2}V_{o2}^* \\
 &\quad + K_{p12}K_{pv3}X_{v2} - K_{p12}I_{Ld2} + X_{L2}K_{d2}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{sd} &= \frac{R_{sd}I_{sd} + \omega I_{sq} - V_{sd}}{L_{sd}} + \left(\frac{1}{L_{sq}}\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)V_m \cos(\lambda) \\
 \dot{I}_{sq} &= \frac{R_{sq}I_{sq} - \omega I_{sd} - V_{sq}}{L_{sq}} + \left(\frac{1}{L_{sq}}\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)V_m \sin(\lambda) \\
 \dot{V}_{sd} &= \frac{I_{sd}}{C_{sd}} + \omega V_{sq} - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right)\left(\frac{I_{sd}}{C_{sd}}\right) \\
 \dot{V}_{sq} &= \frac{I_{sq}}{C_{sd}} - \omega V_{sd} \\
 \dot{I}_d &= \left(\frac{1}{L_d}\right)\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right)V_{sd} - \frac{I_d(r_m + r_c + r_e)}{L_d} - \frac{K_{p11}I_{Ld1}}{L_d} \\
 &\quad - \frac{K_{p11}K_{pv1}I_{Ld1}V_{o1}^* + K_{p11}K_{pv2}I_{Ld1}X_{v1} + K_{p11}K_{pv3}I_{Ld1}X_{v2} + K_{p11}K_{pv4}I_{Ld1}V_{o2}^*}{L_d} \\
 &\quad - \frac{K_{p11}I_{Ld1}^2}{L_d} - \frac{K_{p11}K_{pv1}I_{Ld1}V_{o1}^* + K_{p11}K_{pv2}I_{Ld1}X_{v1} + K_{p11}K_{pv3}I_{Ld1}X_{v2} + K_{p11}K_{pv4}I_{Ld1}V_{o2}^*}{L_d} \\
 &\quad + \frac{K_{p11}K_{pv1}I_{Ld1}V_{o1}^* + K_{p11}K_{pv2}I_{Ld1}X_{v1} + K_{p11}K_{pv3}I_{Ld1}X_{v2} + K_{p11}K_{pv4}I_{Ld1}V_{o2}^*}{L_d} \\
 \dot{V}_d &= \frac{1}{C_d}I_d + \frac{K_{p11}I_{Ld1} + K_{p11}K_{pv1}V_{o1}^* + K_{p11}K_{pv2}X_{v1} + K_{p11}K_{pv3}X_{v2} + K_{p11}K_{pv4}V_{o2}^*}{C_d} \\
 &\quad - \frac{K_{p11}I_{Ld1}^2}{C_d} - \frac{K_{p11}K_{pv1}I_{Ld1}V_{o1}^* + K_{p11}K_{pv2}I_{Ld1}X_{v1} + K_{p11}K_{pv3}I_{Ld1}X_{v2} + K_{p11}K_{pv4}I_{Ld1}V_{o2}^*}{C_d} \\
 &\quad + \frac{K_{p11}K_{pv1}I_{Ld1}V_{o1}^* + K_{p11}K_{pv2}I_{Ld1}X_{v1} + K_{p11}K_{pv3}I_{Ld1}X_{v2} + K_{p11}K_{pv4}I_{Ld1}V_{o2}^*}{C_d} \\
 \dot{I}_{Ld1} &= \frac{-R_{sd}V_{sd}I_{Ld1} + R_{sd}V_{sq}I_{Ld1}}{L_{d1}} - \frac{K_{p11}V_{sd}I_{Ld1}}{L_{d1}} - \frac{K_{p11}K_{pv1}V_{o1}^* + K_{p11}K_{pv2}X_{v1} + K_{p11}K_{pv3}X_{v2} + K_{p11}K_{pv4}V_{o2}^*}{L_{d1}} \\
 &\quad + \frac{K_{p11}V_{sd}X_{v1} + K_{p11}K_{pv1}V_{o1}^* + K_{p11}K_{pv2}X_{v1} + K_{p11}K_{pv3}X_{v2} + K_{p11}K_{pv4}V_{o2}^*}{L_{d1}} \\
 &\quad - \frac{K_{p11}V_{sd}^2}{L_{d1}} - \frac{K_{p11}K_{pv1}V_{o1}^* + K_{p11}K_{pv2}X_{v1} + K_{p11}K_{pv3}X_{v2} + K_{p11}K_{pv4}V_{o2}^*}{L_{d1}} \\
 \dot{V}_{o1} &= \frac{I_{Ld1}}{C_{d1}} - \frac{V_{o1}}{R_{d1}C_{d1}} \\
 \dot{X}_{v1} &= V_{o1}^* - V_{o1} \\
 \dot{X}_{v1} &= -I_{Ld1} - K_{p11}V_{o1}^* + K_{p11}X_{v1} + K_{p11}V_{o1}^* \\
 \dot{I}_{Ld2} &= \frac{-K_{p11}V_{sd}I_{Ld2} - K_{p11}K_{pv1}V_{o1}^* + K_{p11}K_{pv2}V_{o2}^* + K_{p11}K_{pv3}V_{o2}^*X_{v2}}{L_{d2}} \\
 &\quad + \frac{K_{p11}V_{sd}X_{v2} + K_{p11}K_{pv1}V_{o1}^* + K_{p11}K_{pv2}V_{o2}^* + K_{p11}K_{pv3}V_{o2}^*X_{v2}}{L_{d2}} \\
 &\quad - \frac{K_{p11}V_{sd}^2}{L_{d2}} - \frac{K_{p11}K_{pv1}V_{o1}^* + K_{p11}K_{pv2}V_{o2}^* + K_{p11}K_{pv3}V_{o2}^*X_{v2}}{L_{d2}} \\
 \dot{V}_{o2} &= \frac{I_{Ld2}}{C_{d2}} - \frac{V_{o2}}{R_{d2}C_{d2}} \\
 \dot{X}_{v2} &= V_{o2}^* - V_{o2} \\
 \dot{X}_{v2} &= -I_{Ld2} - K_{p11}V_{o2}^* + K_{p11}X_{v2} + K_{p11}V_{o2}^* \\
 \dot{V}_{d,2\omega} &= -\omega V_{d,2\omega} + \omega V_d
 \end{aligned} \tag{6}$$

การวิเคราะห์วงจรโดยที่ยังไม่พิจารณาตัวควบคุมที่โพรหรือระบบแบบวงเปิด จะกำหนดให้ค่า  $d_1^*$  และ  $d_2^*$  เป็นตัวแปรหนึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อพิจารณาตัวควบคุมแบบที่โพรที่มีสร้างเสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซัคคิตที่ 1 และตัวควบคุมแบบที่โพรของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซัคคิตที่ 2 จากรูปที่ 2 จะได้สมการวัฏจักรหน้าที่สำหรับระบบแบบวงรอบปิดคือ  $d_1^*$  และ  $d_2^*$  ดังสมการที่ (5) โดยนำค่าดังกล่าวไปแทนค่าในตัวแปร  $d_1$  และ  $d_2$  จะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังสมการที่ (6)

โดยที่  $V_{ref}$  คือสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมที่โพรของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักซัคคิตที่ 1 และ  $V_{RVC}$  คือสัญญาณชดเชยการสร้างเสถียรภาพที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณค่าต่ำ [8] สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการ ได้ดังสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$V_{ref1} = K_{p11}K_{pv1}V_{o1}^* - K_{p11}K_{pv1}V_{o1} + K_{p11}K_{pv1}X_{v1} - K_{p11}I_{Ld1} + X_{L1}K_{d1} \tag{7}$$

$$V_{RVC} = -C_{dc}R_{dc}\omega V_{d,2\omega} + C_{dc}R_{dc}\omega V_d \tag{8}$$

จากสมการที่ (5) เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยใช้ขบวนการเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง จะได้สมการที่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ (9) โดยค่าต่างๆในเมทริกซ์ A B C และ D ขึ้นอยู่กับจุดการทำงานจากระบบ โดยเรียกสมการนี้ว่าแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีนิยามใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง คืวาทฤษฎีค่าเฉพาะจะอาจ [4]

$$\begin{cases} \dot{\delta x} = A(x_0, u_0)\delta x + B(x_0, u_0)\delta u \\ \delta y = C(x_0, u_0)\delta x + D(x_0, u_0)\delta u \end{cases} \tag{9}$$

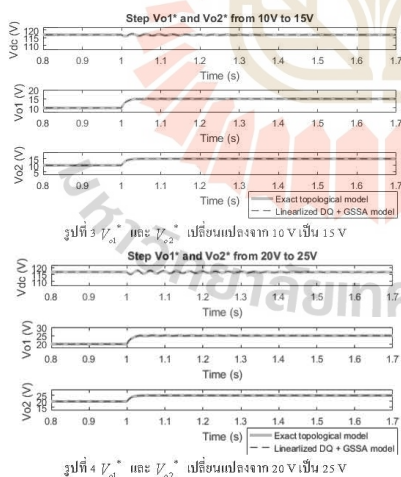
#### 4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทาง

##### คณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 1 จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ได้ โดยการตรวจสอบความถูกต้องกำหนดให้พารามิเตอร์ซึ่งได้จากการสุ่มและออกแบบ [7] สำหรับระบบที่พิจารณามีค่าดังนี้

$$V_s = 50 \text{ V}_{\text{rms}}/\text{phase}, \omega = 2\pi \times 50 \text{ rad/sec}, R_{es} = 0.1 \Omega, L_{es} = 0.24 \text{ mH}, C_{es} = 2 \text{ nF}, r_L = 0.1 \Omega, r_c = 0.1 \Omega, L_{dc} = 30 \text{ mH}, C_{dc} = 1000 \mu\text{F}, L_1 = L_2 = 15 \text{ mH}, C_1 = C_2 = 1000 \mu\text{F}, R_1 = R_2 = 10 \Omega, R_v = 2.5, a = 300, K_{p1} = K_{p2} = 0.01, K_{i1} = K_{i2} = 10, K_{p11} = K_{p12} = 0.7210, K_{i11} = K_{i12} = 2060.1$$

การตรวจสอบการถูกต้องของแบบจำลองจะดำเนินการ โดยทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงกำลังแบบบักกิ้งชุดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ ) จาก 10 V เป็น 15 V และแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงกำลังแบบบักกิ้งชุดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) จาก 10 V เป็น 15 V ที่วินาทีที่ 1 แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 3 และ เปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงกำลังแบบบักกิ้งชุดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ ) จาก 20 V เป็น 25 V และแรงดันเอาต์พุตอ้างอิงของวงจรแปลงกำลังแบบบักกิ้งชุดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) จาก 20 V เป็น 25 V ที่วินาทีที่ 1 แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4 จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าผลทดสอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ในบทความนี้สอดคล้องกับผลทดสอบของชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK



#### 5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงกำลังแบบบักกิ้งขนานกันที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอวกาศวิเศษ ซึ่งจากการตรวจสอบด้วยการจำลองสถานการณ์พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัวและแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ได้ในบทความนี้มีความถูกต้องและสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไป

##### เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Rivetta, G.A. Williamson, and A. Emadi, "Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Sea and Undersea Vehicles: Statement of the Problem and Comprehensive Large-Signal Solution," *Proc. IEEE Electric Ship Tech Symposium*, July 2005, pp. 313-320.
- [2] Y. R. Mohamed, A. A. A. Radwan, and T. Lee, "Decoupled reference-voltage-based active dc-link stabilization for PMSM drives with tight-speed regulation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 12, pp. 4523-4536, Dec. 2012.
- [3] A.M. Rahimi and A. Emadi, "Active Damping in dc/dc power electronic converters: a novel method to overcome the problems of constant power loads," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1428-1439, Feb. 2009.
- [4] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher and D.W.P. Thomas, "Stability analysis and modelling of AC-DC system with mixed load Using DQ-transformation method," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*, Cambridge, UK, pp. 19-24, June/Jul. 2008.
- [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] Tsang K.M., and Chan W.L., "Cascade controller for DC/DC buck converter," *IEE Electric Power Application*, vol. 152, no. 4, 2005, pp. 827-831.
- [7] Mohan, N., Undeland, T. and Robbins, W., "Power electronics." 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1995.
- [8] A. M. Rahimi, G. A. Williamson, and A. Emadi, "Loop-cancellation technique: A novel nonlinear feedback to overcome the destabilizing effect of constant-power loads," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 2, pp. 650-661, Feb. 2010.



การสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซซีที่มีโหลดเป็น  
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

Stabilization using Reference-Voltage-Based Active Compensator Method  
For AC-DC Power System Feeding Power Electronic Load

กษมา รุ่งรัตน์ธวัชชัย<sup>1</sup> เทพพนม โสภานนท์<sup>2</sup> กองพัน อารีรักษ์<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Kasama Rungrattawatchai<sup>1</sup> Theppanom Sopapim<sup>2</sup> Kongpan Areerak<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of electrical engineering, Suranaree university of technology

111 University Avenue Muang, Nakhon Rachasima, Thailand, 30000

<sup>2</sup>Department of electrical power engineering, Mahanakhon university of technology

\*Corresponding author E-mail: kongpan@sut.ac.th

(Received: September 19, 2019; Accepted: December 20, 2019)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอหลักการสร้างเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลง  
ผันกำลังแบบบัคก์ วงจรแปลงผันที่มีการควบคุมดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ  
ของระบบไฟฟ้า การขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าเกิดความเสียหาย และอาจลดสมรรถนะ  
การทำงานของระบบควบคุม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการศึกษาการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี (Reference-  
Voltage-Based Active Compensator : RVC) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการสร้างสัญญาณชดเชยไปยังส่วนการควบคุมของโหลด  
เพื่อทำให้ระบบไฟฟ้ากลับมามีเสถียรภาพ ซึ่งเหมาะสำหรับระบบไฟฟ้าที่ไม่สามารถควบคุมแรงดันบัคส์ได้ จากการศึกษา  
ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี เพื่อนำมาวิเคราะห์  
เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง และยืนยันผลผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม  
MATLAB พบว่าการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีที่ได้นำเสนอในบทความนี้สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพเนื่องจาก  
โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวกลับมามีเสถียรภาพได้ตลอดการทำงาน

คำสำคัญ: การสร้างเสถียรภาพ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม

ABSTRACT

This paper presents the stabilization for 3 phase AC-DC converter feeding controlled buck converter. Power converters with their controllers normally behave as constant power loads that can affect system stability. Therefore, the Reference-Voltage-Based active compensator (RVC) method will be presented to mitigate the instability due to the constant power load. The results will show that the proposed system can become back from unstable to stable operation when the RVC is applied. The

simulation via the exact topological model of MATLAB is used to validate the theoretical results in which the good agreement between the theory and the simulation is achieved.

**Keyword:** Stabilization, Constant power loads (CPL), Controlled converters.

	รายการสัญลักษณ์		
$V_{sd}, V_{sq}$	แรงดันไฟฟ้าบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้าบนแกนดี คิว	$K_{pv}, K_{iv}$	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอลูบ แรงดันไฟฟ้า
$I_{sd}, I_{sq}$	กระแสไฟฟ้าบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้าบนแกนดี คิว	$K_{pl}, K_{il}$	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอลูบ กระแสไฟฟ้า
$V_{busd}, V_{busq}$	แรงดันไฟฟ้าบัสอินพุตไดโอดบนแกนดีคิว	$X_i, X_v$	อัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า
$R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}$	ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า	$d$	ค่าดัชนีการสวิตช์ของวงจรแปรผันกำลัง แบบบับคัก
$r_L, L_{dc}$	ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำของวงจร กรอง	<b>1. บทนำ</b>	
$r_C, C_{dc}$	ค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุของวงจร กรอง		ปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้านิยมใช้อย่าง แพร่หลาย ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมี พฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant power loads : CPLs) [1-2] ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็น ค่าอิมพีแดนซ์ติดลบต่อระบบโดยรวม และโดยทั่วไปโหลดที่ เป็นวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมจะต่อกับระบบไฟฟ้ากำลัง ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ดังนั้นค่า อิมพีแดนซ์ติดลบของโหลดชนิดนี้จะไปลดค่าความต้านทาน ของวงจรกรอง (damping) ซึ่งปกติค่าความต้านทานของ วงจรกรองชนิดนี้จะมีค่าบวก การลดลงของค่าความ ต้านทานของวงจรกรองจะทำให้เกิดการกระเพื่อมของ สัญญาณขึ้นถ้าระบบมีค่าอิมพีแดนซ์ติดลบมากพอ นั่นคือ ปริมาณโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากพอ จะทำให้เกิดการ กระเพื่อมของสัญญาณมีค่าสูงมาก หรือทำให้ระบบไฟฟ้า กำลังโดยรวมขาดเสถียรภาพได้ ซึ่งการขาดเสถียรภาพจะ ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานของระบบควบคุม [3] ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ซึ่งในบทความนี้ใช้วิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแบบ แอคทีฟ [4-5] ด้วยวิธีอาร์วีซี (Reference-Voltage-Based Active Compensator : RVC) ซึ่งมีหลักการโดยอาศัยการ
$V_{dc}, I_{dc}$	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่บัส แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง		
$L_{dc}$	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง		
$C_{dc}$	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง		
$I_{dc}$	กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำวงจร กรอง		
$I_{CPL}, P_{CPL}$	กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของวงจร แปลงผันกำลังแบบบับคัก		
$I_{Lb}, V_O$	กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ของวงจรแปรผันกำลังแบบบับคัก		
$L_b, C_b$	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปรผันแบบบับคัก		
$R$	ความต้านทานของโหลดวงจรแปลงผัน กำลังแบบบับคัก		

อัตราส่วนที่เข้าในระบบควบคุมของวงจรถ่ายแปลงผันกำลังแบบบัสที่ได้อาจมาจากอัตราค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรถ่าย และนำมาถูกปรับคูณด้วยค่าอัตราขยาย ซึ่งผลที่ได้จะเป็นการจำลองแรงดันตกเพิ่มเข้ามาในระบบไฟฟ้ากำลัง จากนั้นแรงดันตกที่ได้จะถูกกรองผ่านวงจรถ่ายความถี่แบบผ่านต่ำ (Low-pass filter : LPF) เพื่อให้ความถี่ที่ผ่านเข้ามาอยู่ในย่านความถี่เรโซแนนซ์เท่านั้น หรืออีกนัยหนึ่งก็คือความถี่ของระบบที่ขาดเสถียรภาพ และเมื่อมีการขาดเสถียรภาพของระบบที่พิจารณา สัญญาณของผลการจำลองแรงดันตกนี้จะไปลบออกจากแรงดันอ้างอิงในระบบควบคุมของวงจรถ่ายแปลงผันกำลังแบบบัสที่มีการควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) เพื่อสร้างสัญญาณไปปรับปรุจวัฏจักรหน้าที่ (Duty cycle : d) เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ดับเบิ้ลเอม (Pulse-width-modulation : PWM) ของวงจรถ่ายแปลงผันกำลังแบบบัสที่ใหม่ (d\*) ซึ่งจะทำการปรับค่ากำลังแบบบัสที่การขาดเสถียรภาพที่เหมาะสมทำได้โดยใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพ [7-9] ของระบบซึ่งแบบจำลองของระบบไฟฟ้าในบทความนี้เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กัเวลลเนื่องจากผลของการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งจะทำให้มีความยุ่งยากสำหรับการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลล ซึ่งมีหลากหลายวิธี สำหรับวิธีการพิสูจน์ที่เหมาะสมกับระบบนี้คือ วิธีตีคว (DQ) [7] และ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไป (generalized state space averaging : GSSA) [10]

บทความนี้ประกอบด้วย ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในส่วนที่ 4 จะนำเสนอการ

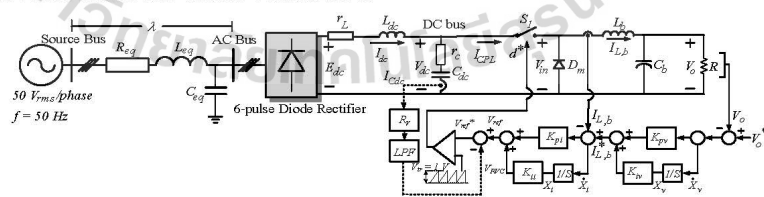
พิจารณาในส่วนที่ 2 สำหรับส่วนที่ 3 เป็นการพิสูจน์หาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่เป็นเชิงเส้น ในส่วนที่ 5 จะนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยชุดบล็อกกำลังไฟฟ้ากำลังด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และส่วนสุดท้ายคือการสรุปผลของบทความ

**2. ระบบไฟฟ้าที่ใช้พิจารณา**

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น วงจรถ่ายที่มีตัวเก็บประจุและขดลวดเหนี่ยวนำและโหลตวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสที่มีการควบคุมแบบพีโอเรียงต่อกัน แสดงในรูปที่ 1 โดยวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีโอสำหรับวงจรถ่ายแปลงผันกำลังแบบบัสสามารถพบได้ในบทความที่ [11] และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี ทำได้โดยใช้เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่วงจรถ่าย ( $I_{Cdc}$ ) เพื่อนำค่าดังกล่าวไปลบกับชุดควบคุมพีโอซึ่งจะทำให้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น [6] การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาเฉพาะโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่พิจารณาอาร์มอนิกที่เกิดในระบบ

**3. การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

ในบทความนี้ทำการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการตีควในการแปลงพหามิเตอร์ในสายส่งให้อยู่บนแกนตีควและทำการกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรถ่ายเรียงกระแสสามเฟสให้อยู่บนแกนตีคว เมื่อพิจารณาวงจรถ่ายเรียงกระแสสามเฟสที่ใช้ไดโอดพบว่าผลกระทบที่เกิดจาก  $L_{eq}$  ในรูปที่ 1 ส่งผลทำให้เกิดมุม



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการบรรเทาเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 เดือน กันยายน – ธันวาคม พ.ศ.2562

76

เหลื่อมและทำให้เกิดแรงดันตกของแรงดันเอาท์พุทของ  
วงจรเรียงกระแส ซึ่งแรงดันตกดังกล่าวถูกแทนด้วย  $r_\mu$  [12]  
ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (1)$$

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแส  
แบบสามเฟสโดยใช้วิธีตีควสามารถเปลี่ยนสมการฟังก์ชัน  
การสวิตช์ของไดโอดให้เป็นฟังก์ชันที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาได้  
ดังสมการที่ (2)

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

โดยที่  $\phi$  คือ มุมเฟสของแกนหมุนตีคว  
 $\phi$  คือ มุมเฟสของบัสแรงดันเอซี  
แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ต่อผ่าน  
สายส่งเข้าวงจรเรียงกระแสสามเฟสสามารถแปลงให้อยู่  
บนแกนตีควและนำไปเขียนเป็นวงจรสมมูลบนแกนตีคว  
สำหรับการแปลงตีควทางด้านแหล่งจ่ายได้ดังรูปที่ 2 โดย  
กำหนดมุมเฟสของแกนหมุนตีควให้มีค่าเท่ากับมุมเฟสของ  
แรงดันบัสเอซี เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง และ  
เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์สายส่ง ( $R_{eq}$ ,  $L_{eq}$ ,  $C_{eq}$ ) จะทำ  
ให้เกิดมุมต่างเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Source  
Bus) กับบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Bus) เท่ากับ ( $\lambda$ )  
ซึ่งสามารถคำนวณได้จากหลักการการไหลของ  
กำลังไฟฟ้า[7]

จากนั้นใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปทางด้าน  
โหนดวงจรแปลงผันกำลังแบบบักที่มี การควบคุมและ  
การสร้างเสถียรภาพ เพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ทางด้าน  
โหนด โดยแสดงฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลัง  
แบบบักในสมการที่ (3)

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT \\ 0, & dT < t < T \end{cases} \quad (3)$$

โดย  $T$  และ  $d$  คือ คาบการสวิตช์และค่าวิญจักร  
หน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัก ตามลำดับ

พิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิ  
สถานะทั่วไป โดยพิจารณาเฉพาะความถี่มูลฐานและโหมด  
กระแสต่อเนื่อง [7] ได้ดังสมการที่ (4)

$$\langle u(t) \rangle_0 = d \quad (4)$$

การวิเคราะห์วงจรโดยที่ยังไม่พิจารณาตัวควบคุมพีโอ  
หรือระบบแบบวงเปิด จะกำหนดให้ค่า  $d$  เป็นตัวแปร  
หนึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อพิจารณาตัว  
ควบคุมแบบพีโอที่มีการสร้างเสถียรภาพจากรูปที่ 2 จะได้  
สมการวิญจักรหน้าที่สำหรับระบบแบบวงรอบปิดที่มีการ  
สร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีแล้วคือค่า  $d^*$  ดังสมการที่  
(5)

$$d^* = V_{ref} - V_{RVC} \quad (5)$$

โดยที่  $V_{ref}$  คือสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมพีโอ  
ซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบดังบทความที่ [11] และ  $V_{RVC}$   
คือสัญญาณชดเชยการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ผ่าน  
วงจรกรองสัญญาณผ่านต่ำ [13] สามารถเขียนให้อยู่ในรูป  
สมการได้ดังสมการที่ (6) และ(7) ตามลำดับ

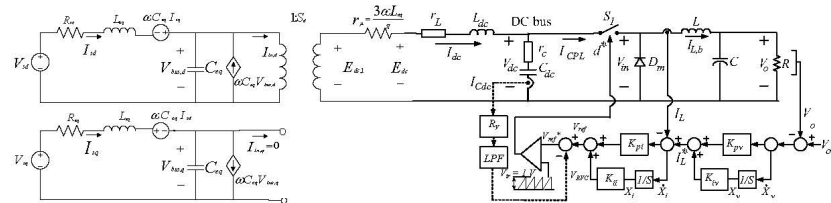
$$V_{ref} = K_{pi}K_{pv}V_o^* - K_{pi}K_{pv}V_o + K_{pi}K_{nv}X_v \quad (6)$$

$$-K_{pi}I_{L,b} + X_iK_{ii} \quad (7)$$

$$V_{RVC} = -C_{dc}R_v aV_{dc,filter} + C_{dc}R_v aV_{dc} \quad (7)$$

เมื่อ  $a = 1/\omega_c$  และ  $\omega_c$  คือความถี่ตัดผ่านของ  
วงจรกรองผ่านต่ำ





รูปที่ 2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามบนแกนดีคิว

เมื่อนำค่า  $d^*$  ไปแทนค่าในตัวแปร  $d$  จะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังสมการที่ (8)

สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้ด้วยเทคนิคอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่ง ดังสมการที่ (9)

$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq} I_{sd}}{L_{eq}} + \omega I_{sq} - \frac{V_{bus,d}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}}\right) \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} = -\frac{R_{eq} I_{sq}}{L_{eq}} - \omega I_{sd} - \frac{V_{bus,q}}{L_{eq}} + \left(\frac{1}{L_{eq}}\right) \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{I_{sd}}{C_{eq}} + \alpha V_{bus,q} - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right) \left(\frac{I_{dc}}{C_{eq}}\right) \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{I_{sq}}{C_{eq}} - \alpha V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} = \left(\frac{1}{L_{dc}}\right) \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right) V_{bus,d} - \frac{I_{dc}(r_a + r_b + r_c)}{L_{dc}} - \frac{V_{dc}}{L_{dc}} \\ - \frac{K_{pi} r_{L1}^2}{L_{dc}} - \frac{K_{pv} K_{pi} r_{L1} V_o^*}{L_{dc}} + \frac{K_{vi} K_{pi} r_{L1} X_1}{L_{dc}} + \frac{K_{di} r_{L1} X_1}{L_{dc}} \\ + \frac{K_{pi} K_{pi} r_{L1} V_o^*}{L_{dc}} + \frac{R_a a V_{dc,filter} I_{Lb}}{L_{dc}} - \frac{R_a a V_{dc}^2 C_{dc}}{L_{dc}} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi} I_{Lb}^2}{C_{dc}} + \frac{K_{pv} K_{pi} I_{Lb} V_o}{C_{dc}} - \frac{K_{vi} K_{pi} I_{Lb} X_v}{C_{dc}} \\ - \frac{K_{di} I_{Lb} X_1}{C_{dc}} - \frac{K_{pv} K_{pi} I_{Lb} V_o^*}{C_{dc}} - \frac{R_a a V_{dc,filter} I_{Lb}}{C_{dc}} + \frac{R_a a V_{dc}^2 C_{dc}}{C_{dc}} \\ \dot{I}_{Lb} = -\frac{K_{pi} V_{dc} I_{Lb}}{L_b} - \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc} V_o}{L_b} + \frac{K_{vi} K_{pi} V_{dc} X_v}{L_b} + \frac{K_{di} V_{dc} X_1}{L_b} \\ + \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc} V_o^*}{L_b} - \frac{V_o}{L_b} + \frac{R_a a V_{dc,filter} V_{dc} C_{dc}}{L_b} - \frac{R_a a V_{dc}^2 C_{dc}}{L_b} \\ \dot{V}_o = \frac{I_{Lb}}{C_b} - \frac{V_o}{RC_b} \\ \dot{X}_v = V_o^* - V_o \\ \dot{X}_1 = -I_{Lb} - K_{pv} V_o + K_{vi} X_v + K_{pi} V_o^* \\ \dot{V}_{dc,filter} = -a V_{dc,filter} + a V_{dc} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \dot{\mathbf{y}} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (9)$$

โดยที่ตัวแปรสถานะ, ตัวแปรอินพุต, ตัวแปรเอาต์พุต และพารามิเตอร์ต่างๆในเมตริกซ์  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$  และ  $\mathbf{D}$  ขึ้นอยู่กับจุดการทำงานจากระบบ โดยเรียกสมการนี้ว่าแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal model) มีรายละเอียดดังสมการที่ (10)

4. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

การวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาและเป็นเชิงเส้นที่ได้ในสมการที่ (9) ด้วยทฤษฎีบทค่าจะจงซึ่งสามารถคำนวณได้จากเมตริกจาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x}$  [7-9] ดังสมการที่ (11)

$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (11)$$

โดยระบบจะมีความเสถียรภาพตั้งเงื่อนไขในสมการที่ (12)

$$real \lambda_i < 0 \quad (12)$$

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

จากสมการที่ (8) เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องมาจากมีตัวแปรที่เป็นตัวแปรสถานะที่คูณกันอยู่

$$\delta x = [\delta I_{z1}, \delta I_{z2}, \delta V_{be,z}, \delta V_{be,q}, \delta I_{z1}, \delta V_{z1}, \delta I_{Lb}, \delta V_{z1}, X_{z1}, Y_{z1}, V_{z1}, \delta \sigma]^\top$$

$$\delta u = [\delta V_{z1}, \delta V_{z1}']^\top$$

$$\delta y = [\delta I_{z1}, \delta V_{z1}, \delta I_{Lb}, \delta V_{z1}']^\top$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{R_{z1}}{I_{z1}} & \omega & \frac{1}{I_{z1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & \frac{R_{z1}}{I_{z1}} & 0 & \frac{1}{I_{z1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{z1}} & 0 & 0 & \omega & \frac{\sqrt{3} \cdot 2\sqrt{3}}{\sqrt{2} \pi C_{z1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{z1}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3} \cdot 2\sqrt{3}}{\sqrt{2} \pi I_{z1}} & 0 & \frac{(r_{\mu} + r_z + r_t)}{I_{z1}} & \frac{1}{I_{z1}} & \frac{R_{z1} \alpha I_{Lb} C_{z1}}{I_{z1}} & \alpha(5,7) & \frac{-r_t K_{z1} K_{z1} I_{Lb}}{I_{z1}} & \frac{r_t K_{z1} K_{z1} I_{Lb}}{I_{z1}} & \frac{r_t K_{z1} I_{Lb}}{I_{z1}} & \frac{R_{z1} \alpha I_{Lb} C_{z1}}{I_{z1}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{z1}} & R_{z1} \alpha I_{Lb} & \alpha(6,7) & \frac{K_{z1} K_{z1} I_{Lb}}{C_{z1}} & \frac{K_{z1} K_{z1} I_{Lb}}{C_{z1}} & \frac{K_{z1} I_{Lb}}{C_{z1}} & -R_{z1} \alpha I_{Lb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha(7,6) & \frac{K_{z1} V_{z1,0}}{I_{z1}} & \frac{K_{z1} K_{z1} V_{z1,0} + 1}{I_{z1}} & \frac{K_{z1} K_{z1} V_{z1,0}}{I_{z1}} & \frac{K_{z1} V_{z1,0}}{I_{z1}} & \frac{R_{z1} \alpha V_{z1,0} C_{z1}}{I_{z1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{z1}} & \frac{1}{RC} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{z1} & K_{z1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\alpha(5,7) = \frac{-2r_t K_{z1} I_{Lb}}{I_{z1}} - \frac{r_t K_{z1} K_{z1} V_{z1,0}}{I_{z1}} + \frac{r_t K_{z1} K_{z1} X_{z1,0}}{I_{z1}} + \frac{r_t K_{z1} X_{z1,0}}{I_{z1}} + \frac{r_t K_{z1} K_{z1} V_{z1,0}'}{I_{z1}}, \alpha(6,7) = \frac{-2K_{z1} I_{Lb}}{C_{z1}} - \frac{K_{z1} K_{z1} V_{z1,0}}{C_{z1}} + \frac{K_{z1} K_{z1} X_{z1,0}}{C_{z1}} + \frac{K_{z1} X_{z1,0}}{C_{z1}} + \frac{K_{z1} K_{z1} V_{z1,0}'}{C_{z1}}$$

$$\alpha(7,6) = \frac{-K_{z1} I_{Lb}}{I_{z1}} - \frac{K_{z1} K_{z1} V_{z1,0}}{I_{z1}} + \frac{K_{z1} K_{z1} X_{z1,0}}{I_{z1}} + \frac{K_{z1} X_{z1,0}}{I_{z1}} + \frac{K_{z1} K_{z1} V_{z1,0}'}{I_{z1}} - \frac{R_{z1} \alpha V_{z1,0} C_{z1}}{I_{z1}}$$

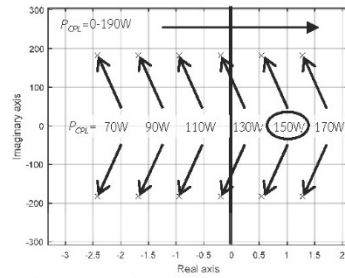
$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{I_{z1}} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(\lambda) & 0 \\ \frac{1}{I_{z1}} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_t K_{z1} K_{z1} I_{Lb}}{I_{z1}} \\ 0 & \frac{K_{z1} K_{z1} I_{Lb}}{C_{z1}} \\ 0 & \frac{K_{z1} K_{z1} V_{z1,0}}{I_{z1}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & K_{z1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

4.1 กรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 จะพิจารณาโดยกำหนดให้ค่าอัตราขยาย  $R_v$  มีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีให้แก่ระบบ ค่าเจาะจงที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ประกอบด้วยโดยค่าเจาะจงสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาเฉพาะโพลเด่นที่มีเส้นทางการเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณที่มีค่าใกล้เคียง 0 เนื่องจากเป็นค่าเฉพาะเจาะจงที่มีผลต่อเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 โดยพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงของโพลค่าลิ่งไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบับคัก  $P_{OCL}$  จาก 0-190W โดยมีค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบในรูปที่ 1

Parameter	Value
$V_s$	50 V <sub>rms/phase</sub>
$\omega$	$2\pi \times 50$ rad/sec.
$R_{eq}$	0.1 $\Omega$
$L_{eq}$	0.24 mH
$C_{eq}$	2 nF
$r_L$	0.1 $\Omega$
$r_c$	0.1 $\Omega$
$L_{dc}$	30 mH
$C_{dc}$	1000 $\mu$ F
$L$	15 mH
$C$	1000 $\mu$ F
$R$	10 $\Omega$
$K_{pv}$	0.01
$K_v$	10
$K_{pi}$	0.7210
$K_{ff}$	2060.1
$a$	300

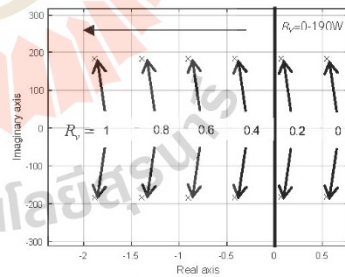


รูปที่ 3 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการพิจารณากการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพ

จากรูปที่ 3 สังเกตได้ว่า เมื่อโพลค่าลิ่งไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบับคักมีค่าเท่ากับ 150 W ซึ่งเป็นค่าลิ่งไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่ทำให้โพลของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งซ้ายของระนาบเอสมายู่ที่ฝั่งขวา ซึ่งหมายความว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้นเนื่องมาจากผลของโพลค่าลิ่งไฟฟ้าคงตัว

4.2 กรณีมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้าที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีดังรูปที่ 1 จะพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงของ  $R_v$  จาก 0 ถึง 1 โดยกำหนดให้โพลค่าลิ่งไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังแบบบับคัก ( $P_{OCL}$ ) ที่ 150W แสดงได้ดังรูปที่ 4

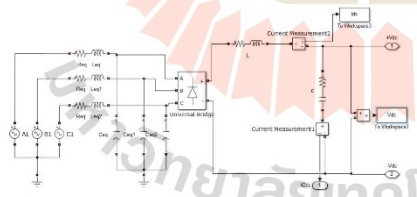


รูปที่ 4 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการพิจารณากการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีมีการสร้างเสถียรภาพ

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า เมื่อโพลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 150W ที่ค่า  $R_L$  มีค่าเท่ากับ 0 (ยังไม่มีภาระสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี) ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ และเมื่อค่า  $R_L$  มีค่าเป็น 0.4 (วงจรสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีเริ่มทำงาน) ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่ทำให้โพลของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมายู่ที่ฝั่งซ้าย ซึ่งหมายถึงระบบที่เกิดการขาดเสถียรสามารถกลับมาเสถียรภาพได้อีกครั้ง

**5. การตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ**

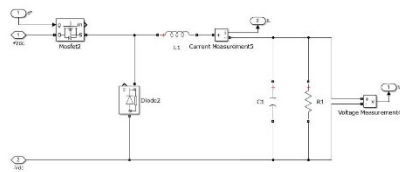
การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกรูปที่ 5 ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ประกอบด้วยส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสสมมูล, พารามิเตอร์สายส่ง, วงจรเรียงกระแสสามเฟส และวงจรกรองแสดงดังรูปที่ 5 โหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์แสดงดังรูปที่ 6 ส่วนของตัวควบคุมพีโอเรียงต่อกันสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์แสดงดังรูปที่ 7 และส่วนของการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีแสดงในรูปที่ 8 โดยจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพและมีการสร้างเสถียรภาพโดยใช้พารามิเตอร์ของระบบดังตารางที่ 1



รูปที่ 5 แหล่งจ่ายสามเฟสสมมูล,สายส่งกำลังไฟฟ้าวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรกรอง

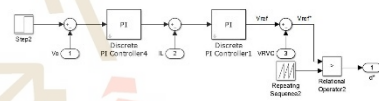
โดยวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ในรูปที่ 6 จะถูกต่อขนานกับวงจรกรอง หรือบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และ

ทำการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ( $I_{Cdc}$ ) แล้วทำการส่งสัญญาณดังกล่าวไปยังชุดสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีในรูปที่ 8



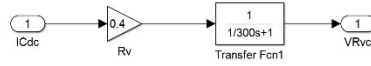
รูปที่ 6 วงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่มีการควบคุม

วงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์ที่ต่อขนานเข้ากับวงจรกรองหรือบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จะได้รับสัญญาณวัฏจักรหน้าที่ได้จากเทคนิคดับเบิ้ลยูเอ็มจากตัวควบคุมพีโอเรียงต่อกันรวมถึงสัญญาณการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี และมีการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $I_L$ ) แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตัวควบคุมพีโอเรียงต่อกันที่มีการสร้างเสถียรภาพสำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์

ตัวควบคุมพีโอเรียงต่อกันประกอบไปด้วยลูควบคุมแรงดันและลูควบคุมกระแส และสัญญาณที่ได้จากลูควบคุมพีโอ ( $V_{ref}$ ) จะถูกส่งออกด้วยสัญญาณชดเชยสำหรับการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี ( $V_{RVC}$ ) และสัญญาณที่ได้จากการลบกันแล้ว จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมตามหลักที่ดับเบิ้ลยูเอ็มทำให้ได้ค่าวัฏจักรหน้าที่สำหรับควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก์

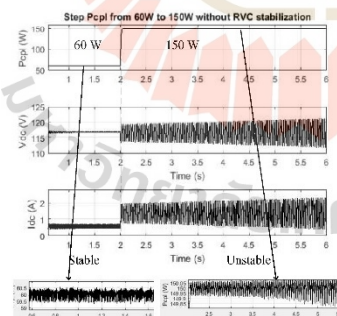


รูปที่ 8 ส่วนการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

ในส่วนของการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซีซึ่งทำการรับค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในวงจรกรอง ( $I_{dc}$ ) และนำมาถูกปรับคูณด้วยค่าอัตราขยาย  $R_v$  ซึ่งผลที่ได้จะเป็นการจำลองแรงดันตกเพิ่มเข้ามาในระบบไฟฟ้ากำลัง จากนั้นแรงดันตกที่ได้จะถูกกรองผ่านวงจรกรองความถี่แบบผ่าน เพื่อทำให้ความถี่ที่ผ่านเข้ามาอยู่ในย่านความถี่เรโซแนนซ์ทำการกรองเฉพาะความถี่และนำสัญญาณชดเชย ( $V_{Rvc}$ ) ไปลบออกจากตัวควบคุมพีไอเพื่อสร้างเสถียรภาพให้กับระบบ

5.1 กรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบที่พิจารณาจากรูปที่ 3 พบว่าระบบที่ไม่มีการสร้างเสถียรภาพเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้นเมื่อโหลดของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสคัทมีค่าเท่ากับ 150W สามารถทำการยืนยันความถูกต้องโดยการปรับเพิ่มโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสคัท จาก 60W (ระบบมีเสถียรภาพ) ไปเป็น 150W ที่เวลา 2 วินาทีซึ่งผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 9

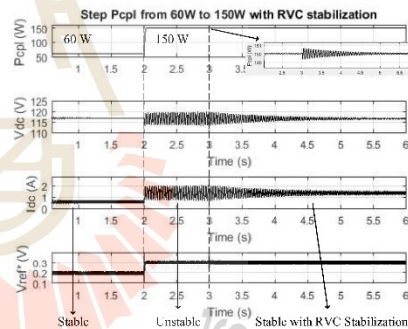


รูปที่ 9 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีไม่มีการสร้างเสถียรภาพ

จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าที่เวลา 2 วินาทีที่แรงดันไฟฟ้าบัสดีซีของระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัสคัทมีขนาด 150W ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 3 ที่โพลของระบบไปอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอสเมื่อโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัสคัทมีขนาด 150W

5.2 กรณีมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีอาร์วีซี

การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 4 พบว่าระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพจะทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้เมื่ออัตราขยาย  $R_v$  มีค่าอย่างน้อย 0.4 สามารถทำการยืนยันความถูกต้องโดยทำการปรับเพิ่มโหลดวงจรแปลงผันกำลังแบบบัสคัท จาก 60W (ระบบยังมีเสถียรภาพ) ไปเป็น 150W ที่เวลา 2 วินาทีซึ่งเกิดการขาดเสถียรภาพและได้กำหนดให้วงจรสร้างเสถียรภาพอาร์วีซีทำงานที่วินาทีที่ 3 โดยกำหนดให้ค่าอัตราขยาย  $R_v$  มีค่าเท่ากับ 0.4 แสดงได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพกรณีมีการสร้างเสถียรภาพ

จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าที่เวลา 2 วินาทีที่แรงดันไฟฟ้าบัสดีซีของระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัสคัทมีขนาด 150W ซึ่งดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัสดีซีที่มีค่าสูงและภายหลังจากที่เวลา 3 วินาทีที่กำหนดให้วงจรสร้าง



เสถียรภาพอาร์วีซีทำงาน ที่  $R_v = 0.4$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบจะกลับมามีเสถียรภาพตลอดการทำงานโดยดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัลด์ซีที่มีค่าลดลง และคงที่ในสภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป

## 6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยวีซีอาร์วีซีสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุม ซึ่งโหลดดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบที่พิจารณาในบทความนี้เกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริมิตสถานะทั่วไปและวิธีตีความในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังและอาศัยทฤษฎีบทค่าเฉพาะเจาะจงมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไป จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์พบว่าระบบส่งจ่ายที่เกิดการขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสามารถกลับมามีเสถียรภาพได้หลังจากที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวีซีที่ได้รับนำเสนอในบทความนี้

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทนายวิจัย ทนุการศึกษากลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานเครื่องจักรกลไฟฟ้าและควบคุม (PEMC) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Grigore, J. Hatonen, J. Kyra, and T. Suntio, "Dynamics of a buck converter with a constant power load," in *Proc. IEEE 29th Power Electron. Spec. Conf.*, Fukuoka, Japan, May 1998, pp. 72–78
- [2] A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta, and G. A. Williamson, "Constant power loads and

negative impedance instability in automotive systems: Definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 4, pp. 1112–1125, Jul. 2006.

- [3] C. Rivetta, G. A. Williamson, and A. Emadi, "Constant power loads and negative impedance instability in sea and undersea vehicles: statement of the problem and comprehensive Large-Signal solution," *Proc. IEEE Electric Ship Tech Symposium.*, July 2005, pp. 313–320.
- [4] A.M. Rahimi and A. Emadi, "Active damping in dc/dc power electronic converters: a novel method to overcome the problems of constant power loads," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1428–1439, Feb. 2009.
- [5] K-N. Areerak, T. Sopapirm, S.V. Bozhko, C. Hill, A. Suyapan and K-L. Areerak, "Adaptive stabilization of uncontrolled rectifier based AC-DC power systems feeding constant power loads" *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 10, pp. 8927–8935, Oct. 2018.
- [6] Y. R. Mohamed, A. A. A. Radwan, and T. Lee, "Decoupled reference-voltage-based active dc-link stabilization for PMSM drives with tight-speed regulation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 12, pp. 4523–4536, Dec. 2012.
- [7] 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, pp. 19-24, June/Jul. 2008.
- [8] K-N. Areerak, T. WU, S.V. Bozhko, G.M. Asher and D. W. P. Thomas, "Aircraft power system stability study including effect of voltage control and actuators dynamic," *IEEE Trans. Aerospace and electronic systems*, vol. 47, no. 7, pp. 2574-2589, Oct. 2011.
- [9] T. Sopapim, K-N. Areerak and K-L. Areerak, "Stability analysis of AC distribution system with six-pulse diode rectifier and multi-converter power electronic loads," *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, vol. 6, no. 7(Part A), pp. 2919-2928, Nov./Dec. 2011.
- [10] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani, " Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach ", *IEEE Trans. on Circuit and Systems*, Vol. 44., pp.767-770, August 1997.
- [11] K. M. Tsang, and W. L. Chan, " cascade controller for DC/DC buck converter," *IEE Electric Power Application*, vol. 152, no. 4, pp. 827-831, July 2005.
- [12] N. Mohan, T. Undeland and W. Robbins, " Line- Frequency diode rectifiers: Line-Frequency uncontrolled ac to dc" in *Power electronics*. 2<sup>nd</sup> Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995, pp.79-117.
- [13] A. M. Rahimi, G. A. Williamson, and A. Emadi, " Loop- cancellation technique: A novel nonlinear feedback to overcome the destabilizing effect of constant- power loads," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 2, pp. 650-661, Feb. 2010.



## ประวัติผู้เขียน

นายเกษมา รุ่งรัตน์รัชชัย เกิดเมื่อวันที่ 15 กันยายน 2538 ที่จังหวัดอุดรธานี เริ่มศึกษาระดับประถมศึกษาที่ 1 ที่โรงเรียนบ้านห้วยแก้งวัฒนเสรีราษฎร์บำรุง ระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 2-6 ที่โรงเรียนเทพปัญญา ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนกุมภวาปี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2561 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ.2561

ขณะศึกษาในระดับปริญญาโทได้รับทุนผู้ช่วยสอนสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และมีการตีพิมพ์ผลงานทางวิชาการปรากฏดังภาคผนวก ง. จำนวน 3 ฉบับ

