



## รายงานการวิจัย

การหาแบบจำลองและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่โหลดเป็น

อิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกัน

**(Modelling and Stability Analysis of Paralleled Power Electronic Loads)**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การหาแบบจำลองและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่โหลดเป็น

อิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกัน

(Modelling and Stability Analysis of Paralleled Power Electronic Loads)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ผศ.ดร.กองพล อารีรักษ์

นักวิจัย

ผศ.ดร.กองพันธ์ อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2555

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวงจรดังกล่าวเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง ดังนั้นวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งจึงนำมาใช้ในการทำให้แบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองเชิงเส้น ซึ่งมีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไป การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น อาศัยการเปรียบเทียบการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์กับผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้งานวิจัยได้มีการสร้างชุดทดสอบของระบบเพื่อนำไปใช้ในการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ ซึ่งการยืนยันผลจากชุดทดสอบนั้นจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ถูกต้อง งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เรียกว่า วิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว มาดำเนินการหาค่าพารามิเตอร์ของชุดทดสอบ เพื่อจะทำให้พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีค่าที่สอดคล้องกับพารามิเตอร์ของชุดทดสอบ จากผลการทดสอบเสถียรภาพในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ สามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งผลที่ได้จากทางทฤษฎี การจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์ รวมถึงผลที่ได้จากการทดสอบมีความสอดคล้องกัน

## Abstract

This research presents the mathematical model of the power electronic systems derived from the DQ method and generalized state-space averaging method. The considered power system consists of the three-phase voltage source, six-pulse diode rectifier, and DC-link filters connected to the paralleled constant power loads (CPLs). These loads are the buck converters in which the output voltage is controlled to be a constant. The CPL can significantly degrade the power system stability. Therefore, the stability analysis by using the linearized model with the eigenvalue theorem is used in the research. The simulation results are used to validate the proposed mathematical model and the instability point predicted from the theory. In addition, the testing rig of the studied system is implemented to validate the stability results as well. However, the accurate system parameters of the testing rig are very important. In the research, the artificial intelligence technique called adaptive tabu search (ATS) is applied to identify the system parameters. These identified parameters are then used with the dynamic model to analyze the stability of the practical system. The results show that the proposed mathematical model can predict the unstable point due to the CPL. The good agreement between the theoretical, simulation, and experimental results can be achieved in this research.

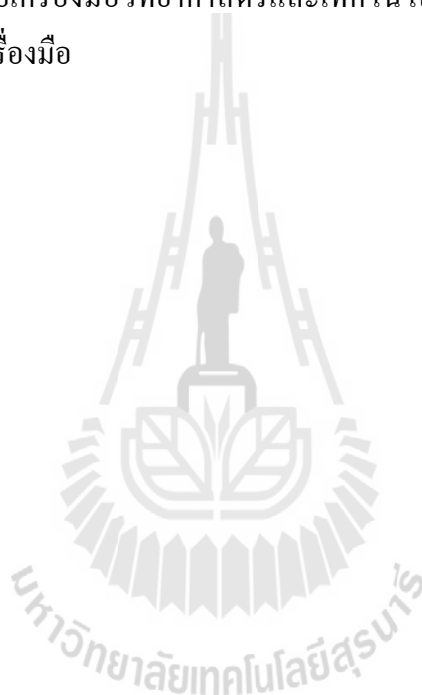


## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การหาแบบจำลองและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่โหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกัน สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ นายเทพพนม โสภากำ ที่เป็นผู้ช่วยวิจัย ที่มีความทุ่มเท และการเอาใจใส่อย่างยิ่งในการทำงานวิจัย สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณพนักงานศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 3 ทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

กองพล อารีรักษ์

มิถุนายน 2555



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย.....	3
<b>2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 บทนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ.....	8
2.4 งานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้.....	9
2.5 สรุป.....	10
<b>3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ.....</b>	<b>11</b>
3.1 บทนำ.....	11
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	11

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและสมมติฐาน.....	12
3.2.2	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีดีคิว.....	14
3.2.3	การทำให้เป็นเชิงเส้น.....	22
3.2.4	การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว.....	24
3.2.5	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ.....	27
3.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	29
3.4	สรุป.....	31
4	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	33
4.1	บทนำ.....	33
4.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ที่ไม่มีตัวควบคุม.....	33
4.2.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและสมมติฐาน.....	33
4.2.2	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีดีคิว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป.....	34
4.2.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ.....	43
4.3	วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผัน แบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม.....	47
4.3.1	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบ.....	47
4.3.2	การทำให้เป็นเชิงเส้น.....	50
4.3.3	การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว.....	51
4.3.4	การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	53
4.3.5	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ.....	57
4.4	การวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	59
4.5	การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบ.....	61
4.6	สรุป.....	68

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>5</b>	
<b>วงจรรีเลย์กระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผัน</b>	
<b>แบบบัคค์ขนานกัน.....</b>	<b>69</b>
5.1 บทนำ.....	69
5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	69
5.2.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและสมมติฐาน.....	69
5.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบ.....	70
5.2.3 การทำให้เป็นเชิงเส้น.....	75
5.2.4 การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว.....	78
5.2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ.....	78
5.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	82
5.4 สรุป.....	84
<b>6</b>	
<b>การสร้างชุดทดสอบ.....</b>	<b>86</b>
6.1 บทนำ.....	86
6.2 วงจรรีเลย์กระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	86
6.2.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ.....	86
6.2.2 ผลการทดสอบวงจรและอภิปรายผล.....	88
6.3 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	90
6.3.1 วิธีการออกแบบ.....	91
6.3.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR.....	96
6.3.3 การทดสอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR.....	102
6.3.4 ผลการทดสอบวงจรและอภิปรายผล.....	105
6.4 วงจรรีเลย์กระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	107
6.4.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ.....	107
6.4.2 ชุดทดสอบวงจรตรวจจับ.....	108
6.4.3 การสร้างตัวควบคุมแบบพีไอด้วยชุดทดสอบบอร์ด	
ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR.....	110



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.4.4 ผลการทดสอบวงจรและอภิปรายผล.....	111
6.5 สรุป.....	113
<b>7 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบ.....</b>	<b>114</b>
7.1 บทนำ.....	114
7.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของระบบชุดทดสอบด้วยวิธีการค้นหา แบบตามูเชิงปรับตัว.....	114
7.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง.....	116
7.4 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	119
7.5 สรุป.....	121
<b>8 สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>123</b>
8.1 สรุป.....	123
8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	125
รายการอ้างอิง.....	127
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – رافสัน.....	130
ภาคผนวก ข. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB.....	136
ภาคผนวก ค. โครงสร้างชุดบอร์ด ET-EASY1280.....	139
ภาคผนวก ง. พอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280.....	143
ภาคผนวก จ. โปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino.....	146
ภาคผนวก ฉ. บทความวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่.....	151

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	5
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ.....	8
2.3 ผลงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้.....	10
3.1 พารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณา.....	28
4.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 4.1.....	43
5.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 5.1.....	79
7.1 ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบ.....	115
7.2 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบจริง.....	118



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ.....11
3.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟสและความต้านทานมุมความเหลื่อม.....12
3.3	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์.....13
3.4	แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว..... 16
3.5	วงจรสมมูลเรียงกระแสสามเฟสที่อยู่ในรูปของแกนหมุนดีคิว..... 16
3.6	ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส.....17
3.7	วงจรสมมูลสายส่งกำลังไฟฟ้าในรูปของแกนหมุนดีคิว..... 18
3.8	ตัวเก็บประจุของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส..... 18
3.9	วงจรสมมูลสายส่งกำลังไฟฟ้าในรูปแกนหมุนดีคิว..... 19
3.10	วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว.....20
3.11	วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง..... 20
3.12	สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....25
3.13	ผลการคำนวณค่าในสภาวะอยู่ตัวสำหรับ $V_{bus}$ , $V_{dc}$ และ $\lambda_o$ ที่มีการเปลี่ยนแปลง $P_{CPL}$ ..... 27
3.14	ผลการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติจาก 20 เป็น 30 W..... 28
3.15	ผลการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติจาก 30 เป็น 40 W.....29
3.16	ค่าเจาะจงของแบบจำลองวิธีดีคิวที่เป็นเชิงเส้น..... 30
3.17	ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพ..... 30
3.18	การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์..... 31
4.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผัน แบบบัคค์ที่ไม่มีตัวควบคุม .....34
4.2	วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว.....34
4.3	วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง..... 35
4.4	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผัน..... 37
4.5	ผลการตอบสนอง เมื่อ วัฏจักรหน้าที่ = 40 %..... 45

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ผลการตอบสนอง เมื่อ วัฏจักรหน้าที่ = 60 % .....	46
4.7 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผัน แบบบัก์ที่มีการควบคุม.....	47
4.8 วงจรสมมูลบนแกนหมุนดีคิว เมื่อ กำหนด $\phi_1 = \phi$ .....	48
4.9 ลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า.....	53
4.10 ลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า.....	55
4.11 ผลการตอบสนอง $V_{dc}$ และ $V_o$ ของระบบ ที่มีการเปลี่ยนแปลง $V_o^*$ จาก 70 V ไปเป็น 100 V.....	58
4.12 ผลการตอบสนอง $V_{dc}$ และ $V_o$ ของระบบ ที่มีการเปลี่ยนแปลง $V_o$ จาก 100 V ไปเป็น 130 V.....	58
4.13 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	60
4.14 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์.....	61
4.15 ผลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $C_{dc}$ ที่มีผลต่อเสถียรภาพ.....	62
4.16 ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL,total} = 115$ W เมื่อกำหนดให้ $C_{dc} = 500$ $\mu$ F.....	63
4.17 ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL,total} = 170$ W เมื่อกำหนดให้ $C_{dc} = 800$ $\mu$ F.....	63
4.18 ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL,total} = 240$ W เมื่อกำหนดให้ $C_{dc} = 1200$ $\mu$ F.....	64
4.19 ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL,total} = 300$ W เมื่อกำหนดให้ $C_{dc} = 1600$ $\mu$ F.....	64
4.20 ผลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $L_{dc}$ ที่มีผลต่อเสถียรภาพ.....	65
4.21 ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL,total} = 250$ W เมื่อกำหนดให้ $L_{dc} = 20$ mH.....	66
4.22 ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL,total} = 180$ W เมื่อกำหนดให้ $L_{dc} = 30$ mH.....	66
4.23 ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL,total} = 140$ W เมื่อกำหนดให้ $L_{dc} = 40$ mH.....	67
4.24 ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL,total} = 120$ W เมื่อกำหนดให้ $L_{dc} = 50$ mH.....	67
5.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ขนานกัน.....	70
5.2 วงจรสมมูลบนแกนดีคิว เมื่อ กำหนด $\phi_1 = \phi$ .....	71
5.3 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว รวมถึงตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัก์.....	73

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 ผลการตอบสนอง $V_{dc}$ , $V_{o1}$ และ $V_{o2}$ ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 ที่มีการเปลี่ยนแปลง $V_{o1}^*$ และ $V_{o2}^*$ .....	80
5.5 ผลการตอบสนอง $V_{dc}$ , $V_{o1}$ และ $V_{o2}$ ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 ที่มีการเปลี่ยนแปลง $V_{o1}^*$ และ $V_{o2}^*$ .....	81
5.6 ค่าจะจงที่ใช้สำหรับพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	83
5.7 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์.....	84
6.1 แผนภาพผังงาน (schematic diagram) สำหรับการทดสอบ วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์.....	87
6.2 ภาพการต่อวงจรสำหรับทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์.....	88
6.3 ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ).....	89
6.4 ภาพต่อวงจรสำหรับทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดความต้านทาน.....	90
6.5 โครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	91
6.6 มอดูของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	92
6.7 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	94
6.8 ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	95
6.9 ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	95
6.10 ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280.....	96
6.11 การต่อสัญญาณแบบคีย์สวิตซ์.....	100
6.12 ภาพการต่อใช้งานมอดู LCD.....	101
6.13 องค์ประกอบของชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR.....	102
6.14 ชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR.....	103
6.15 แผนภาพการใช้งานชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR.....	104
6.16 ผลการทดสอบจากการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าจาก 10 % เป็น 20 %.....	105
6.17 ผลการทดสอบจากการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าจาก 30 % เป็น 40 %.....	106
6.18 ภาพการต่อวงจรสำหรับทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟส ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	107

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.19 ภาพการต่อวงจรชุดทดสอบวงจรตรวจจับ.....	108
6.20 ชุดทดสอบวงจรตรวจจับ.....	109
6.21 ผลทดสอบการตอบสนอง $V_{dc}$ , $V_{o1}$ และ $V_{o2}$ ของการทดสอบในรูปที่ 6.18 ที่มีการเปลี่ยนแปลง $V_{o1}^*$ และ $V_{o2}^*$ .....	112
6.22 ผลทดสอบการตอบสนอง $V_{dc}$ , $V_{o1}$ และ $V_{o2}$ ของการทดสอบในรูปที่ 6.18 ที่มีการเปลี่ยนแปลง $V_{o1}^*$ และ $V_{o2}^*$ .....	112
7.1 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาพารามิเตอร์.....	115
7.2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก $40 V_{rms}$ ไป $50 V_{rms}$ .....	116
7.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม....	117
7.4 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบ.....	119
7.5 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์.....	120
7.6 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง.....	120

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน โหลดทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronic loads) เช่น วงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี และเอซีเป็นเอซี ที่ต่อกับโหลดมอเตอร์ไฟฟ้า หรือ โหลดความต้านทาน ที่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ หรือ มีการควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทาน ได้รับความนิยมนำใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ดังเช่น การใช้งานในระบบเครื่องบิน เรือดำน้ำ หรือรถไฟฟ้า เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากโหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลังดังกล่าว ให้ประสิทธิภาพสูง การดูแลบำรุงรักษาต่ำ และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย ไม่ซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตาม โหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุม จะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงที่ ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็น ค่าตัวต้านทานติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม และอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบได้ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ เนื่องจากถ้าระบบไฟฟ้ากำลังขาดเสถียรภาพอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ที่สามารถคาดเดาได้ว่า ระบบจะขาดเสถียรภาพในกรณีใดได้บ้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบจะมีผลต่อเสถียรภาพของระบบอย่างไร ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพนี้จะใช้ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ประกอบกับผลการทดสอบกับระบบจริง เพื่อใช้ในการยืนยันสถานะการทำงานที่ระบบขาดเสถียรภาพที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงการคาดเดาการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่มีผลต่อเสถียรภาพ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาแบบจำลองของระบบที่มีโหลดเป็นแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ (โหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุม) สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

1.2.2 เพื่อสร้างชุดทดสอบ สำหรับการยืนยันผลการขาดเสถียรภาพของระบบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้

1.2.3 เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการหาแบบจำลองของระบบ สำหรับใช้วิเคราะห์กับระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต เช่น ระบบเครื่องบิน ระบบเรือดำน้ำ หรือระบบรถไฟฟ้า เป็นต้น

### 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB

1.3.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา ใช้วิธีการแปลงคิคว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะแบบทั่วไปผสมผสานกัน

1.3.3 การทำให้แบบจำลองเป็นเชิงเส้น ใช้อนุกรมเทเลอร์อันดับหนึ่ง

1.3.4 การทำงานของวงจรแปลงผันกำลัง จะทำงานภายใต้โหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง

1.3.5 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณา จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ รวมถึงผลการทดสอบจากชุดทดสอบจริง

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์กับระบบที่เป็นเชิงเส้น

1.4.2 ระบบที่ทำการวิเคราะห์ จะผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) โดยสมมุติว่าระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำการศึกษามีจุดการทำงานที่คงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานแบบทันทีทันใด

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ด้านการหาแบบจำลองของระบบที่มีโหลดเป็นแบบกำลังไฟฟ้าคงที่

1.5.2 ได้องค์ความรู้ด้านการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

1.5.3 ได้โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ

1.5.4 ได้ต้นแบบชุดทดสอบทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

1.5.5 บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ



1.5.6 ผลที่ได้จากการวิจัย จะนำไปสอนนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า ทั้งระดับปริญญาตรี และปริญญาโท เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไปในอนาคต

## 1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 8 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

**บทที่ 1** เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ รวมทั้งขอบเขตของการวิจัย

**บทที่ 2** กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบักค์

**บทที่ 3** นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มี โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ โดยอาศัยพื้นฐานวิธีดีคิว ข้อสมมติฐาน การประยุกต์วิธีดีคิวกับ วงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า การทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทอร์เลอร์อันดับหนึ่ง การคำนวณค่าใน สภาวะคงตัว และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ได้นำเสนอ การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมกับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วย การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

**บทที่ 4** นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ บริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่ไม่มีการควบคุม และมีการควบคุม โดยอาศัยวิธีการร่วมกัน ระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การหาสมการเชิงพลวัตของตัวควบคุมแบบพีไอ การทำให้เป็นเชิงเส้น การคำนวณค่าสภาวะคงตัว และการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ของวงจรแปลงผันแบบบักค์ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 ระบบ รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจร แปลงผันแบบบักค์ที่มีการควบคุม พร้อมกับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลอง สถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ได้นำเสนอการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบที่มีผลต่อ เสถียรภาพ

**บทที่ 5** นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ บริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ขนานกัน ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรแปลงผันแบบบักค์ 2 ชุด และตัวต้านทาน โดยอาศัยวิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การ ทำให้เป็นเชิงเส้น การคำนวณค่าสภาวะคงตัว การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบพร้อมกับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

*บทที่ 6* นำเสนอการชดเชยตอบสนองวงจรรีจิงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน ชดเชยตอบสนองวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดความต้านทาน ชดเชยตอบสนองวงจรรีจิงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์และโหลดความต้านทานขนานกัน ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR การทดสอบบอร์ด รวมไปถึงการสร้างตัวควบคุมแบบพีไอด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด AVR สำหรับการควบคุมแรงดันแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ นอกจากนี้แนะนำการสร้าง ชุดวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า รวมไปถึงผลการทดสอบวงจรและอภิปรายผล

*บทที่ 7* นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชดเชย สำหรับวงจรรีจิงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ พร้อมทั้งยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์และการยืนยันผลจากชุดทดสอบ

*บทที่ 8* เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 6 ส่วน คือ *ภาคผนวก ก.* แสดงรายละเอียดโปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราฟสัน *ภาคผนวก ข.* แสดงรายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB *ภาคผนวก ค.* แสดงรายละเอียดโครงสร้างชุดบอร์ด ET-EASY1280 *ภาคผนวก ง.* แสดงรายละเอียดพอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 *ภาคผนวก จ.* แสดงรายละเอียดโปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino *ภาคผนวก ฉ.* แสดงรายการบทความทางวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการทำวิจัย

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งขนานกัน ซึ่งในอดีตที่ผ่านมา งานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้มีผู้ทำการวิจัยค้นคว้า และพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้ในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ และงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้ ซึ่งในแต่ละหัวข้อผู้วิจัยจึงนำเสนอเรียงตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งขนานกัน ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพและหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบควบคุม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1990	Rim, C.T., Hu, D.Y., and Cho, G.H.	นำเสนอการแปลงวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรเรียงกระแส และวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ ให้อยู่บนแกนดีคว ในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับเวลา

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1991	Sanders, S. R., Noworolski, J. M., Liu, X. Z., and Vergliese, G.C.	นำเสนอวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะสำหรับวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบใช้ฟีดแบ็คเบิลยูเอ็ม สำหรับการสวิตช์ รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบเรโซแนนซ์ประเภทต่างๆ
1993	Sudhoff, S.D., and Wasynczuk, O.	นำเสนอการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันที่มีโหลดเป็นเครื่องจักรกลเชิงโรตารี
1993	Baghrmian, A., and Forsyth, A.J.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยใช้วิธีการค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น
1994	Rim, C.T., Choi, N.S., Cho, G.C., and Cho, G.H.	นำเสนอการแปลงวงจรไปอยู่บนแกนดีคิวสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ใช้เทคนิคการควบคุมการจ่ายกระแสด้วยฟีดแบ็คเบิลยูเอ็ม
1998	Han, S.B., Choi, N.S., Rim, C.T., and Cho, G.H.	นำเสนอการแปลงวงจรให้อยู่บนแกนดีคิวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสโดยใช้เทคนิคฟีดแบ็คเบิลยูเอ็มแบบบัตต์ รวมถึงการพิสูจน์สมการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลบนแกนดีคิว
1998	Jianping, Xu., and Lee, C. Q.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับการวิเคราะห์ของวงจรแปลงผันแบบเรโซแนนซ์เสมือน
2004	Emadi, A.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ระบบวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังหลายชนิด โดยใช้วิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004	Mahdavi, J., Emadi, A., Geoffrey, A., and Williamson	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองสถานการณ์ของระบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากำลังต่างๆ บนเรือโดยใช้วิธี ค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2006	Dong, P., Cheng, K.W.E., Ho, S. L., Yang, J. M., and Choi, W.F.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบคลาสสิก โดยใช้วิธี ค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยมาประยุกต์กับระบบยานยนต์
2007	Han, L., Wang, J., and Howe, D.	นำเสนอการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการ ค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., Thomas D,W.P.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้วิธีดีคิว ในระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้เทคนิคการควบคุมด้วยวิธีพีดับเบิลยูเอ็ม

จากตารางที่ 2.1 พบว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีคิวนิยมใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์นิยมใช้วิธีดีคิว เนื่องจากวิธีดีคิวเหมาะสมกับระบบสามเฟสและทำให้แบบจำลองที่ได้มีความซับซ้อนน้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกัน เพื่อสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้องและแม่นยำ

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ

เนื่องจากปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ถูกนำมาใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะโหลดวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน เมื่อนำวงจรดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีผ่านวงจรกรองจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงเริ่มศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ โดยปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ ตามที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงไว้ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1969	Lipo, T. A., and Krause, P. C.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
1999	Emadi, A., Fahimi, B., and Ehsani M.	นำเสนอเกี่ยวกับแนวคิดของการขาดเสถียรภาพของอิมพีแดนซ์เชิงลบด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีเพิ่มมากขึ้นในระบบกำลังไฟฟ้าบนเครื่องบิน
2004	Jusoh., A.B.	นำเสนอผลกระทบของการขาดเสถียรภาพที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวรวมถึงทฤษฎีการออกแบบวงจรกรองและการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า
2005	Rivetta, C.H., Williamson, G.A., and Emadi, A.	นำเสนอวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังและวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีการควบคุมที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ รวมถึงการขาดเสถียรภาพเนื่องจากอิมพีแดนซ์เชิงลบในระบบกำลังไฟฟ้าของเรือดำน้ำ
2006	Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A.	นำเสนอโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและการขาดเสถียรภาพเนื่องจากอิมพีแดนซ์เชิงลบในระบบยานยนต์

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2006	Sun, J., and Colon, J.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ อินพุตอิมพีแดนซ์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของ ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี
2008	Liutanakul, P., Pierfederici, S., Bilal, A., and Nahid-Mobarakeh, B.	นำเสนอการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบการ ขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์โดยใช้หลักการ พิจารณาอินพุตอิมพีแดนซ์จากแผนภาพในควิสต์
2009	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., Thomas, D.W.P. Watson, A., Wu, T.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กของ ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีของพลวัตชุดขับเคลื่อน สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินรวมถึงการสร้าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีคิคว เพื่อนำไปคาดเดา จุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพและได้แสดงการยืนยัน ผลจากชุดทดสอบ
2011	Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas D.W.P.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง บนเครื่องบินและศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการควบคุม แรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและพลวัตการขับเคลื่อนที่ มีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

## 2.4 งานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน ซึ่งในงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา สำหรับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ผู้วิจัยได้พัฒนาการนำวิธีการของวิธีคิคว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาใช้ร่วมกันในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการต่อขนานกันของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีพลวัตของตัวควบคุม อีกทั้งยังได้พัฒนาการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของระบบจริงโดยใช้วิธีการค้นหา

แบบตาบุงเชิงปรับตัว ซึ่งจะส่งผลให้การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยระบบจริงให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น โดยผลงานวิจัยในอดีตที่ได้รับการพัฒนาแสดงดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1997	Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M.	นำเสนอการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยใช้วิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป รวมถึงวิธีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2002	Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Srikaew, A., and Sujitjorn, S.	นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ผ่านทางวิธีการค้นหาแบบตาบุงเชิงปรับตัว สำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานกับการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบต่างๆ
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G., and Thomas, D.W.P.	นำเสนอการอธิบายเกี่ยวกับโหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน

## 2.5 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ขนานกัน ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้น ถือเป็นพื้นฐานและองค์ความรู้ที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัย สำหรับการทำวิจัย และการพัฒนาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบจริงให้มีความถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้นด้วย



## บทที่ 3

### วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

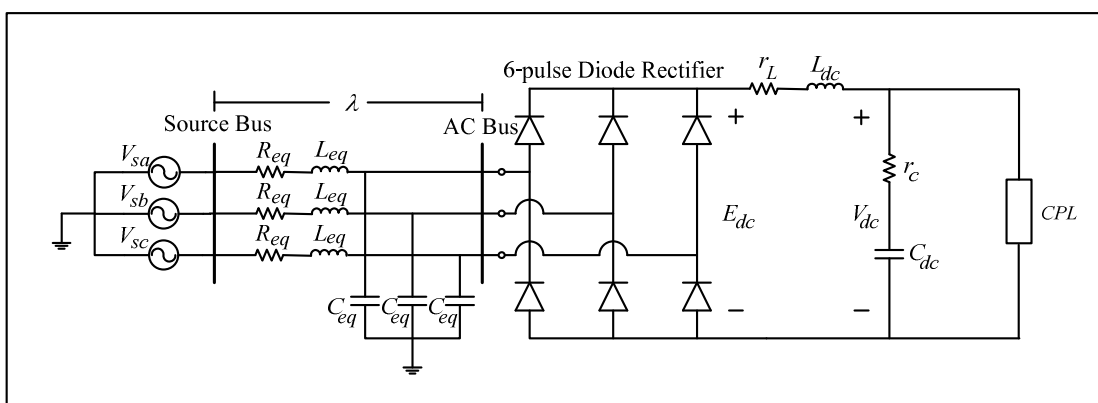
#### 3.1 บทนำ

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเริ่มศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ โดยใช้วิธีตีความ ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับผู้วิจัยที่สามารถนำไปพัฒนาจากระบบดังกล่าวได้ เนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีตีความ การทำให้เป็นเชิงเส้น การคำนวณค่าในสถานะคงตัว การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ และการวิเคราะห์เสถียรภาพพร้อมการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

#### 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

##### 3.2.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและสมมติฐาน

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสามเฟส สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองสัญญาณดีซี และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งในบทนี้จะพิจารณาโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติแทนระบบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม



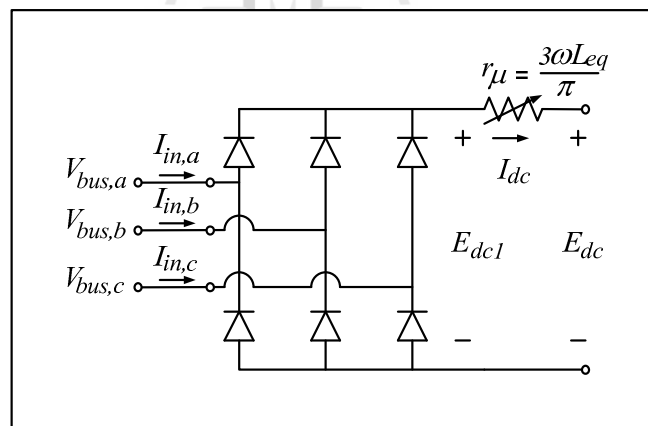
รูปที่ 3.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

พิจารณาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นแบบสมมูล  $R_{eq}$ ,  $L_{eq}$  และ  $C_{eq}$  แทน พารามิเตอร์วงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้า ในส่วนพารามิเตอร์ของวงจรกรองสัญญาณดีซีที่แทน ด้วย  $r_L$ ,  $L_{dc}$ ,  $r_c$  และ  $C_{dc}$  ซึ่งมี  $E_{dc}$  และ  $V_{dc}$  เป็นแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ บริดจ์ และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_{dc}$  ตามลำดับ สำหรับมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัส แหล่งจ่าย (Source bus) และบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC bus) แทนด้วย  $\lambda$  แสดงดังรูปที่ 3.1

ผลจาก  $L_{eq}$  ด้านไฟฟ้ากระแสสลับส่งผลกระทบต่อให้เกิดมุมความเหลื่อม (Overlap angle)  $\mu$  ซึ่งจะทำให้แรงดันเอาต์พุตตก ผลกระทบเหล่านี้สามารถพิจารณาให้แทนด้วยความ ด้านทานแบบปรับค่าได้  $r_\mu$  ที่บริเวณด้านไฟฟ้ากระแสตรง (Mohan, Underland, and Robbins, 2003) โดยแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งความต้านทานปรับค่าได้  $r_\mu$  สามารถคำนวณได้โดยสมการที่ (3.1) ดังนี้

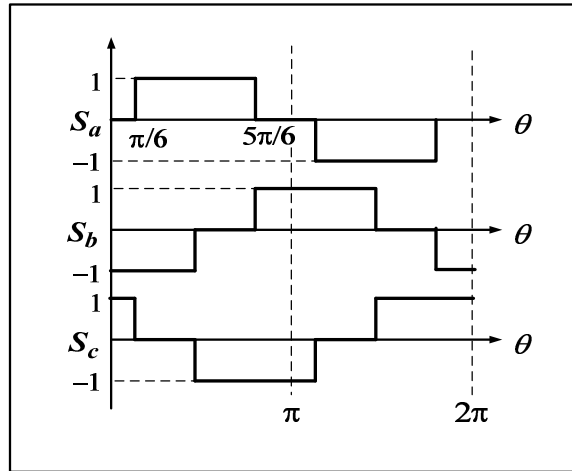
$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\omega$  คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า



รูปที่ 3.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสและความต้านทานมุมความเหลื่อม

จากรูปที่ 3.2  $E_{dc1}$  แทนแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโดยไม่พิจารณาผลกระทบของมุม ความเหลื่อม ในขณะที่  $E_{dc}$  เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรที่พิจารณาผลกระทบของมุมความ เหลื่อมด้วยความต้านทานที่ปรับค่าได้ เมื่อพิจารณาผลกระทบดังกล่าวให้อยู่ทางด้านไฟฟ้า กระแสตรง ทำให้สามารถวิเคราะห์สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดย ไม่พิจารณาผลกระทบมุมความเหลื่อม แสดงดังรูปที่ 3.3 ดังนี้



รูปที่ 3.3 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

สัญญาณการสวิตช์  $s_a$  ในรูปที่ 3.3 สามารถแสดงได้โดยอนุกรมฟูรีเยร์ดังสมการที่ (3.2) ดังนี้

$$S_a = \sum_{k=1,5,7,\dots}^{\infty} \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{(-1)^{L+1}}{k} \times (-2 \sin k\omega t) \quad (3.2)$$

เมื่อ  $k = 6L \pm 1$  ( $L = 0, 1, 2, \dots, k > 0$ ) และสำหรับ  $S_b$  และ  $S_c$  สามารถแทน  $\omega t$  ในสมการที่ (3.2) ด้วย  $\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$  และ  $\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$  ตามลำดับ จาก (Mahdavi, et al., 1997) ผลของฮาร์โมนิกจะไม่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้น สัญญาณการสวิตช์ในสมการที่ (3.2) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสามเฟสได้ ดังสมการที่ (3.3) ดังนี้

$$\mathbf{S}_{abc} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[ \sin(\omega t + \phi) \quad \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi\right) \quad \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \phi\right) \right]^T \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\phi$  คือ มุมเฟสของบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันระหว่างเอาต์พุตและอินพุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์แสดงดังสมการที่ (3.4) และ (3.5) ตามลำดับ ดังนี้

$$\mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{S}_{abc} \mathbf{I}_{dc} \quad (3.4)$$

$$E_{dc1} = \mathbf{S}_{abc}^T \mathbf{V}_{bus,abc} \quad (3.5)$$

เมื่อ 
$$\mathbf{I}_{in,abc} = \begin{bmatrix} I_{in,a} \\ I_{in,b} \\ I_{in,c} \end{bmatrix} \text{ และ } \mathbf{S}_{abc} = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3.4) และ (3.5) สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีดีคิว เงื่อนไขสำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองดังกล่าว คือ

- วงจรเรียงกระแสสามเฟสพิจารณาในช่วงโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง
- แอมพลิจูดของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ต้องมีค่าคงที่และสมดุล
- ไม่พิจารณาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ

### 3.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีดีคิว

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปแบบของแกนหมุนดีคิว ซึ่งมีสมการที่ใช้ในการแปลงดังสมการที่ (3.6) ดังนี้

$$\begin{cases} \mathbf{f}_{dq} = \mathbf{K} \mathbf{f}_{abc} \\ \mathbf{f}_{abc} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{f}_{dq} \end{cases} \quad (3.6)$$

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

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

จากสมการที่ (3.4) ใช้วิธีการแปลงดีคิวของสมการที่ (3.6) จะได้ดังสมการที่ (3.7) ดังนี้

$$\begin{aligned}
\mathbf{I}_{in,abc} &= \mathbf{S}_{abc} I_{dc} \\
\mathbf{K} \mathbf{I}_{in,abc} &= \mathbf{K} \mathbf{S}_{abc} I_{dc} \quad ; \text{คูณด้วย } \mathbf{K} \text{ ทั้งสองข้าง} \\
\mathbf{I}_{in,dq} &= \mathbf{S}_{dq} I_{dc}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

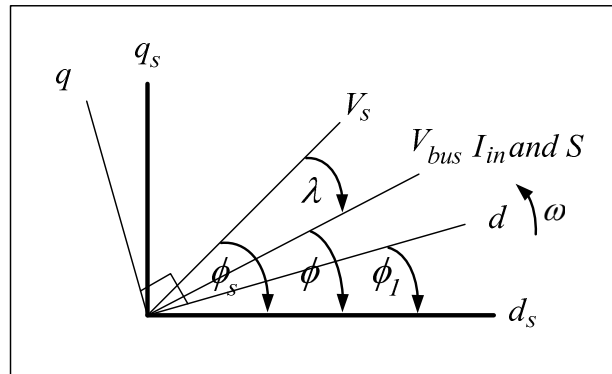
จากสมการที่ (3.5) ใช้วิธีการแปลงดีคิวของสมการที่ (3.6) จะได้ดังสมการที่ (3.8) ดังนี้

$$\begin{aligned}
E_{dc1} &= \mathbf{S}_{abc}^T \mathbf{V}_{bus,abc} \\
E_{dc1} &= [\mathbf{K}^{-1} \mathbf{S}_{dq}]^T [\mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}_{bus,dq}] \\
E_{dc1} &= \mathbf{S}_{dq}^T [\mathbf{K}^{-1}]^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}_{bus,dq} \\
E_{dc1} &= \mathbf{S}_{dq}^T \mathbf{V}_{bus,dq}
\end{aligned} \tag{3.8}$$

สัญณาณการสวิตซ์สามเฟสในสมการที่ (3.3) สามารถแปลงให้อยู่บนแกนหมุนดีคิวได้ ดังสมการที่ (3.9) ดังนี้

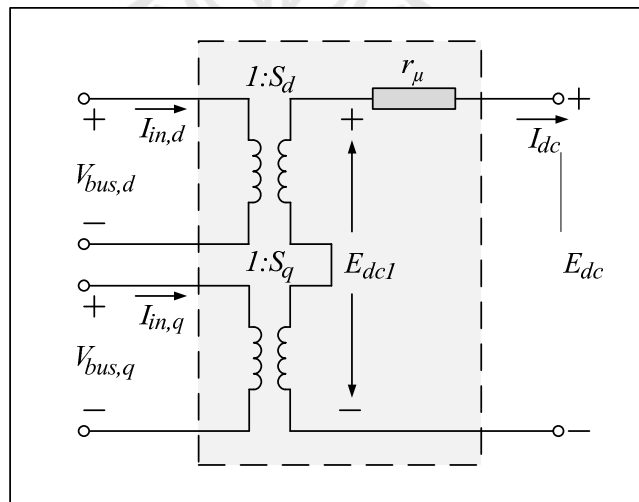
$$\begin{aligned}
\mathbf{S}_{dq} &= \mathbf{K} \mathbf{S}_{abc} \\
\mathbf{S}_{dq} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi\right) \\ \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \phi\right) \end{bmatrix} \\
\mathbf{S}_{dq} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} [\cos(\phi_1 - \phi) \quad -\sin(\phi_1 - \phi)]
\end{aligned} \tag{3.9}$$

แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยที่  $V_s$  คือ ค่ายอดแรงดันเฟสที่แหล่งจ่าย,  $I_{in}$  คือ ค่ายอดกระแส,  $V_{bus}$  คือ ค่ายอดแรงดันที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และ  $S$  คือ ค่ายอดของสัญณาณการสวิตซ์ ซึ่งมีค่าเท่า  $2\sqrt{3}/\pi$



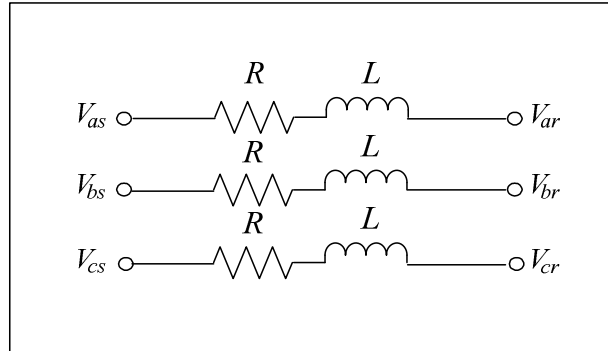
รูปที่ 3.4 แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว

จากสมการที่ (3.7) - (3.9) จะเห็นได้ว่าวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์สามารถแทนให้อยู่ในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้า อยู่บนแกนดี และแกนคิว อัตราส่วนของหม้อแปลงสำหรับ  $s_d$  และ  $s_q$  จะขึ้นอยู่กับมุมการหมุนของแกนดีคิว ( $\phi_l$ ) และ เฟสของ  $V_{bus}(\phi)$  ดังนั้นผลของการแปลงวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ เมื่อใช้วิธีดีคิว จะทำให้มีวงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 3.5 ดังนี้



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลเรียงกระแสสามเฟสที่อยู่ในรูปของแกนหมุนดีคิว

จากรูปที่ 3.1 สำหรับวงจรอนุกรมของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า สามารถพิจารณาจากสมการแรงดันที่ตกคร่อมของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำในรูปที่ 3.6 ได้โดยดั่งสมการที่ (3.10) ดังนี้



รูปที่ 3.6 ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส

$$\Delta \mathbf{V}_{\text{drop,abc}} = R \mathbf{I}_{\text{abc}} + L \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{\text{abc}} \quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.10) สามารถแปลงสมการให้อยู่บนแกนหมุนดีคว ด้วยสมการที่ (3.6) ซึ่งมีขั้นตอนการพิสูจน์แสดงได้ดังนี้

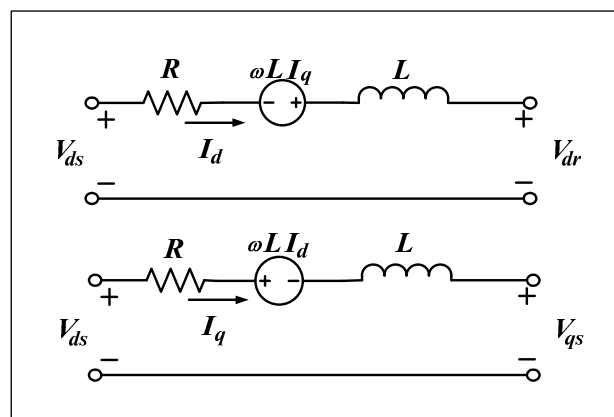
$$\begin{aligned} \mathbf{K}^{-1} \Delta \mathbf{V}_{\text{dq0}} &= R (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{\text{dq0}}) + L \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{\text{dq0}}) \\ \mathbf{K} \mathbf{K}^{-1} \Delta \mathbf{V}_{\text{dq0}} &= R (\mathbf{K} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{\text{dq0}}) + L \mathbf{K}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

ดังนั้น จะได้สมการที่อยู่บนแกนหมุนดีคว แสดงดั่งสมการที่ (3.11) ดังนี้

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

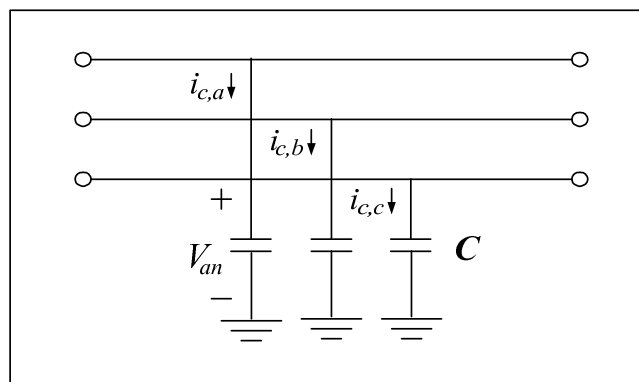
$$\text{เมื่อ } \mathbf{K} \left( \frac{d}{dt} \mathbf{K}^{-1} \right) = \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3.11) สามารถสร้างวงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว แสดงดังรูปที่ 3.7 ดังนี้



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลสายส่งกำลังไฟฟ้าในรูปของแกนหมุนดีคิว

สำหรับวงจรขนานของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า สามารถพิจารณาสมการกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในรูปที่ 3.8 ได้โดยตั้งสมการที่ (3.12) ดังนี้



รูปที่ 3.8 ตัวเก็บประจุของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส



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

จากสมการที่ (3.12) สามารถแปลงสมการให้อยู่บนแกนหมุนดีคว ด้วยสมการที่ (3.6) ซึ่งมีขั้นตอนการพิสูจน์แสดงได้ดังนี้

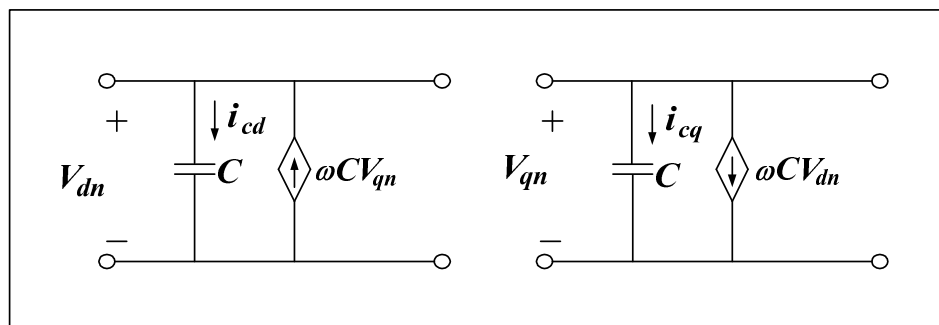
$$\begin{aligned} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{c,dq0} &= C \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}_{dq0}) \\ \mathbf{K} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{c,dq0} &= \mathbf{C} \mathbf{K} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}_{dq0}) \quad ; \text{คูณด้วย } \mathbf{K} \text{ ทั้งสองข้าง} \\ \mathbf{I}_{c,dq0} &= \mathbf{C} \mathbf{K} \left( \frac{d}{dt} \mathbf{K}^{-1} \right) \mathbf{V}_{dq0} + C \frac{d}{dt} (\mathbf{V}_{dq0}) \end{aligned}$$

ดังนั้น จะได้สมการที่อยู่บนแกนดีคว แสดงดังสมการที่ (3.13) ดังนี้

$$\begin{cases} i_{cd} = -\omega C V_q + C \frac{d}{dt} V_d \\ i_{cq} = \omega C V_d + C \frac{d}{dt} V_q \end{cases} \quad (3.13)$$

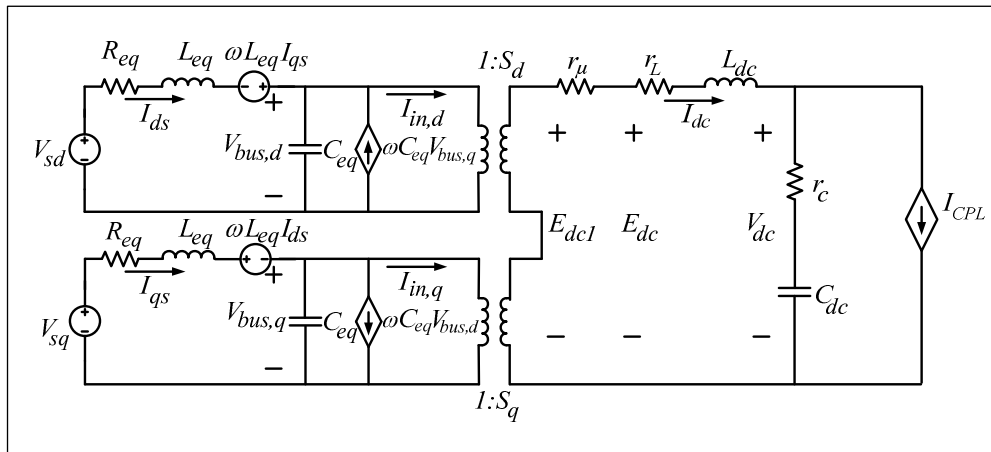
$$\text{เมื่อ } \mathbf{K} \left( \frac{d}{dt} \mathbf{K}^{-1} \right) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ \omega & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3.13) สามารถสร้างวงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดีคว แสดงดังรูปที่ 3.9 ดังนี้



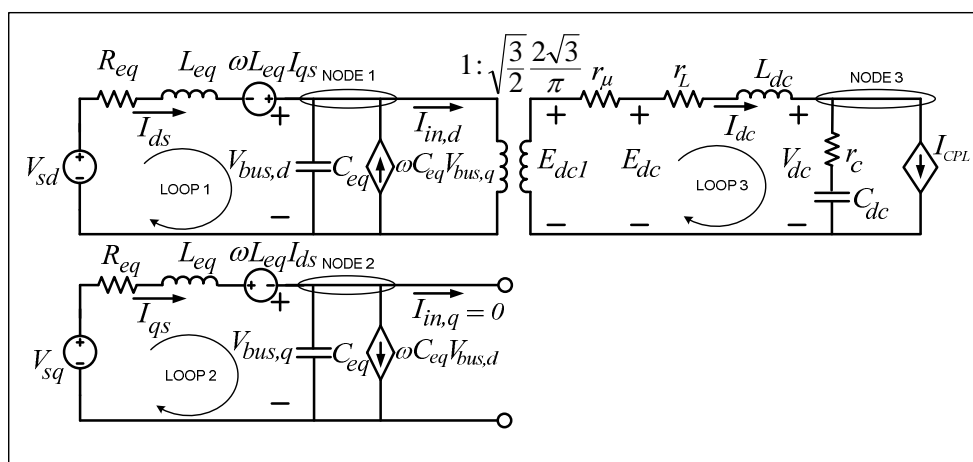
รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลสายส่งกำลังไฟฟ้าในรูปแกนหมุนดีคว

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 เมื่อทำการแปลงให้อยู่ในรูปของแกนหมุนดีควด้วยสมการที่ (3.6) สามารถแทนวงจรของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวงจรสมมูลบนแกนหมุนดีคว ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.10 ดังนี้



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคว

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.10 สามารถทำให้เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายได้ โดยการกำหนดมุมเฟสการหมุนของสัญญาณการสวิตช์ ( $\phi_1 = \phi$ ) ซึ่งจะสังเกตได้ว่า  $I_{in,dq} = 0$  และ หม้อแปลงในแกนดีควได้ถูกกำจัดทิ้ง ดังนั้น วงจรสมมูลอย่างง่ายที่ได้นำมาวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.11 ดังนี้



รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 3.11 โหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ สามารถเขียนสมการแทน โหลดดังกล่าวในรูปแบบของกระแสได้ดังสมการที่ (3.14) เมื่อ  $V_{dc}$  เป็นแรงดันตกคร่อมโหลด กำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ และ  $P_{CPL}$  เป็นค่ากำลังไฟฟ้าของโหลด

$$I_{CPL} = \frac{P_{CPL}}{V_{dc}} \quad (3.14)$$

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) กับวงจรสมมูลในรูปที่ 3.11 โดยกำหนด ตัวแปรสถานะ อินพุต และเอาต์พุต แสดงดังสมการที่ (3.15)

$$\begin{aligned} \text{ตัวแปรสถานะ : } \mathbf{x} &= [I_{ds} \ I_{qs} \ V_{bus,d} \ V_{bus,q} \ I_{dc} \ V_{dc}]^T \\ \text{อินพุต : } \mathbf{u} &= [V_m \ P_{CPL}]^T \\ \text{เอาต์พุต : } \mathbf{y} &= [V_{dc}] \end{aligned} \quad (3.15)$$

รายละเอียดขั้นตอนการพิสูจน์สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 3.11 สามารถแสดงดังสมการที่ (3.16) – (3.21) ดังนี้

- พิจารณาที่ LOOP 1 โดย KVL แสดงดังสมการที่ (3.16) ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{R_{eq}} + V_{L_{eq}} - \omega L_{eq} I_{sq} + V_{bus,d} &= V_{sd} \\ \dot{I}_{ds} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \end{aligned} \quad (3.16)$$

- พิจารณาที่ LOOP 2 โดย KVL แสดงดังสมการที่ (3.17) ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{R_{eq}} + V_{L_{eq}} + \omega L_{eq} I_{sq} + V_{bus,q} &= V_{sq} \\ \dot{I}_{qs} &= -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \end{aligned} \quad (3.17)$$

- พิจารณาที่ NODE 1 โดย KCL แสดงดังสมการที่ (3.18) ดังนี้

$$I_{Sd} - I_{in,d} + \omega C_{eq} V_{bus,q} - I_{C_{eq}} = 0$$

$$\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \quad (3.18)$$

- พิจารณาที่ NODE 2 โดย KCL แสดงดังสมการที่ (3.19) ดังนี้

$$I_{Sq} - \omega C_{eq} V_{bus,d} - I_{C_{eq}} = 0$$

$$\dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \quad (3.19)$$

- พิจารณาที่ LOOP 3 โดย KVL แสดงดังสมการที่ (3.20) ดังนี้

$$V_{r_\mu} + V_{r_L} + V_{L_{dc}} + V_{r_c} + V_{C_{dc}} = E_{dc1}$$

$$\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc}} \quad (3.20)$$

- พิจารณาที่ NODE 3 โดย KCL แสดงดังสมการที่ (3.21) ดังนี้

$$I_{dc} - I_{C_{dc}} - I_{CPL} = 0$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{C_{dc}} \cdot \frac{P_{CPL}}{V_{dc}} \quad (3.21)$$

### 3.2.3 การทำให้เป็นเชิงเส้น

จากสมการที่ (3.16) – (3.21) พบว่าเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น หรืออาจเรียกว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอาศัยแบบจำลองที่ทำให้เป็นเชิงเส้น (linearized model) ภายใต้ทฤษฎีค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) ดังนั้น การทำให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น ผู้วิจัยได้อาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์ อันดับ 1 ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้เป็นเชิงเส้นได้ ดังสมการที่ (3.22) ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{\delta \mathbf{x}} &= \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} &= \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u}\end{aligned}\quad (3.22)$$

เมื่อ

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

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

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

รายละเอียดขั้นตอนการพิสูจน์ของ  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ,  $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ,  $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  และ  $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  แสดง  
ดังสมการที่ (3.23) ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \frac{\dot{\delta I}_{ds}}{\delta I_{ds}} & \frac{\dot{\delta I}_{ds}}{\delta I_{qs}} & \frac{\dot{\delta I}_{ds}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\dot{\delta I}_{ds}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\dot{\delta I}_{ds}}{\delta I_{dc}} & \frac{\dot{\delta I}_{ds}}{\delta V_{dc}} \\ \frac{\dot{\delta I}_{qs}}{\delta I_{ds}} & \frac{\dot{\delta I}_{qs}}{\delta I_{qs}} & \frac{\dot{\delta I}_{qs}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\dot{\delta I}_{qs}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\dot{\delta I}_{qs}}{\delta I_{dc}} & \frac{\dot{\delta I}_{qs}}{\delta V_{dc}} \\ \frac{\dot{\delta V_{bus,d}}}{\delta I_{ds}} & \frac{\dot{\delta V_{bus,d}}}{\delta I_{qs}} & \frac{\dot{\delta V_{bus,d}}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\dot{\delta V_{bus,d}}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\dot{\delta V_{bus,d}}}{\delta I_{dc}} & \frac{\dot{\delta V_{bus,d}}}{\delta V_{dc}} \\ \frac{\dot{\delta V_{bus,q}}}{\delta I_{ds}} & \frac{\dot{\delta V_{bus,q}}}{\delta I_{qs}} & \frac{\dot{\delta V_{bus,q}}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\dot{\delta V_{bus,q}}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\dot{\delta V_{bus,q}}}{\delta I_{dc}} & \frac{\dot{\delta V_{bus,q}}}{\delta V_{dc}} \\ \frac{\dot{\delta I}_{dc}}{\delta I_{ds}} & \frac{\dot{\delta I}_{dc}}{\delta I_{qs}} & \frac{\dot{\delta I}_{dc}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\dot{\delta I}_{dc}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\dot{\delta I}_{dc}}{\delta I_{dc}} & \frac{\dot{\delta I}_{dc}}{\delta V_{dc}} \\ \frac{\dot{\delta V_{dc}}}{\delta I_{ds}} & \frac{\dot{\delta V_{dc}}}{\delta I_{qs}} & \frac{\dot{\delta V_{dc}}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\dot{\delta V_{dc}}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\dot{\delta V_{dc}}}{\delta I_{dc}} & \frac{\dot{\delta V_{dc}}}{\delta V_{dc}} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

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

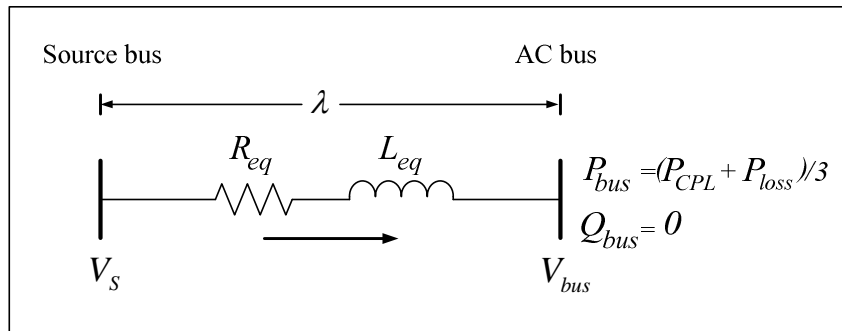
$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} \frac{\delta I_{ds}}{\delta V_m} & \frac{\delta I_{ds}}{\delta P_{CPL}} \\ \frac{\delta I_{qs}}{\delta V_m} & \frac{\delta I_{qs}}{\delta P_{CPL}} \\ \frac{\delta V_{bus,d}}{\delta V_m} & \frac{\delta V_{bus,d}}{\delta P_{CPL}} \\ \frac{\delta V_{bus,q}}{\delta V_m} & \frac{\delta V_{bus,q}}{\delta P_{CPL}} \\ \frac{\delta I_{dc}}{\delta V_m} & \frac{\delta I_{dc}}{\delta P_{CPL}} \\ \frac{\delta V_{dc}}{\delta V_m} & \frac{\delta V_{dc}}{\delta P_{CPL}} \end{bmatrix}_{6 \times 2} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\cos(\lambda_o)}{L_{eq}} & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sin(\lambda_o)}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r_c}{L_{dc} V_{dc,o}} \\ 0 & -\frac{1}{C_{dc} V_{dc,o}} \end{bmatrix}_{6 \times 2}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]_{1 \times 6} \quad (3.23)$$

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

### 3.2.4 การคำนวณค่าในสถานะคงตัว

การคำนวณค่าในสถานะคงตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการที่ (3.22) มีความจำเป็น สำหรับการคำนวณหาค่า  $V_{dc,o}$  และ  $\lambda_o$  โดยวิธีทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้ามาวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าด้านกระแสสลับในรูปที่ 3.1 โดยจะพิจารณาวงจรสายส่งเพียงเฟสเดียว ดังนั้นแผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.12 ซึ่งไม่พิจารณาตัวเก็บประจุของสายส่ง เนื่องจากมีค่าความจุที่น้อยมากจึงไม่นำมาวิเคราะห์



รูปที่ 3.12 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 3.12 สามารถเขียนขั้นตอนการพิสูจน์หาสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังนี้

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

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

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

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

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

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

ดังนั้น จะได้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (3.24)

$$\begin{cases} \frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = P_{bus} \\ \frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

เมื่อ  $V_{bus}$  คือ แรงดันเฟส (rms) ที่บัสเอชี่  $\lambda$  คือ มุมเฟสการเลื่อนระหว่าง  $V_s$  และ  $V_{bus}$  และ  $Z \angle \gamma$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยที่ กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ พิจารณาที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะได้ดังสมการที่ (3.25) ดังนี้

$$\begin{cases} P_{bus} = (P_{CPL} + P_{loss})/3 \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3.25)$$

จากสมการที่ (3.24) และ (3.25) สามารถเขียนโปรแกรมการคำนวณค่า  $V_{bus,o}$  และ  $\lambda_o$  ด้วยวิธีทางคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน-ราฟสัน ได้จากภาคผนวก ก.1 ซึ่งผลที่ได้จะนำมาคำนวณหาค่า  $V_{dc,o}$  ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คิกวิที่ทำให้เป็นเชิงเส้น โดยแสดงดังสมการที่ (3.26) ดังนี้

$$V_{dc,o} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{bus,o}) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,o} - r_L I_{dc,o} \quad (3.26)$$

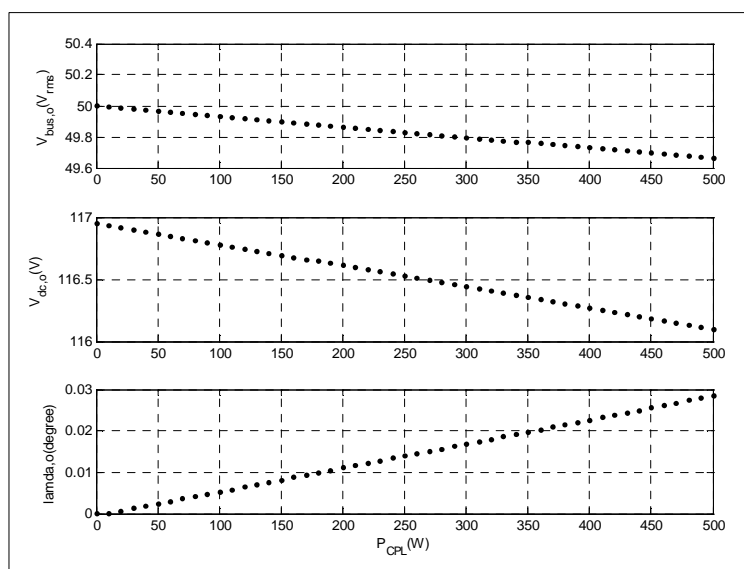
เมื่อ

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

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



จากสมการที่ (3.24), (3.25) และ (3.26) เป็นการคำนวณหาค่าในสภาวะอยู่ตัวเมื่อระบบจุดการทำงานของระบบ (operating point) เปลี่ยน ซึ่งในที่นี้คือ  $P_{CPL}$  ดังนั้น จะส่งผลให้  $V_{dc,o}$  และ  $\lambda_o$  ของแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ผลการคำนวณค่าในสภาวะอยู่ตัวแสดงดังรูปที่ 3.13 ดังนี้



รูปที่ 3.13 ผลการคำนวณค่าในสภาวะอยู่ตัวสำหรับ  $V_{bus}$ ,  $V_{dc}$  และ  $\lambda_o$  ที่มีการเปลี่ยนแปลง  $P_{CPL}$

จากรูปที่ 3.13 สังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้  $V_{bus,o}$  และ  $V_{dc,o}$  มีค่าลดลง และมุมการเลื่อน ( $\lambda$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น แบบจำลองของระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อจุดการทำงานของระบบ ( $P_{CPL}$ ) มีการเปลี่ยนแปลง

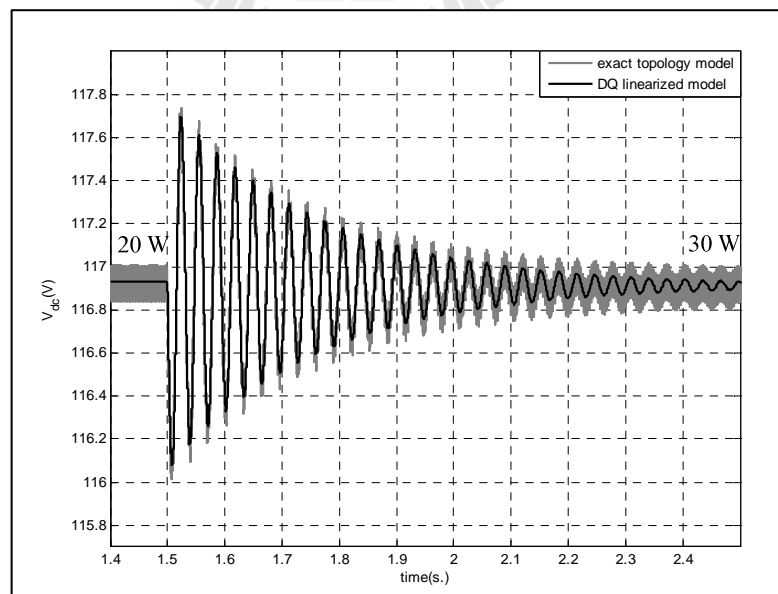
### 3.2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3.22) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ของสัญญาณขนาดเล็กแบบชั่วคราว เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 3.1 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB คูได้จากภาคผนวก ข.1 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 3.1 สำหรับรูปที่ 3.14 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) ที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติจาก 20 W ไปเป็น 30 W ที่เวลา 1.5 วินาที และ รูปที่ 3.15 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) ที่มีการเปลี่ยนแปลงของ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติจาก 30 W ไปเป็น 40 W ที่เวลา 1.5 วินาที จะสังเกตได้ว่า ผล

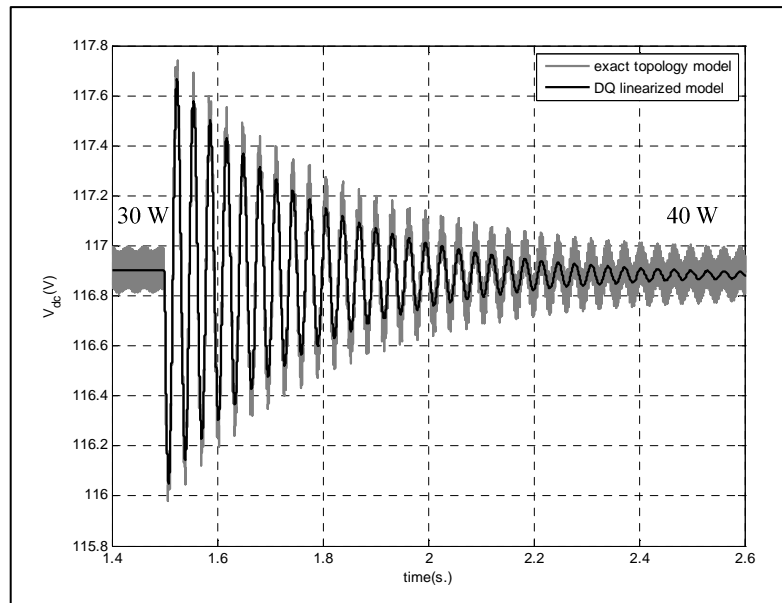
การตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้เป็นเชิงเส้น มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว แบบจำลองในบทนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ต่อไป

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_s$	50 V <sub>rms/phase</sub>	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
$\omega$	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
$R_{eq}$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานของสายส่ง
$L_{eq}$	24 $\mu$ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
$C_{eq}$	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
$r_L$	0.01 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
$L_{dc}$ ( $\Delta I_{dc} \leq 1.5$ A)	50 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$C_{dc}$ ( $\Delta V_{dc} \leq 30$ V)	500 $\mu$ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$r_c$	0.4 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.14 ผลการเปลี่ยนแปลงของโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติจาก 20 เป็น 30 W



รูปที่ 3.15 ผลการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอูคมคติจาก 30 เป็น 40 W

### 3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพ

การนำโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรอง จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอูคมคติ โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งได้รับการอธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.2 ทฤษฎีค่าเจาะจงได้นำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix)  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  ดังสมการที่ (3.27) ดังนี้

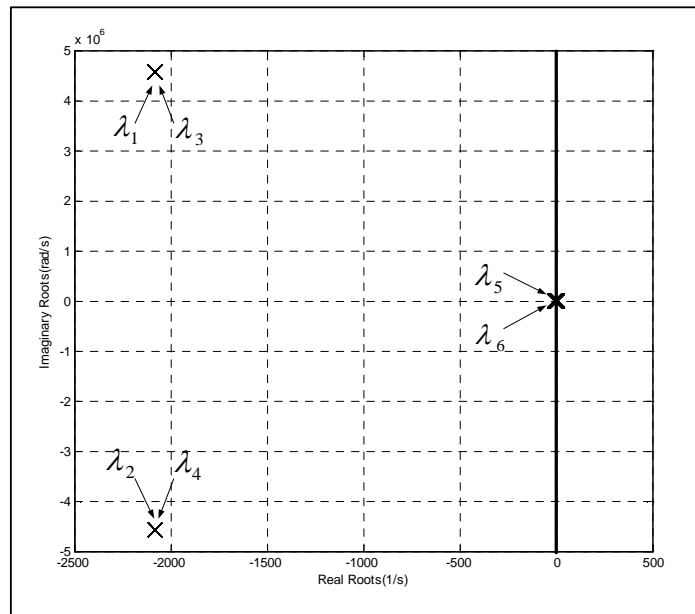
$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (3.27)$$

และถ้าระบบมีเสถียรภาพ สามารถเขียนแสดงดังสมการที่ (3.28) ดังนี้

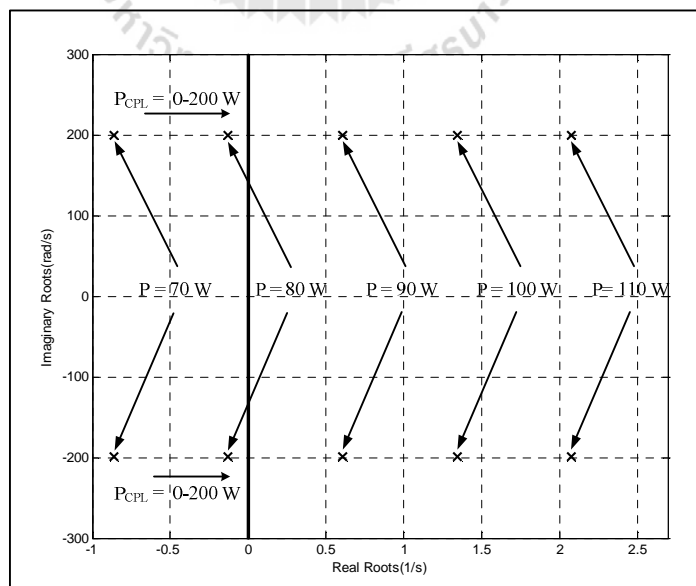
$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (3.28)$$

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

ค่าเจาะจงที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 แสดงดังรูปที่ 3.16 ประกอบไปด้วย  $\lambda_1 - \lambda_6$  โดยค่าเจาะจงที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบคือ  $\lambda_5$  และ  $\lambda_6$  ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.17 ดังนี้

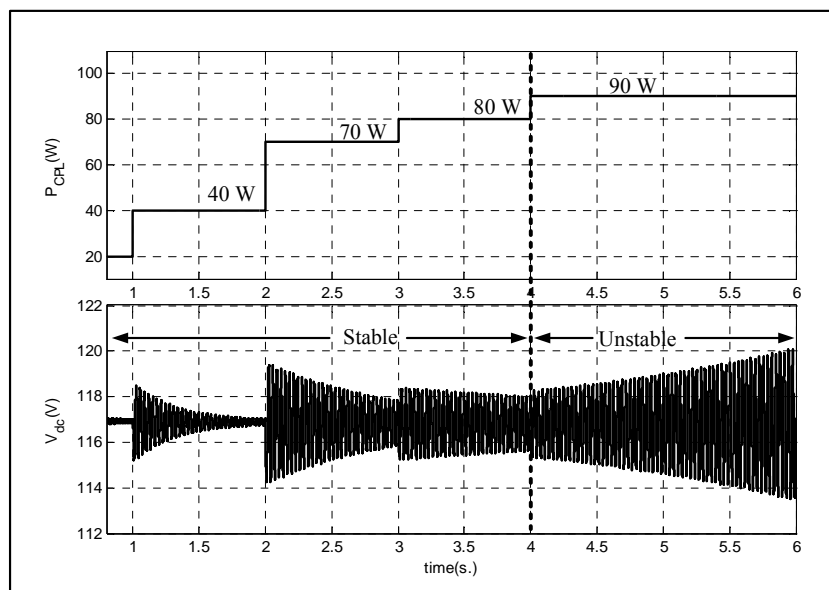


รูปที่ 3.16 ค่าเจาะจงของแบบจำลองวิธีคิวกที่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 3.17 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับพิจารณการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากรูปที่ 3.17 เป็นการผลการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอูมคติจาก 0 – 200 W สังเกตได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 สามารถเปลี่ยนไปเป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพได้ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอูมคติมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 90 W ซึ่งการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ แสดงดังรูปที่ 3.18 ดังนี้



รูปที่ 3.18 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 3.18 สังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าแบบอูมคติมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 90 W จะทำให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่เพิ่มมากขึ้น หรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ ดังนั้น แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น สามารถคาดเดาจุดที่ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

### 3.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 แสดงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอูมคติโดยใช้วิธีดีคิว ซึ่งเป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูงและเหมาะสมกับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส อธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์สมการเชิงอนุพันธ์ การทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทอร์เลอร์อันดับ 1 และการคำนวณค่าในสภาวะอยู่ตัวไว้ อย่างละเอียดเพื่อง่ายต่อการทำความเข้าใจ อีกทั้งมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น โดยนำผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับ การจำลองสถานการณ์ของระบบที่ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง พบว่าผลการเปรียบเทียบ แบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นมีความถูกต้อง และสามารถนำไปคาดเดาการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองที่ ได้รับการพิสูจน์ไว้แล้วด้วยวิธีคิวิ การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพอาศัยผลการจำลอง สถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทนี้ สามารถคาดเดาจุดที่ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ในบทที่ 4 เป็นการสร้าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิวิ และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะ ได้รับการนำเสนอต่อไป



## บทที่ 4

### วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์

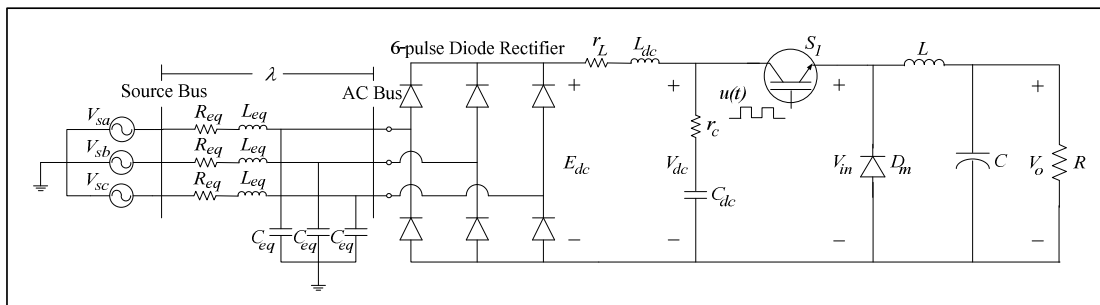
#### 4.1 บทนำ

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ให้มีความถูกต้องและแม่นยำสูง มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการนำไปใช้ในการคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการร่วมกันระหว่างคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการสร้างแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาให้ไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา เพื่อง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ไม่มีตัวควบคุม เนื่องจากวงจรดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุม นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบและการวิเคราะห์เสถียรภาพ อีกทั้งยังนำเสนอการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อเสถียรภาพพร้อมการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการอภิปรายผล

#### 4.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ไม่มีตัวควบคุม

##### 4.2.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและสมมติฐาน

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 4.1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองสัญญาณดีซี และโหลด วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ไม่มีตัวควบคุม สำหรับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรแปลงผันแบบบักก์ จะพิจารณาเงื่อนไขการพิสูจน์เช่นเดียวกับเงื่อนไขที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3

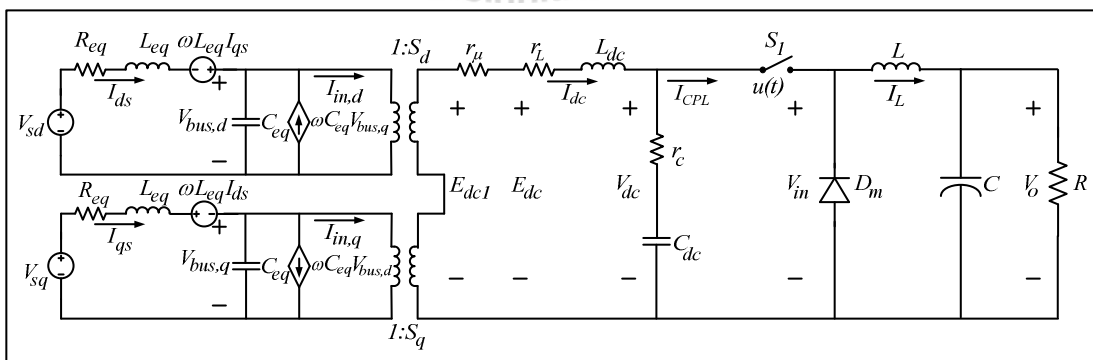


รูปที่ 4.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีตัวควบคุม

พิจารณาจากวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีตัวควบคุมในรูปที่ 4.1 สำหรับ  $S_1$  แทนอุปกรณ์การสวิตช์ ในที่นี้ใช้ มอสเฟส และ  $u(t)$  แทนด้วยสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผัน ในส่วนพารามิเตอร์ของวงจรกรองแทนด้วย  $L$  และ  $C$  ซึ่งมี  $V_o$  เป็นแรงดันที่ตกคร่อมของโหลดตัวต้านทาน  $R$

#### 4.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีดีคิมและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

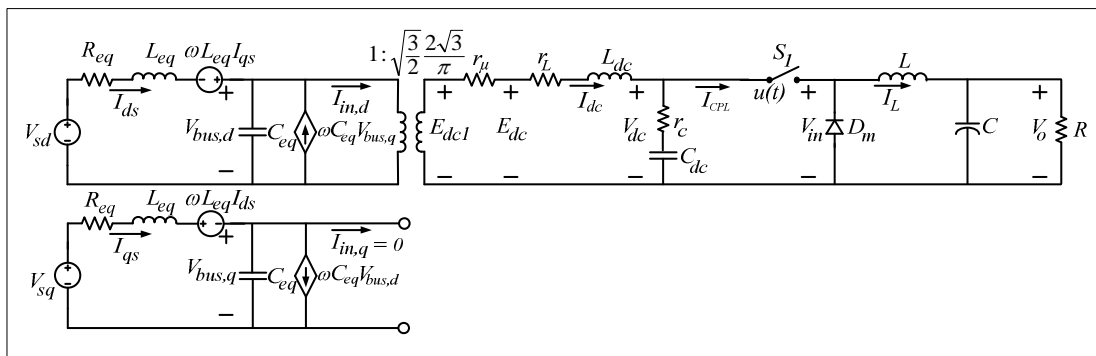
จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 พิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์สามารถแปลงวงจรให้อยู่ในรูปบนแกนหมุนดีคิม โดยอาศัยการพิสูจน์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกันในบทที่ 3 ซึ่งจะได้วงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 4.2 ดังนี้



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณบนแกนหมุนดีคิม



จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4.2 สามารถทำให้เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายได้ โดยการกำหนดมุมเฟสการหมุนของสัญญาณการสวิตช์ ( $\phi = \phi_1$ ) ดังนั้น จะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 4.3 ดังนี้



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า วงจรแปลงผันแบบบักเก้เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา เนื่องจากผลการสวิตช์ ดังนั้นวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเป็นวิธีที่นิยมดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 สำหรับการกำจัดสัญญาณการสวิตช์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา ให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนของตัวแปรสถานะของวงจร (complex Fourier series) ไปเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ซึ่งอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

โดยทั่วไป สัญญาณ  $f(t)$  ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบเป็น  $T$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูป อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (Gamelin, 2000) ดังสมการที่ (4.1) ดังนี้

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} \tag{4.1}$$

โดยที่  $\omega_s = \frac{2\pi}{T}$  และ  $\langle x \rangle_k(t)$  คือ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ จะใช้  $\langle x \rangle_k(t)$  ของสัญญาณแทนตัวแปรสถานะของระบบ ซึ่ง สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (4.2) ดังนี้

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (4.2)$$

คุณสมบัติที่จำเป็นของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อน สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 4.3 (Gamelin, 2000) โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ แสดงได้ดังนี้

- คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (4.3) ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \langle x \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega_s \langle x \rangle_k \quad (4.3)$$

- คุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณ แสดงได้ดังสมการที่ (4.4) ดังนี้

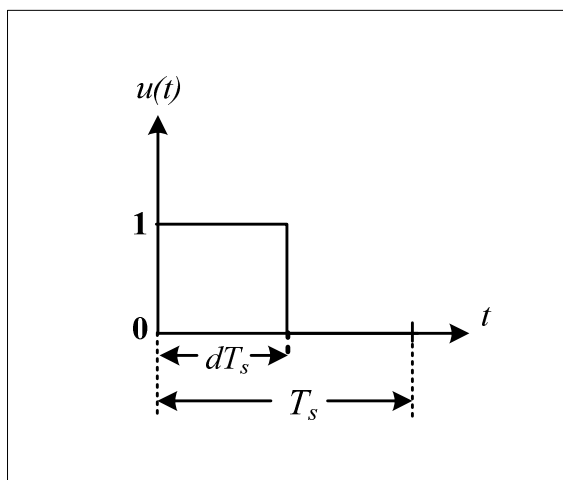
$$\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle y \rangle_i \quad (4.4)$$

- ถ้า  $f(t)$  คือ ค่าจริง (ค่าจริงที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรายคาบ) แสดงได้ดังสมการที่ (4.5) ดังนี้

$$\langle x \rangle_{-k} = \overline{\langle x \rangle_k} = \langle x \rangle_k^* \quad (4.5)$$

สมการที่ (4.1) และ (4.2) โดย  $k$  เป็นตัวบ่งบอกความถี่ของการใช้ อนุกรมฟูรีเยร์ ถ้า  $k$  มีค่าเป็นอันดับอนันต์ ค่าผิดพลาดจากการประมาณจะมีค่าเท่ากับ 0 และถ้าสัญญาณที่ไม่ปรากฏการสั่นไกว จะให้  $k = 0$  ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า การประมาณค่าอันดับศูนย์ (Mahdavi, et al., 1997) หรือถ้าสัญญาณมีการสั่นไกว สามารถกำหนดให้  $k$  มีค่าเป็น 1, 1 ซึ่งจะเรียกวิธีนี้ว่า การประมาณค่าอันดับหนึ่ง (Emadi, 2004)

การพิสูจน์ของแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบักก์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันภายใต้เงื่อนไขโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 4.4 ดังนี้



รูปที่ 4.4 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผัน

จากรูปที่ 4.4 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผัน แสดงดังสมการที่ (4.6) ดังนี้

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (4.6)$$

โดยที่  $d$  คือ วัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของอุปกรณ์การสวิตช์  $S_1$

จากรูปที่ 4.3 พิจารณาวงจรแปลงผันแบบบักก์ เมื่อ สวิตช์  $S_1$  ปิด จะทำให้  $I_{CPL} = I_L$  และ  $V_{dc} = V_{in}$  และ เมื่อ สวิตช์  $S_2$  เปิด จะทำให้  $I_{CPL} = 0$  และ  $V_{in} = 0$  (สมมติให้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด  $D_m$  มีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ เมื่อไดโอดนำกระแส) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{CPL}$  กับ  $I_L$  และความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{in}$  กับ  $V_{dc}$  สามารถเขียนสมการที่อยู่ในรูปของ  $u(t)$  แสดงดังสมการที่ (4.7) ดังนี้

$$\begin{cases} I_{CPL} = u(t)I_L \\ V_{in} = u(t)V_{dc} \end{cases} \quad (4.7)$$

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลอย่างง่ายในรูปที่ 4.3 สามารถวิเคราะห์ด้วยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ ด้วยสมการที่ (4.6) และ (4.7) ซึ่งมีสมการเชิงอนุพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาแสดงดังสมการที่ (4.8) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}}V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}}V_{sd} \\ \dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}}I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}}V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}}V_{sq} \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}}I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}}I_{dc} \\ \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}}I_{qs} \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}}V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}}I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}}V_{dc} + \frac{r_c u(t)}{L_{dc}}I_L \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}}I_{dc} - \frac{u(t)}{C_{dc}}I_L \\ \dot{I}_L = \frac{u(t)}{L}V_{dc} - \frac{1}{L}V_o \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C}I_L - \frac{1}{RC}V_o \end{cases} \quad (4.8)$$

จากบทที่ 3 สำหรับการวิเคราะห์สมการเชิงอนุพันธ์ในส่วนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ผลของสัญญาณการสวิตช์ได้ถูกกำจัดทิ้งโดยวิธีดีคิว อย่างไรก็ตาม แบบจำลองที่ได้ในสมการที่ (4.8) ยังขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจากผลการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักค์ ซึ่งในที่นี้คือ  $u(t)$  เราได้จากสมการที่ (4.8) ดังนั้น จึงได้นำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาใช้ร่วมกับแบบจำลองที่ได้จากวิธีดีคิว สำหรับการกำจัดผลการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักค์ เพื่อให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งตัวแปรสถานะของแบบจำลองในสมการที่ (4.8) สามารถเขียนเป็นสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $I_{ds}$ ,  $I_{qs}$ ,  $V_{bus,d}$ ,  $V_{bus,q}$ ,  $I_{dc}$ ,  $V_{dc}$ ,  $I_L$  และ  $V_o$  โดยเลือกใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ หรือไม่คิดผลของการสั้นไปกวของสัญญาณ ซึ่งสามารถกำหนดตัวแปรสถานะทั้ง 8 ตัวแปร แสดงดังสมการที่ (4.9) ดังนี้

$$\begin{cases} \langle I_{ds} \rangle_0 = I_{ds} \\ \langle I_{qs} \rangle_0 = I_{qs} \\ \langle V_{bus,d} \rangle_0 = V_{bus,d} \\ \langle V_{bus,q} \rangle_0 = V_{bus,q} \\ \langle I_{dc} \rangle_0 = I_{dc} \\ \langle V_{dc} \rangle_0 = V_{dc} \\ \langle I_L \rangle_0 = I_L \\ \langle V_o \rangle_0 = V_o \end{cases} \quad (4.9)$$

ใช้สมการที่ (4.2) เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันในสมการที่ (4.6) ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์สำหรับการประมาณค่าอันดับศูนย์ ซึ่งรายละเอียดการพิสูจน์แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก } \langle x \rangle_k(t) &= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \\ \langle u \rangle_o &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} 1 \cdot e^0 dt \\ \langle u \rangle_o &= \frac{1}{T_s} [t]_{t=0}^{t=T_s} \\ \langle u \rangle_o &= \frac{1}{T_s} \cdot dT_s \end{aligned}$$

จะได้สัมประสิทธิ์การประมาณค่าอันดับศูนย์ของสัญญาณการสวิตช์แสดงดังสมการที่ (4.10) ดังนี้

$$\langle u \rangle_o = d \quad (4.10)$$

โดยที่  $d$  คือ วัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักก์

ดังนั้น นำสมการที่ (4.3) – (4.5) มาประยุกต์กับสมการเชิงอนุพันธ์ที่ (4.8) จะได้แบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 4.3 ที่ใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งรายละเอียดการพิสูจน์แสดงได้ดังนี้

จากสมการที่ (4.8) สามารถใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะหาแบบจำลอง คือการใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $I_{ds}$  เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง โดยที่เลือกใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ แสดงได้ดังนี้

$$\left\langle \dot{I}_{ds} \right\rangle_0 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} \langle I_{ds} \rangle_0 + \omega \langle I_{qs} \rangle_0 - \frac{1}{L_{eq}} \langle V_{bus,d} \rangle_0 + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd}$$

จากสมการที่ (4.9) สามารถแทน  $\langle I_{ds} \rangle_0 = I_{ds}$ ,  $\langle I_{qs} \rangle_0 = I_{qs}$  และ  $\langle V_{bus,d} \rangle_0 = V_{bus,d}$  จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาแสดงดังสมการที่ (4.11) ดังนี้

$$\dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \quad (4.11)$$

จากสมการที่ (4.8) ใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $I_{qs}$  เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตแสดงดังสมการที่ (4.12) ดังนี้

$$\begin{cases} \left\langle \dot{I}_{qs} \right\rangle_0 = -\omega \langle I_{ds} \rangle_0 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} \langle I_{qs} \rangle_0 - \frac{1}{L_{eq}} \langle V_{bus,q} \rangle_0 + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\ \dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \end{cases} \quad (4.12)$$

จากสมการที่ (4.8) ใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $V_{bus,d}$  เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตแสดงดังสมการที่ (4.13) ดังนี้

$$\begin{cases} \left\langle \dot{V}_{bus,d} \right\rangle_0 = \frac{1}{C_{eq}} \langle I_{ds} \rangle_0 + \omega \langle V_{bus,q} \rangle_0 - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} \langle I_{dc} \rangle_0 \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \end{cases} \quad (4.13)$$

จากสมการที่ (4.8) ใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $V_{bus,q}$  เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตแสดงดังสมการที่ (4.14) ดังนี้

$$\begin{cases} \left\langle \dot{V}_{bus,q} \right\rangle_0 = -\omega \langle V_{bus,d} \rangle_0 + \frac{1}{C_{eq}} \langle I_{qs} \rangle_0 \\ \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \end{cases} \quad (4.14)$$

จากสมการที่ (4.8) ใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $I_{dc}$  เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตแสดงดังสมการที่ (4.15) ดังนี้

$$\begin{cases} \left\langle \dot{I}_{dc} \right\rangle_0 = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \langle V_{bus,d} \rangle_0 - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} \langle I_{dc} \rangle_0 - \frac{1}{L_{dc}} \langle V_{dc} \rangle_0 + \frac{r_c \langle u(t) \rangle_0}{L_{dc}} \langle I_L \rangle_0 \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_c d}{L_{dc}} I_L \end{cases} \quad (4.15)$$

จากสมการที่ (4.8) ใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $V_{dc}$  เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตแสดงดังสมการที่ (4.16) ดังนี้

$$\begin{cases} \left\langle \dot{V}_{dc} \right\rangle_0 = \frac{1}{C_{dc}} \langle I_{dc} \rangle_0 - \frac{d}{C_{dc}} \langle I_L \rangle_0 \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{d}{C_{dc}} I_L \end{cases} \quad (4.16)$$

จากสมการที่ (4.8) ใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $I_L$  เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตแสดงดังสมการที่ (4.17) ดังนี้

$$\begin{cases} \left\langle \dot{I}_L \right\rangle_0 = \frac{\langle u(t) \rangle_0}{L} \langle V_{dc} \rangle_0 - \frac{1}{L} \langle V_o \rangle_0 \\ \dot{I}_L = \frac{d}{L} V_{dc} - \frac{1}{L} V_o \end{cases} \quad (4.17)$$

จากสมการที่ (4.8) ใช้สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $I_L$  เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตแสดงดังสมการที่ (4.18) ดังนี้

$$\begin{cases} \langle \dot{V}_o \rangle_0 = \frac{1}{C} \langle I_L \rangle_0 - \frac{1}{RC} \langle V_o \rangle_0 \\ \dot{I}_L = \frac{d}{L} V_{dc} - \frac{1}{L} V_o \end{cases} \quad (4.18)$$

จากสมการที่ (4.11) – (4.18) สามารถเขียนสมการเป็นแบบจำลองปริภูมิสถานะแสดงดังสมการที่ (4.19) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u} \end{cases} \quad (4.19)$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ คือ  $\mathbf{x} = [I_{ds} \quad I_{qs} \quad V_{bus,d} \quad V_{bus,q} \quad I_{dc} \quad V_{dc} \quad I_L \quad V_o]^T$

อินพุต คือ  $\mathbf{u} = [V_m]$

เอาต์พุต คือ  $\mathbf{y} = [I_{dc} \quad V_{dc} \quad I_L \quad V_o]^T$

- รายละเอียดของ  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  และ  $\mathbf{D}$  แสดงดังสมการที่ (4.20) ดังนี้

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



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

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

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{4 \times 1}$$

(4.20)

#### 4.2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ในสมการที่ (4.19) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 4.1 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB คูได้จากภาคผนวก ข.2 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

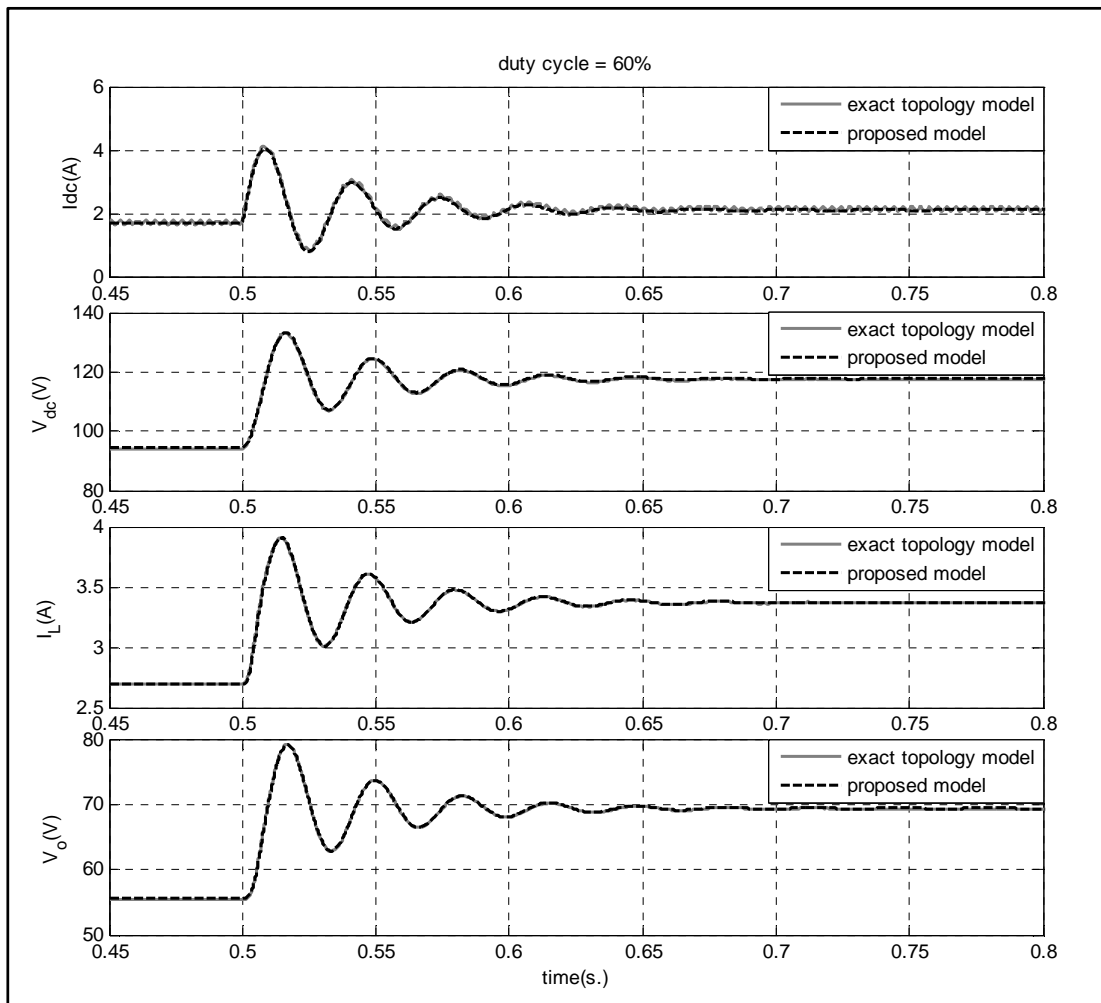
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_s$	50 V <sub>rms/phase</sub>	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
$\omega$	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
$R_{eq}$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานของสายส่ง
$L_{eq}$	24 $\mu$ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
$C_{eq}$	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง

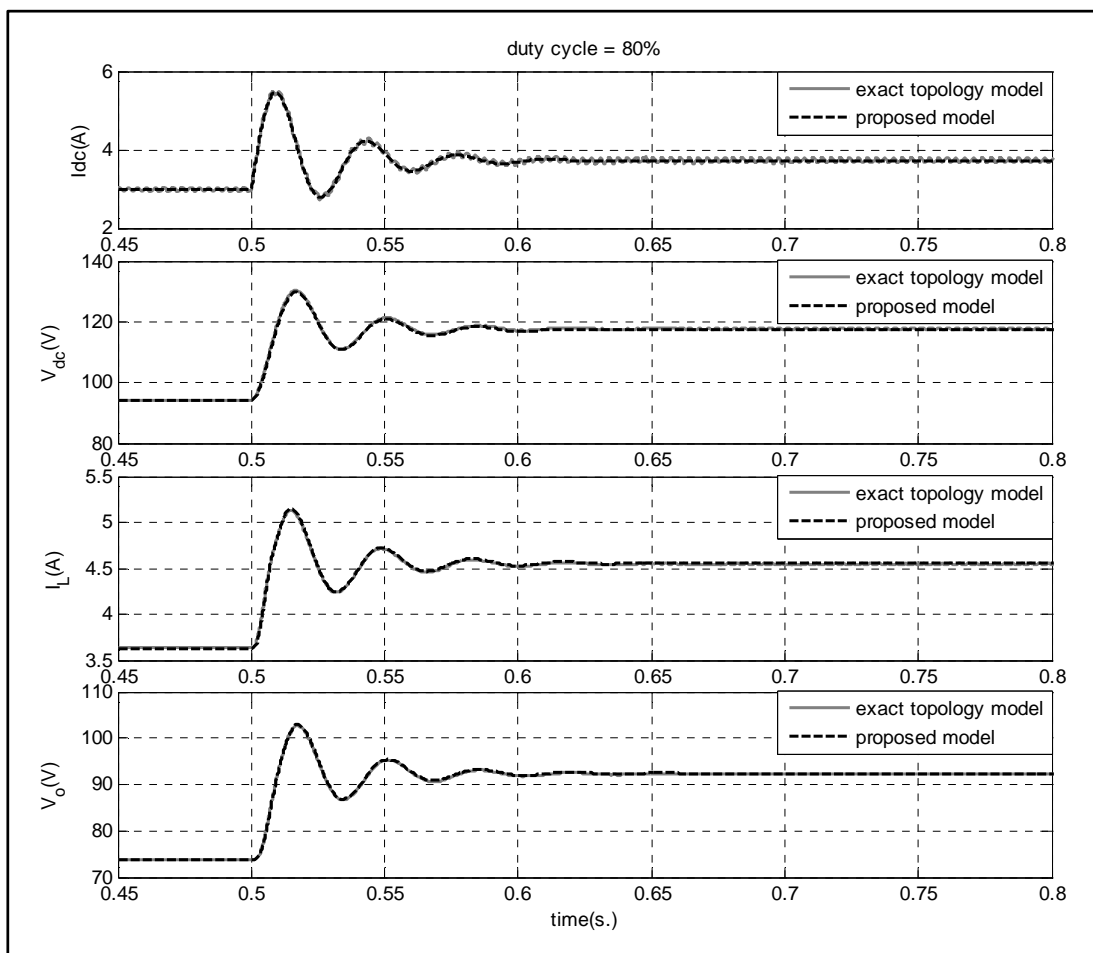
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$r_L$	0.01 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
$L_{dc} (\Delta I_{dc} \leq 1.5 \text{ A})$	50 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$C_{dc} (\Delta V_{dc} \leq 30 \text{ V})$	500 $\mu\text{F}$	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$r_c$	0.4 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ
$L (\Delta I_{dc} \leq 0.1 \text{ A})$	15 mH	ความเหนี่ยวนำของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักค์
$C (\Delta V_{dc} \leq 10 \text{ mV})$	125 $\mu\text{F}$	ความจุไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักค์
$R$	20 $\Omega$	ความต้านทานของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักค์

รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงผลการตอบสนองของ  $I_{dc}$ ,  $V_{dc}$ ,  $I_L$  และ  $V_o$  สำหรับการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการพิสูจน์ด้วยดิฟเฟอเรนเชียลและค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในสมการที่ (4.19) และรูปสัญญาณของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK โดยผลการตรวจสอบความถูกต้องได้มีการเปลี่ยนค่าของแรงดันอินพุตจาก 40  $V_{rms}$  ไปเป็น 50  $V_{rms}$  ที่เวลา 0.5 วินาที ซึ่งในรูปที่ 4.5 ได้ปรับค่า  $d = 60\%$  และรูปที่ 4.6 ปรับค่า  $d = 80\%$  โดยที่  $d$  คือ วัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักค์



รูปที่ 4.5 ผลการตอบสนอง เมื่อ วัฏจักรหน้าที่ = 60 %



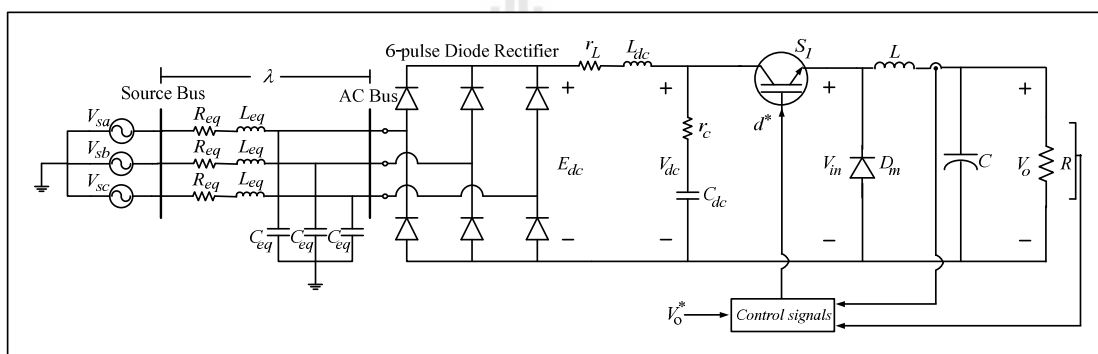
รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนอง เมื่อ วัฏจักรหน้าที = 80 %

จากผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณสำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 4.5 และ 4.6 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว ดังนั้น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธีการร่วมกันระหว่างดิควและค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ถือเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้อง แม่นยำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุม ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะได้รับการนำเสนอต่อไปในหัวข้อที่ 4.3

### 4.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม

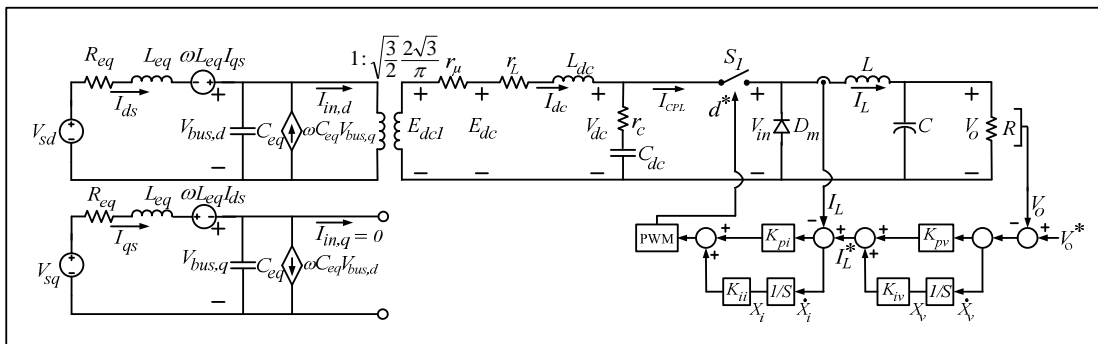
#### 4.3.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบ

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 4.7 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณคี่ซีที่เชื่อมต่อกับโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ซึ่งตัวควบคุมของโหลดวงจรดังกล่าว จะทำหน้าที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ  $L$  และแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) ที่ตกคร่อมของโหลดความต้านทาน  $R$  ให้คงที่ได้ด้วยการปรับแรงดันจาก  $V_o^*$



รูปที่ 4.7 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.7 พิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์สามารถแปลงวงจรให้อยู่ในรูปบนแกนหมุนดีคิว โดยอาศัยการพิสูจน์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกันในหัวข้อที่ผ่านมาและ กำหนดมุมเฟสการหมุนของสัญญาณการสวิตช์ ( $\phi = \phi$ ) ดังนั้น จะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 4.8 ดังนี้



รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลบนแกนหมุนดีคิว เมื่อ กำหนด  $\phi = \phi$

พิจารณาจากวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมในรูปที่ 4.8 เป็นตัวควบคุมแบบฟีดแบ็ก โดยโครงสร้างภายในของตัวควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ลูป คือ ลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นลูปภายใน และลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นลูปภายนอก ซึ่งมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คือ  $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ,  $K_{pi}$ , และ  $K_{ii}$  ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างระบบควบคุมในรูปที่ 4.8 สามารถเขียนสมการของตัวควบคุมแบบฟีดแบ็กให้อยู่ในรูปของ  $d^*$  แสดงดังสมการที่ (4.21) ดังนี้

$$d^* = -K_{pi}I_L - K_{pv}K_{pi}V_o + K_{iv}K_{pi}X_v + K_{ii}X_i + K_{pv}K_{pi}V_o^* \tag{4.21}$$

พิจารณาจากตัวควบคุมแบบฟีดแบ็ก จะเห็นได้ว่า  $x_v$  ของลูปแรงดัน และ  $x_i$  ของลูปกระแส จะกำหนดให้เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อย่างไรก็ตาม เมื่อวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดำเนินการได้โดยการแทนค่า  $d$  ในสมการที่ (4.15) – (4.18) ด้วย  $d^*$  จากสมการที่ (4.21) ดังนั้น จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 4.7 ที่ได้จากการพิสูจน์ด้วยวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ (4.22) ดังนี้

$$\begin{cases}
\dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
\dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
\dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\
\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c K_{pi}}{L_{dc}} I_L^2 \\
\quad - \frac{r_c K_{pv} K_{pi}}{L_{dc}} I_L V_o + \frac{r_c K_{iv} K_{pi}}{L_{dc}} I_L X_v + \frac{r_c K_{ii}}{L_{dc}} I_L X_i + \frac{r_c K_{pv} K_{pi}}{L_{dc}} I_L V_o^* \\
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi}}{C_{dc}} I_L^2 + \frac{K_{pv} K_{pi}}{C_{dc}} I_L V_o - \frac{K_{iv} K_{pi}}{C_{dc}} I_L X_v - \frac{K_{ii}}{C_{dc}} I_L X_i - \frac{K_{pv} K_{pi}}{C_{dc}} I_L V_o^* \\
\dot{I}_L = -\frac{K_{pi}}{L} V_{dc} I_L - \frac{K_{pv} K_{pi}}{L} V_{dc} V_o - \frac{V_o}{L} + \frac{K_{iv} K_{pi}}{L} V_{dc} X_v + \frac{K_{ii}}{L} V_{dc} X_i + \frac{K_{pv} K_{pi}}{L} V_{dc} V_o^* \\
\dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\
\dot{X}_v = -V_o + V_o^* \\
\dot{X}_i = -I_L - K_{pv} V_o + K_{iv} X_v + K_{pv} V_o^*
\end{cases} \quad (4.22)$$

จากสมการที่ (4.22) สังเกตได้ว่าเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อพิจารณา ระบบที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักกัที่มีตัวควบคุม แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบที่ได้รับการอธิบายไว้ในสมการที่ (4.11) – (4.18) ได้ถูกนำมาใช้เป็นสมการที่ (4.22) โดยมีพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบพีไอ นอกจากนี้ยังมีตัวแปรสถานะ  $x_v$  และ  $x_i$  ที่เพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง

การทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นสามารถนำแบบจำลองเชิงเส้นมาใช้ในการออกแบบระบบตัวควบคุมผ่านทางทฤษฎีการควบคุมแบบเชิงเส้น นอกจากนี้แบบจำลองเชิงเส้นสามารถนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กระบบไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งโหลดกำลังไฟฟ้าแบบอุดมคติ (Areerak, et al., 2008) ภายใต้สมมติฐานที่ว่า จุดระบบการทำงานจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น แบบจำลองในสมการที่ (4.22) สามารถใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับ 1 ซึ่งรายละเอียดของการทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้น จะได้รับการเสนอในหัวข้อที่ 4.3.2

### 4.3.2 การทำให้เป็นเชิงเส้น

จากสมการที่ (4.22) สามารถทำแบบจำลองเชิงเส้นได้ โดยอาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์ อันดับ 1 ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ได้แสดงดังสมการที่ (4.23) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{\delta \mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (4.23)$$

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

รายละเอียดของ  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ,  $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ,  $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ , และ  $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  แสดงดังสมการที่ (4.24) ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} & 0 & \frac{(r_u + r_L + r_c)}{L_{dc}} \frac{1}{L_{dc}} a(5,7) & -\frac{r_c K_{pv} K_{pi} I_{L,o}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{iv} K_{pi} I_{L,o}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{ii} I_{L,o}}{L_{dc}} q \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & a(6,7) & \frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,o}}{C_{dc}} & -\frac{K_{iv} K_{pi} I_{L,o}}{C_{dc}} & -\frac{K_{ii} I_{L,o}}{C_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & -\frac{K_{pi} V_{dc,o}}{L} & -\frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc,o}}{L} + 1 & \frac{K_{iv} K_{pi} V_{dc,o}}{L} & \frac{K_{ii} V_{dc,o}}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{C} & -\frac{L}{RC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv} & -K_{iv} & 0 \end{bmatrix} \quad 10 \times 10$$

$$a(5,7) = -\frac{2r_c K_{pi} I_{L,o}}{L_{dc}} - \frac{r_c K_{pv} K_{pi} V_{o,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{iv} K_{pi} X_{v,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{ii} X_{i,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{pv} K_{pi} V_{o,o}^*}{L_{dc}}$$

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

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





$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{1}{3} \left( \frac{V_o^{*2}}{R} + P_{loss} \right) \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (4.26)$$

เมื่อ  $V_o^*$  คือ แรงดันเอาต์พุตที่กำหนด และ  $P_{loss}$  คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจาก  $r_L$   $Q_{bus}$  ถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ เนื่องจากการสมมติฐานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสพิจารณากระแสอินพุต ( $I_{in,abc}$ ) ที่มีเฟสเดียวกันกับแรงดันอินพุต ( $V_{bus,abc}$ )

จากสมการที่ (4.25) สามารถเขียนโปรแกรมการคำนวณค่า  $V_{bus,o}$  และ  $\lambda_o$  ที่สภาวะคงตัวด้วยวิธีทางคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราฟสัน ดูได้จาก ภาคผนวก ก.2 ดังนั้น  $V_{dc,o}$ ,  $V_{o,o}$ ,  $I_{L,o}$ ,  $X_{V,o}$  และ  $X_{i,o}$  สำหรับแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4.23) สามารถคำนวณได้จากค่า  $V_{bus,o}$  และ  $\lambda_o$  โดยอาศัยสมการที่ (4.27) ดังนี้

$$\begin{cases} V_{dc,o} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{bus,o}) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,o} - r_L I_{dc,o} \\ V_{o,o} = V_o^* \\ I_{L,o} = \frac{V_{o,o}}{R} \\ X_{V,o} = \frac{I_{L,o}}{K_{iv}} \\ X_{i,o} = \frac{V_o}{K_{ii}V_{dc,o}} \end{cases} \quad (4.27)$$

โดยที่

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

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

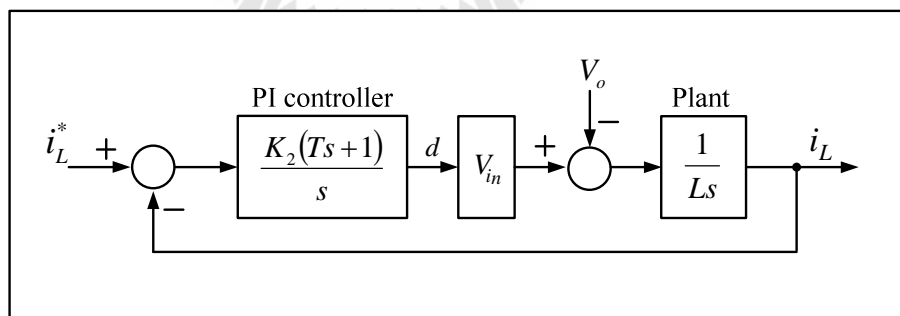
จากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4.23) และการคำนวณค่าในสถานะคงตัวในสมการที่ (4.27) สังเกตได้ว่า สมการดังกล่าวมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ ดังนั้น การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักค์ จึงมีความจำเป็นเพื่อให้ผลการตอบสนองของการควบคุมแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) มีผลการตอบสนองที่ดี ซึ่งรายละเอียดการออกแบบตัวควบคุมจะได้รับการอธิบายในหัวข้อที่ 4.3.4

#### 4.3.4 การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักค์

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักค์ ได้อาศัยวิธีการแบบดั้งเดิมของระบบควบคุม (Tsang and Chan, 2005) เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลการตอบสนองที่ดีและมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน โดยการออกแบบตัวควบคุมจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบตัวควบคุมลูปกระแสไฟฟ้า และการออกแบบตัวควบคุมลูปแรงดันไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะได้รับนำเสนอดังต่อไปนี้

- การออกแบบตัวควบคุมลูปกระแสไฟฟ้า
- แผนภาพของลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าของระบบในรูปที่ 4.7 แสดงดังรูปที่ 4.9

ดังนี้



รูปที่ 4.9 ลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.9  $K_2$  และ  $T$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมลูปกระแสไฟฟ้า ในขณะที่  $L$  คือ ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักค์ ดังนั้นจากรูปที่ 4.9 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของลูปกระแสไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (4.28) ดังนี้

$$\frac{I_L}{I_L^*} = \frac{K_2 V_{in} (Ts + 1)}{Ls^2 + K_2 T V_{in} s + K_2 V_{in}} \quad (4.28)$$

สำหรับระบบมาตรฐานอันดับ 2 ของระบบควบคุมแบบวงปิด มีฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงดังสมการที่ (4.29) ดังนี้

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.29)$$

ดังนั้น ตัวควบคุมลูกระแส สามารถออกแบบด้วยการเปรียบเทียบระหว่างตัวหารของสมการที่ (4.28) และ (4.29) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังสมการที่ (4.30) และ (4.31) ดังนี้

$$T = \frac{2\zeta_i}{N\omega_{nv}} \quad (4.30)$$

$$\omega_{ni} = N\omega_{nv} = \sqrt{\frac{K_2 V_{in}}{L}}, \quad N > 4 \quad (4.31)$$

จากสมการที่ (4.31) สามารถหาค่า  $K_2$  แสดงดังสมการที่ (4.32) ดังนี้

$$K_2 = \frac{\omega_{ni}^2 L}{V_{in}} \quad (4.32)$$

จากรูปที่ 4.9 สามารถเขียนตัวควบคุมแบบพีไอให้อยู่ในรูปตามสมการที่ (4.33) ดังนี้

$$K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} = \frac{K_2 (Ts + 1)}{s} \quad (4.33)$$

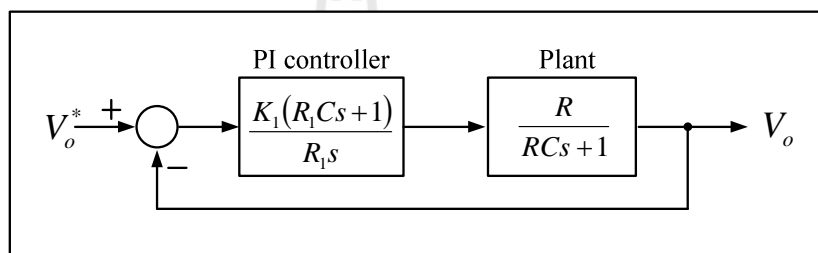
จากสมการที่ (4.30), (4.32) และ (4.33) สามารถเขียนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ( $K_{pi}$  และ  $K_{ii}$ ) สำหรับลูกระแสไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (4.34) และ (4.35) ดังนี้

$$K_{pi} = \frac{2N\zeta_i\omega_{nv}L}{V_{in}} \quad (4.34)$$

$$K_{ii} = \frac{N^2\omega_{nv}^2L}{V_{in}} \quad (4.35)$$

ดังนี้

- การออกแบบตัวควบคุมลูบแรงดันไฟฟ้า  
แผนภาพของลูบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบในรูปที่ 4.7 แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ลูบการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.10  $K_1$  และ  $R_1$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมลูบแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่  $R$  และ  $C$  คือ ความจุไฟฟ้าและความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบักค้ ตามลำดับ ดังนั้นสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของลูบแรงดันไฟฟ้าแสดงสมการที่ (4.36) ดังนี้

$$\frac{V_o(s)}{V_o^*(s)} = \frac{K_1R_1RCs + K_1R}{R_1RCs^2 + (R_1 + K_1R_1RC)s + K_1R} \quad (4.36)$$

ดังนั้น ตัวควบคุมลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า สามารถออกแบบด้วยการเปรียบเทียบระหว่างตัวหารของสมการที่ (4.29) และ (4.36) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังสมการที่ (4.37) และ (4.38) ดังนี้

$$\omega_{nv} = \sqrt{\frac{K_1}{R_1 C}} \quad (4.37)$$

$$2\zeta_v \omega_{nv} = \frac{1}{RC} + K_1 \quad (4.38)$$

จากสมการที่ (4.38) จะกำหนดให้  $R = R_1$  และ  $\zeta_v = 1$  สำหรับการตอบสนองแบบหน่วงวิกฤต (Tsang and Chan, 2005) แสดงดังสมการที่ (4.39) ดังนี้

$$2\omega_{nv} = \frac{1}{R_1 C} + K_1 \quad (4.39)$$

จากสมการที่ (4.37) และ (4.39) สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมลูบแรงดันไฟฟ้า  $K_1$  ซึ่งแสดงดังสมการที่ (4.40) ดังนี้

$$K_1 = \frac{1}{R_1 C} \quad (4.40)$$

ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบตัวควบคุม ความกว้างแถบ (Bandwidth) ของลูบแรงดันไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ (4.41) ดังนี้

$$\omega_{nv} = \frac{1}{R_1 C} \quad (4.41)$$

จากรูปที่ 4.9 สามารถเขียนตัวควบคุมแบบพีไอให้อยู่ในรูปตามสมการที่ (4.42) ดังนี้

$$K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} = \frac{K_1(R_1 C s + 1)}{R_1 s} \quad (4.42)$$

จากสมการที่ (4.40) และ (4.42) สามารถเขียนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ( $K_{pv}$  และ  $K_{iv}$ ) แสดงดังสมการที่ (4.43) และ (4.44) ดังนี้

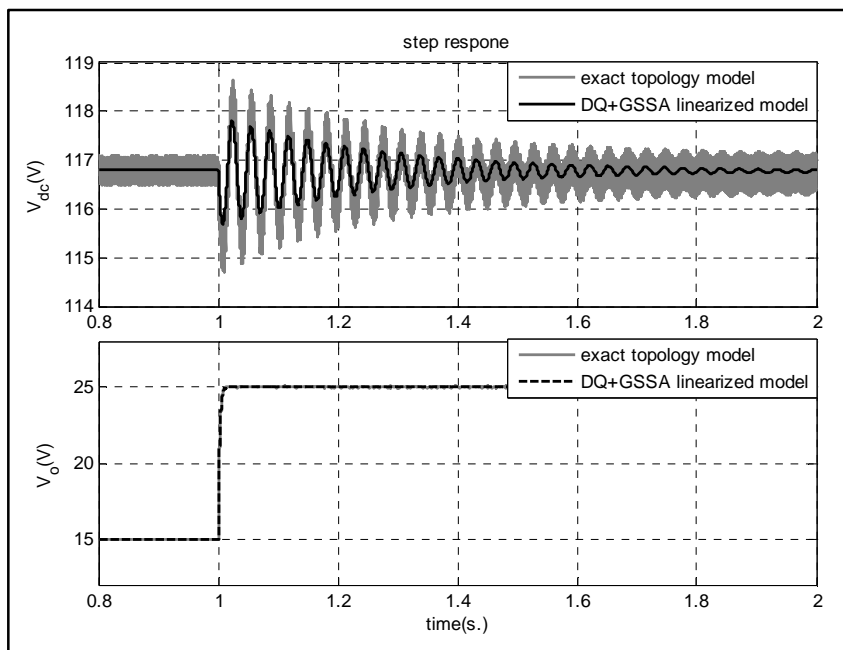
$$K_{pv} = K_1 C = \frac{1}{R_1} \quad (4.43)$$

$$K_{iv} = \frac{K_1}{R_1} = \frac{1}{R_1^2 C} \quad (4.44)$$

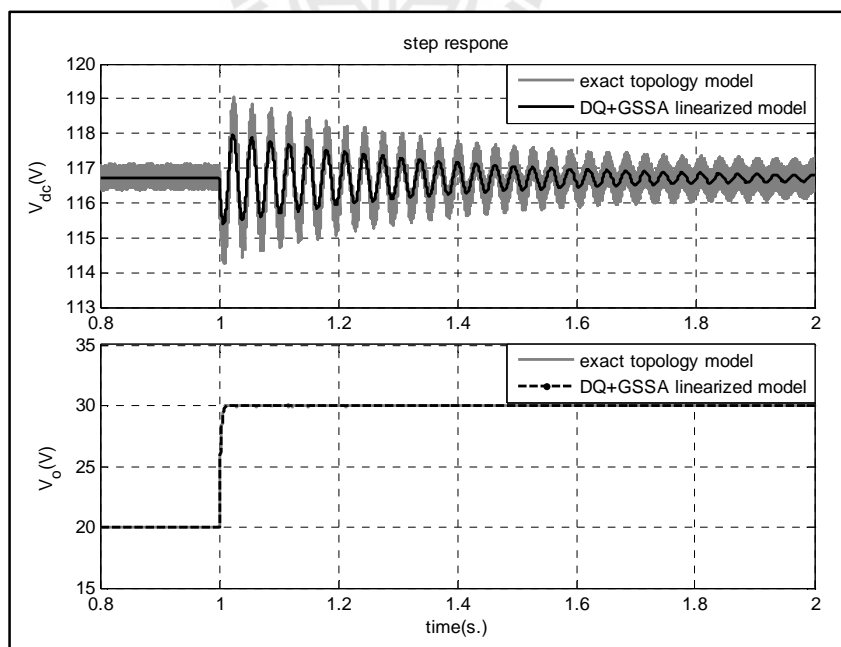
ตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คของรูปกระแสไฟฟ้าและรูปแรงดันไฟฟ้า สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (4.34), (4.35), (4.43) และ (4.44) ตามลำดับ ซึ่งสมการของตัวควบคุมดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบ คือ อัตราส่วนการหน่วงของรูปแรงดันไฟฟ้า ( $\zeta_v$ ) และรูปกระแสไฟฟ้า ( $\zeta_i$ ), ความกว้างแถบของรูปแรงดันไฟฟ้า ( $\omega_{nv}$ ) และรูปกระแสไฟฟ้า ( $\omega_{ni}$ ) ตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คสำหรับวิธีแบบดั้งเดิมในหัวข้อนี้ สามารถออกแบบได้โดยการเลือก  $\zeta_v = 1$ ,  $\zeta_i = 0.7$ ,  $\omega_{nv} = 2\pi \times 400$  rad/s และ  $\omega_{ni} = 2\pi \times 4000$  rad/s ดังนั้น พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม คือ  $K_{pv} = 0.05$ ,  $K_{iv} = 20$ ,  $K_{pi} = 0.6819$  และ  $K_{ii} = 1948$  เป็นต้น

#### 4.3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4.23) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ของสัญญาณขนาดเล็กแบบชั่วคราวเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 4.7 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ดูได้จากภาคผนวก ข.3 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 4.1 สำหรับรูปที่ 4.11 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) และแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัสค์ ( $V_o$ ) ที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 15 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 1 วินาที และ รูปที่ 4.12 แสดงผลการตอบสนองเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.11 โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด ( $V_o^*$ ) จาก 20 V ไปเป็น 30 V



รูปที่ 4.11 ผลการตอบสนอง  $V_{dc}$  และ  $V_o$  ของระบบ ที่มีการเปลี่ยนแปลง  $V_o^*$  จาก 15 V ไปเป็น 25 V



รูปที่ 4.12 ผลการตอบสนอง  $V_{dc}$  และ  $V_o$  ของระบบ ที่มีการเปลี่ยนแปลง  $V_o^*$  จาก 20 V ไปเป็น 30 V



จากการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณในรูปที่ 4.11 และ 4.12 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว ดังนั้น การสร้างแบบจำลองของระบบที่มีโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมด้วยวิธีดีคิว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ถือเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง แม่นยำ และสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพได้ เนื่องจากโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับโพลค้ำลังไฟฟ้าแบบอุดมคติ

#### 4.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพ

แบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมที่ได้จากสมการที่ (4.23) มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการศึกษาและการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่จ่ายโหลดให้กับโพลค้ำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้น แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4.23) ได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  ดังสมการที่ (4.45) ดังนี้

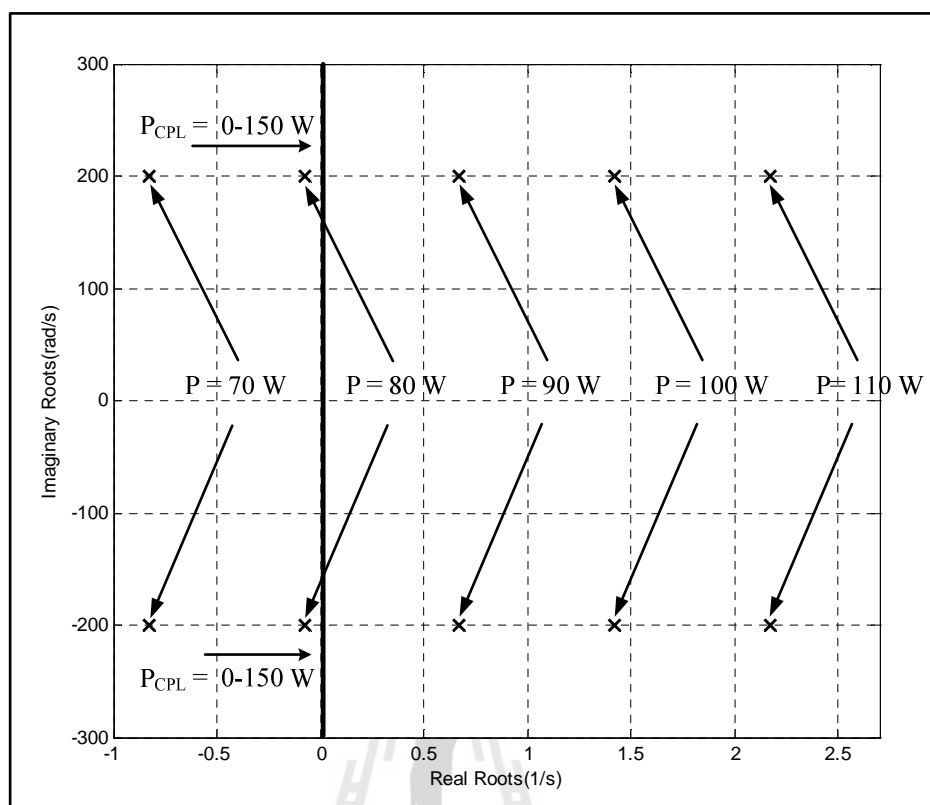
$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (4.45)$$

และถ้าระบบมีเสถียรภาพ สามารถเขียนแสดงดังสมการที่ (4.46) ดังนี้

$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (4.46)$$

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

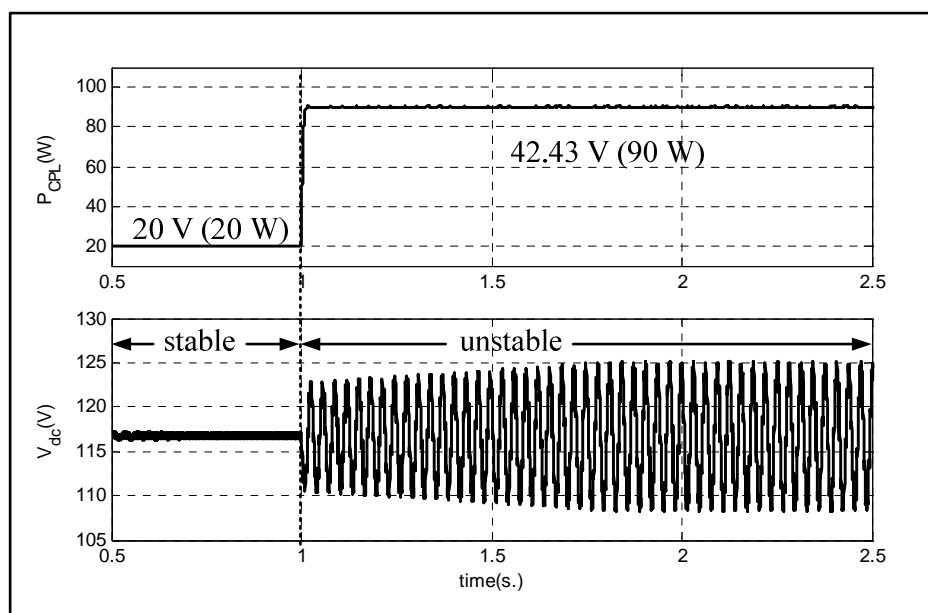
การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.7 ค่าเจาะจงที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ประกอบไปด้วย  $\lambda_1 - \lambda_{14}$  โดยค่าเจาะจงสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาเฉพาะ  $\lambda_5$  และ  $\lambda_6$  เนื่องจากเป็นค่าเจาะจงที่มีผลต่อเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 ดังนี้



รูปที่ 4.13 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากรูปที่ 4.13 เป็นการพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัวของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุม จาก 0 – 150 W ซึ่งสังเกตได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.7 สามารถเปลี่ยนไปเป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพได้ เมื่อโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัวของวงจรแปลงผันแบบบักก์ มีค่าประมาณ 90 W

การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในรูปที่ 4.14 จะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังเช่นเดียวกันกับการตรวจความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ แสดงดังรูปที่ 4.14 ดังนี้



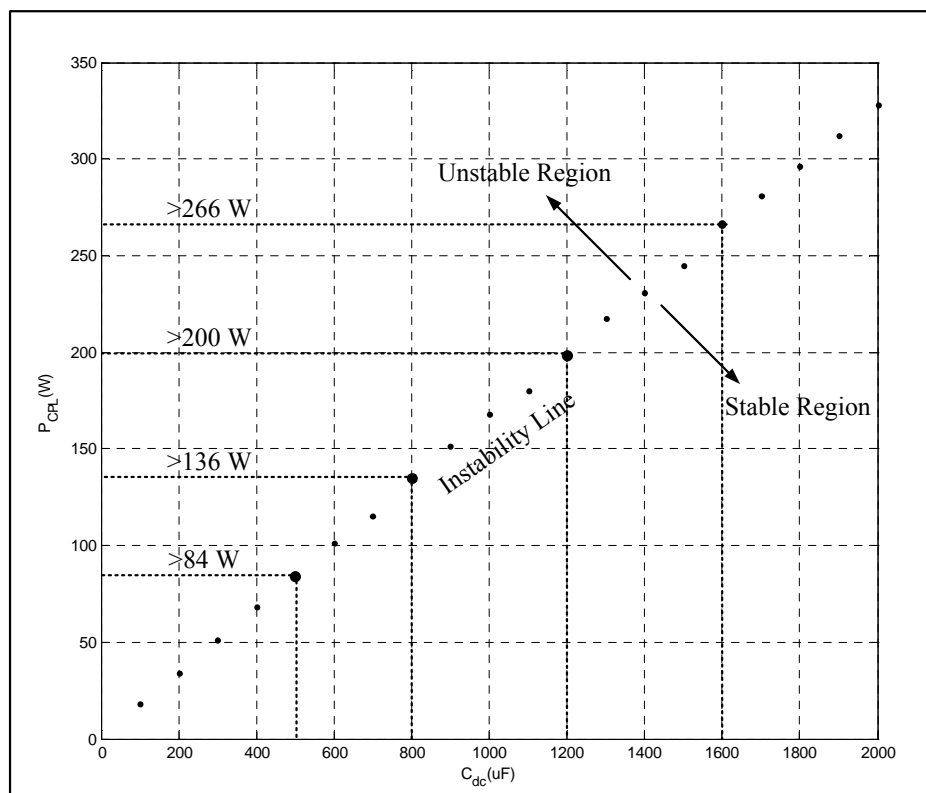
รูปที่ 4.14 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 4.14 สังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 90 W จะทำให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่เพิ่มมากขึ้น หรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ ดังนั้น แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นที่ได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาใช้ในการพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพ ซึ่งสามารถคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ นอกจากนี้ ยังได้นำทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีต่อเสถียรภาพ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.5

#### 4.5 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบ

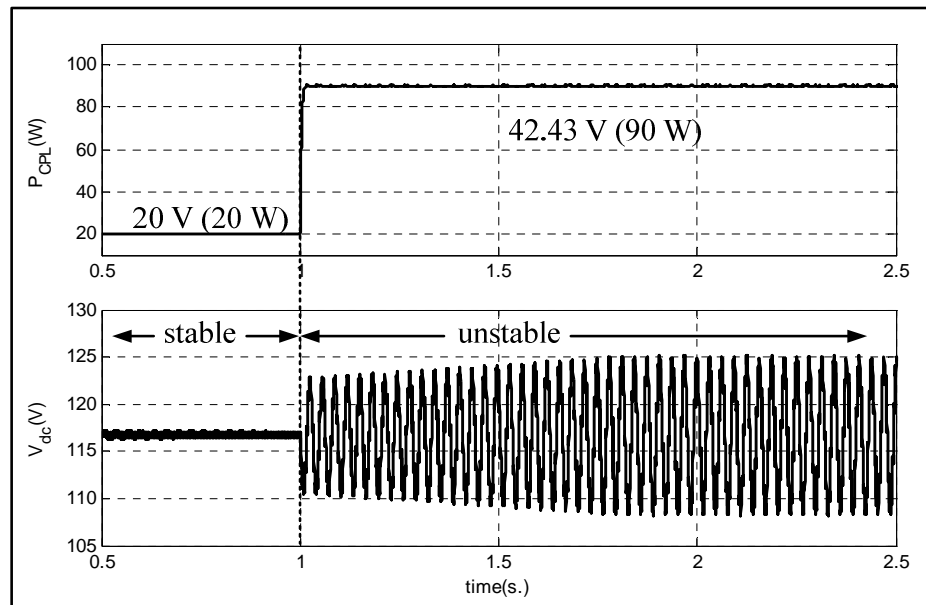
แบบจำลองเชิงพลวัตสามารถนำไปใช้สำหรับการคาดเดาการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบที่มีผลต่อเสถียรภาพได้โดยอาศัยทฤษฎีค่าเจาะจง โดยทั่วไป พารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามความยาวของสายเคเบิล ในขณะที่พารามิเตอร์ของวงจรกรองสัญญาณดีซีในที่นี้คือ  $L_{dc}$  และ  $C_{dc}$  ซึ่งจะขึ้นอยู่กับกรอกแบบด้วยวิศวกร ดังนั้น จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจสำหรับการศึกษาผลการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของวงจรกรองสัญญาณดีซีที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.15 แสดงผลการมีเสถียรภาพและการขาดเสถียรภาพที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า  $C_{dc}$  ของระบบตั้งแต่ 200 – 2000  $\mu\text{F}$  ซึ่งค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ กำหนดให้มีค่าตามตารางที่ 4.1

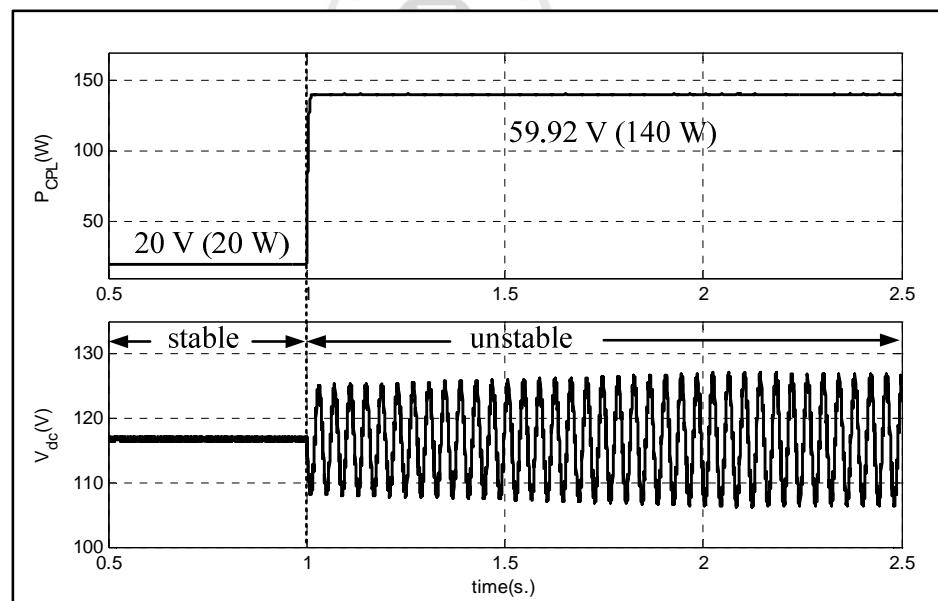


รูปที่ 4.15 ผลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $C_{dc}$  ที่มีผลต่อเสถียรภาพ

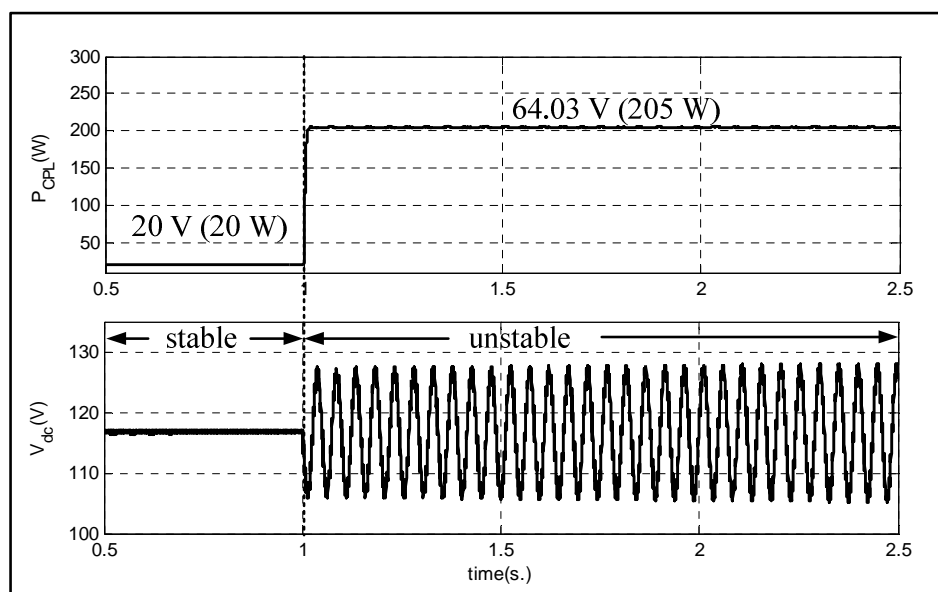
จากรูปที่ 4.15 สังเกตได้ว่าเมื่อพารามิเตอร์  $C_{dc}$  มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น และเมื่อพารามิเตอร์  $C_{dc}$  มีค่าน้อยลงจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพน้อยลงเช่นกัน สำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากรูปที่ 4.15 เมื่อ  $C_{dc}$  มีค่า 500, 800, 1200 และ 1600  $\mu\text{F}$  แสดงดังรูปที่ 4.16, 4.17, 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ



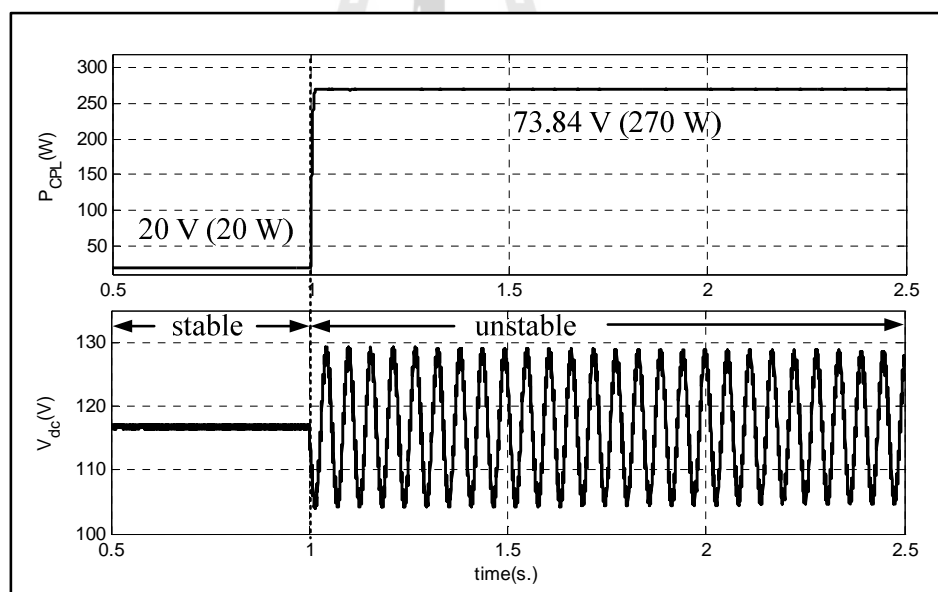
รูปที่ 4.16 ผลการขาดเสถียรภาพที่  $P_{CPL,total} = 90$  W เมื่อกำหนดให้  $C_{dc} = 500$   $\mu$ F



รูปที่ 4.17 ผลการขาดเสถียรภาพที่  $P_{CPL,total} = 140$  W เมื่อกำหนดให้  $C_{dc} = 800$   $\mu$ F



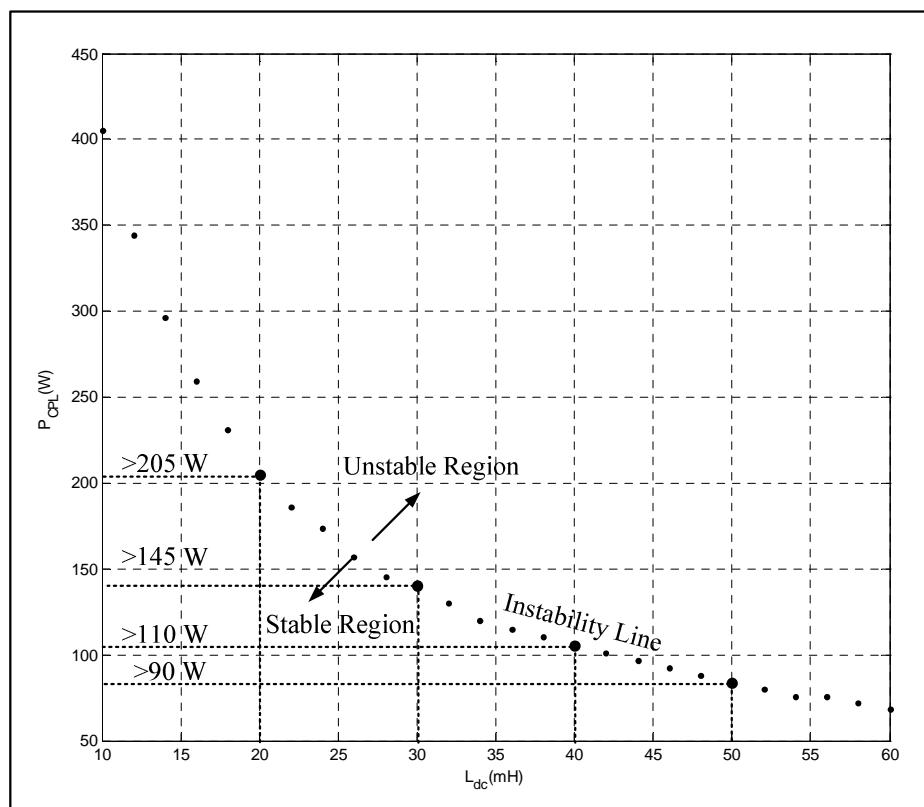
รูปที่ 4.18 ผลการขาดเสถียรภาพที่  $P_{CPL, total} = 205 \text{ W}$  เมื่อกำหนดให้  $C_{dc} = 1200 \mu\text{F}$



รูปที่ 4.19 ผลการขาดเสถียรภาพที่  $P_{CPL, total} = 270 \text{ W}$  เมื่อกำหนดให้  $C_{dc} = 1600 \mu\text{F}$

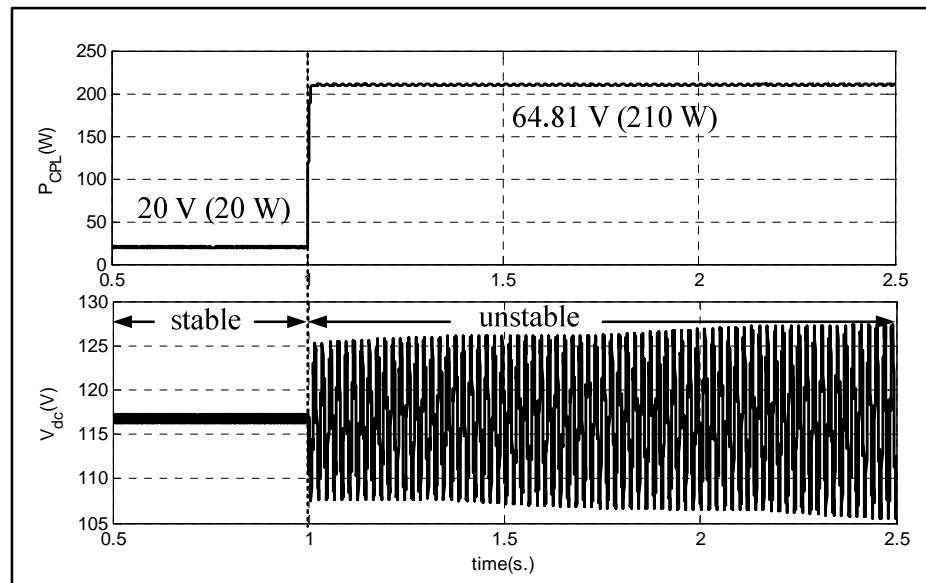
จากรูปที่ 4.16, 4.17, 4.18 และ 4.19 สังเกตได้ว่า การขึ้นขึ้นผลการคาดเดาการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า  $C_{dc}$  ของวงจรกรองสัญญาณดิซี มีความถูกต้องแม่นยำและสอดคล้องตามรูปที่ 4.15

รูปที่ 4.20 แสดงผลการมีเสถียรภาพและการขาดเสถียรภาพที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า  $L_{dc}$  ของระบบตั้งแต่ 10 – 60 mH ซึ่งค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ กำหนดให้มีค่าตามตารางที่ 4.1

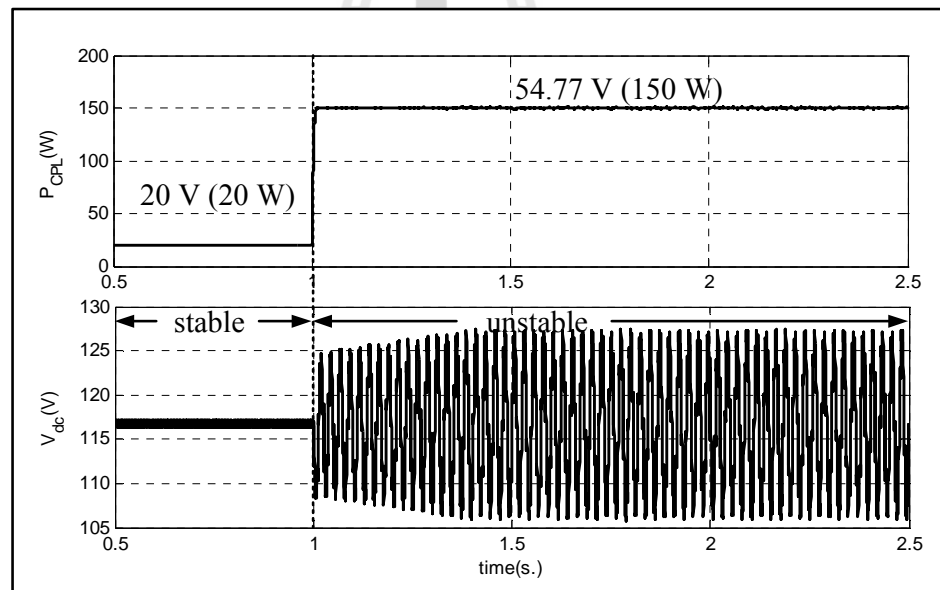


รูปที่ 4.20 ผลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $L_{dc}$  ที่มีผลต่อเสถียรภาพ

จากรูปที่ 4.20 สังเกตได้ว่าเมื่อพารามิเตอร์  $L_{dc}$  มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพน้อยลง และเมื่อพารามิเตอร์  $L_{dc}$  มีค่าน้อยลงจะทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากรูปที่ 4.20 เมื่อ  $L_{dc}$  มีค่า 20, 30, 40 และ 50 mH แสดงดังรูปที่ 4.21, 4.22, 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ

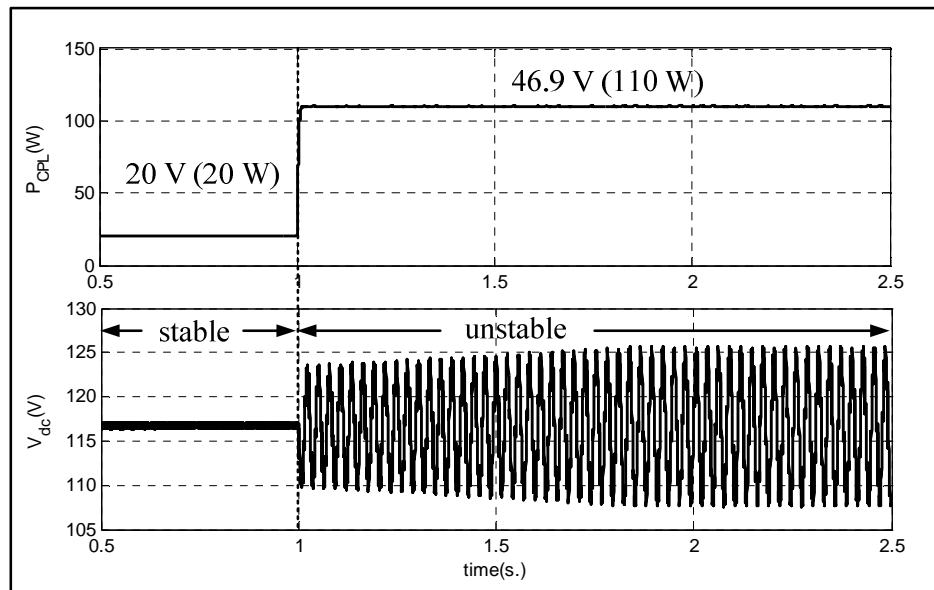


รูปที่ 4.21 ผลการขาดเสถียรภาพที่  $P_{CPL,total} = 210$  W เมื่อกำหนดให้  $L_{dc} = 20$  mH

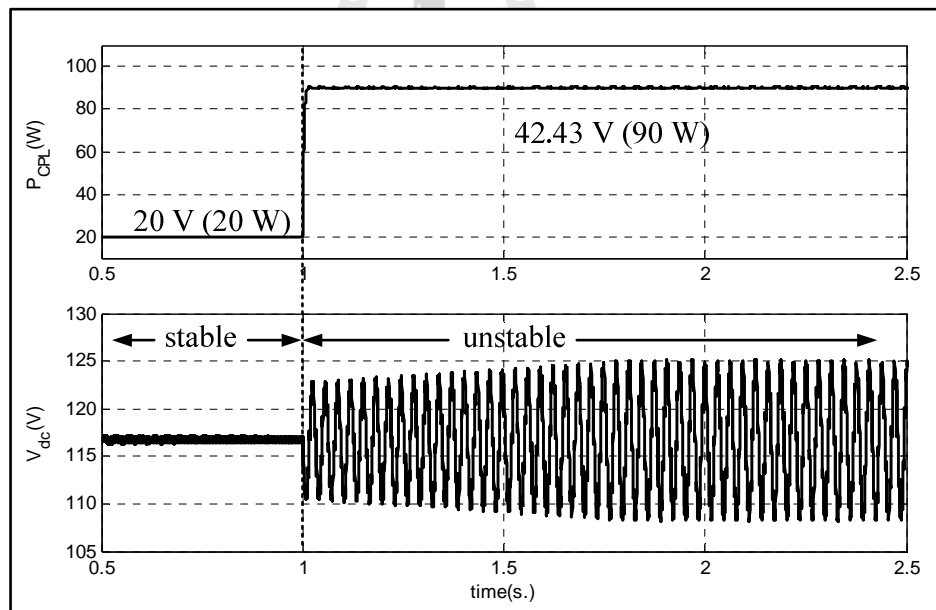


รูปที่ 4.22 ผลการขาดเสถียรภาพที่  $P_{CPL,total} = 150$  W เมื่อกำหนดให้  $L_{dc} = 30$  mH





รูปที่ 4.23 ผลการขาดเสถียรภาพที่  $P_{CPL,total} = 110$  W เมื่อกำหนดให้  $L_{dc} = 40$  mH



รูปที่ 4.24 ผลการขาดเสถียรภาพที่  $P_{CPL,total} = 90$  W เมื่อกำหนดให้  $L_{dc} = 50$  mH

จากรูปที่ 4.21, 4.22, 4.23 และ 4.24 สังเกตได้ว่า การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ  $L_{dc}$  ของวงจรกรองสัญญาณดีซี มีความถูกต้องแม่นยำและสอดคล้องตามรูปที่ 4.20

#### 4.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 นำเสนอวิธีการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมและไม่มีการควบคุม โดยใช้วิธีดีคิวสำหรับการวิเคราะห์ในส่วนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปนำไปวิเคราะห์วงจรแปลงผันแบบบัคค์ ซึ่งในขั้นต้น ผู้วิจัยได้เริ่มจากการหาแบบจำลองของระบบที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีตัวควบคุม โดยได้อธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการหาแบบจำลองไว้พอสมควร ซึ่งผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของระบบดังกล่าวถือว่าเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำ จึงได้นำมาประยุกต์กับระบบที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ แบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทอร์เลอร์อันดับ 1 และนำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีแบบดั้งเดิม จากนั้นได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วครู่ และสถานะอยู่ตัว ดังนั้น แบบจำลองของระบบถือว่าเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำไปคาดเดาการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ไว้แล้ว จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้รับการเสนอไว้ในบทนี้ สามารถคาดเดาจุดที่ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ อีกทั้งยังได้นำเสนอผลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อเสถียรภาพด้วย โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวที่นำเสนอไว้ในบทนี้ ถือเป็นองค์ความรู้ในส่วนที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีการต่อขนานของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ซึ่งจะเป็นเนื้อหาในส่วนของบทที่ 5 โดยรายละเอียดต่างๆ จะได้รับการนำเสนอต่อไป

## บทที่ 5

### วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผัน แบบบักกิ้งนานกัน

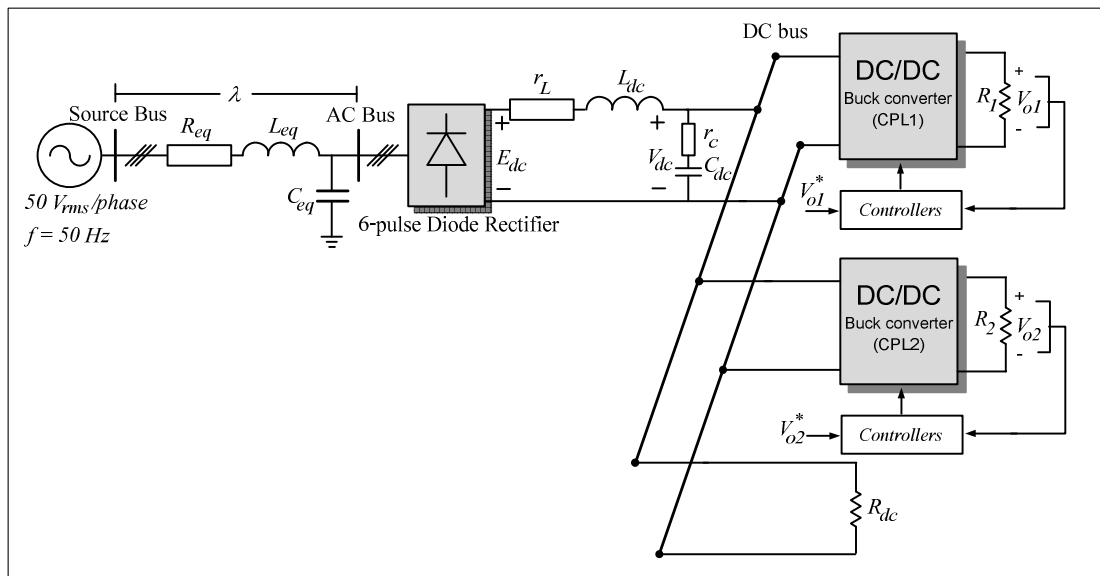
#### 5.1 บทนำ

การเพิ่มจำนวนของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีผ่านวงจรกรอง จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการขาดเสถียรภาพนั้นอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง หรือส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ ดังนั้น เนื้อหาในบทนี้ จึงนำเสนอการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งนานกัน โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งอาศัยองค์ความรู้มาจากบทที่ 4 การทำให้เป็นเชิงเส้น การคำนวณค่าในสถานะคงตัว การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ และการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการอภิปรายผล

#### 5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

##### 5.2.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและสมมติฐาน

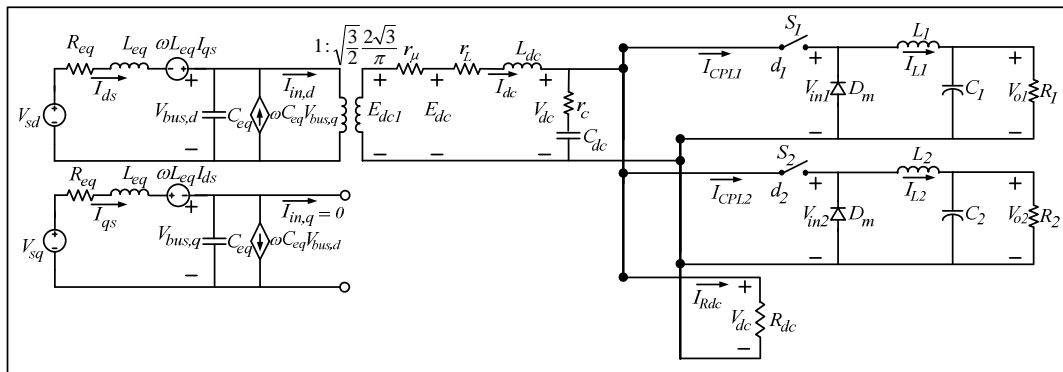
ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 5.1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซีที่เชื่อมต่อกับโหลดตัวต้านทานและโหลดวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่มีการควบคุมทั้ง 2 ชุด ซึ่งโหลดวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งที่มีการควบคุม จะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยที่สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมของโหลดตัวต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ให้คงที่ได้ด้วยการปรับแรงดันจาก  $V_{o1}^*$  และ  $V_{o2}^*$  ตามลำดับ สำหรับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรแปลงผันแบบบักกิ้ง จะพิจารณาเงื่อนไขการพิสูจน์เช่นเดียวกับเงื่อนไขที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3



รูปที่ 5.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคคั่นานกัน

### 5.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบ

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคคั่นานกัน ในรูปที่ 5.1 สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างดีคิฟและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยในส่วนแรกจะใช้วิธีดีคิฟสำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคคั่นานกัน โดยที่ไม่พิจารณาการควบคุมซึ่งสามารถแปลงวงจรให้อยู่ในรูปแบบบนแกนหมุนดีคิฟ โดยอาศัยการพิสูจน์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกับสมการที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 4 โดยสามารถกำหนดมุมเฟสการหมุนของสัญญาณการสวิตช์ ( $\phi_1 = \phi$ ) ดังนั้น จะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 5.2 ดังนี้

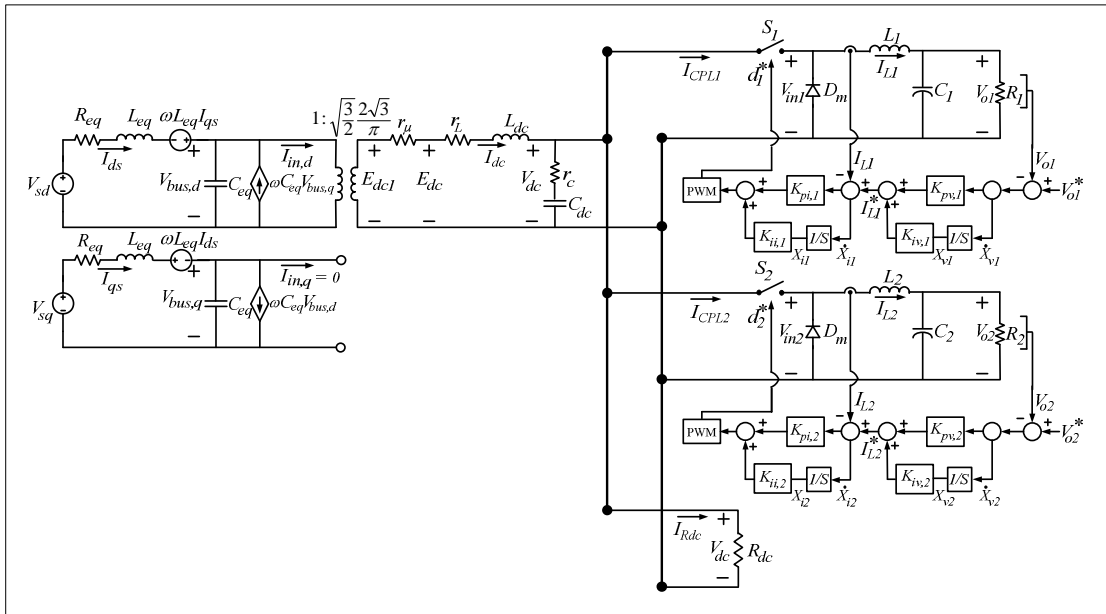


รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลบนแกนดีคิว เมื่อ กำหนด  $\phi_1 = \phi$

จากรูปที่ 5.2 พิจารณาจากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์รวมทั้งสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่ฝั่งเอซี จะถูกเปลี่ยนให้อยู่บนแกนหมุนดีคิว โดยไดโอดเรียงกระแสสามเฟสได้ถูกเปลี่ยนให้ไปเป็นรูปของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา สำหรับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้สำหรับการกำจัดสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักค์ของทั้งสองชุด ซึ่งวิธีการพิสูจน์ของวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ได้อาศัยการพิสูจน์เช่นเดียวกันในบทที่ 4 โดยแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 5.2 สามารถวิเคราะห์ด้วยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ ซึ่งมีสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาแสดงสมการที่ (5.1) ดังนี้

$$\begin{cases}
\dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
\dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
\dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\
\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \left( \frac{r_\mu + r_L + r_c}{L_{dc}} \right) I_{dc} - \left( \frac{R_{dc} - r_c}{L_{dc} R_{dc}} \right) V_{dc} + \frac{r_c d_1}{L_{dc}} I_{L1} + \frac{r_c d_1}{L_{dc}} I_{L1} \\
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{C_{dc} R_{dc}} V_{dc} - \frac{d_1}{C_{dc}} I_{L1} - \frac{d_2}{C_{dc}} I_{L2} \\
\dot{I}_{L1} = \frac{d_1}{L_1} V_{dc} - \frac{1}{L_1} V_{o1} \\
\dot{V}_{o1} = \frac{1}{C_1} I_{L1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1} \\
\dot{I}_{L2} = \frac{d_2}{L_2} V_{dc} - \frac{1}{L_2} V_{o2} \\
\dot{V}_{o2} = \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{R_2 C_2} V_{o2}
\end{cases} \quad (5.1)$$

สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้ากำลังรวมถึงพิจารณาการควบคุมของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ในรูปที่ 5.1 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมที่พิจารณาเป็นตัวควบคุมแบบพีไอ โดยแบบออกเป็น 2 ลูป คือ ลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นลูปภายใน และลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นลูปภายนอก ซึ่งมีพารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุด คือ  $K_{pv1}$ ,  $K_{iv1}$ ,  $K_{pi1}$ ,  $K_{ii1}$ ,  $K_{pv2}$ ,  $K_{iv2}$ ,  $K_{pi2}$  และ  $K_{ii2}$  ตามลำดับ โดยแสดงดังรูปที่ 5.3 ดังนี้



รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิวรวมถึงตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักค์

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างระบบควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุด ในรูปที่ 5.3 สามารถเขียนสมการของตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คให้อยู่ในรูป  $d_1^*$  และ  $d_2^*$  แสดงดังสมการที่ (5.2) ดังนี้

$$\begin{cases} d_1^* = -K_{pi,1}I_{L1} - K_{pv,1}K_{pi,1}V_{o1} + K_{iv,1}K_{pi,1}X_{v1} + K_{ii,1}X_{i1} + K_{pv,1}K_{pi,1}V_{o1}^* \\ d_2^* = -K_{pi,2}I_{L2} - K_{pv,2}K_{pi,2}V_{o2} + K_{iv,2}K_{pi,2}X_{v2} + K_{ii,2}X_{i2} + K_{pv,2}K_{pi,2}V_{o2}^* \end{cases} \quad (5.2)$$

พิจารณาจากตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คของวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุด จะเห็นได้ว่า  $X_{v1}$ ,  $X_{v2}$  ของลูปแรงดัน และ  $X_{i1}$ ,  $X_{i2}$  ของลูปกระแส จะกำหนดให้เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อย่างไรก็ตามเมื่อวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีการควบคุม การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดำเนินการได้โดยการแทนค่า  $d_1$  และ  $d_2$  ในสมการที่ (5.1) ด้วย  $d_1^*$  และ  $d_2^*$  จากสมการที่ (5.2) ดังนั้น จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 5.1 ที่ได้จากการพิสูจน์ด้วยวิธีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ (5.3) ดังนี้

$$\begin{cases}
\dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
\dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
\dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\
\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \left( \frac{R_{dc} - r_c}{L_{dc} R_{dc}} \right) V_{dc} - \frac{r_c K_{pi,1}}{L_{dc}} I_{L1}^2 - \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_{dc}} I_{L1} V_{o1} \\
+ \frac{r_c K_{iv,1} K_{pi,1}}{L_{dc}} I_{L1} X_{v1} + \frac{r_c K_{ii,1}}{L_{dc}} I_{L1} X_{i1} + \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* - \frac{r_c K_{pi,2}}{L_{dc}} I_{L2}^2 \\
- \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_{dc}} I_{L2} V_{o2} + \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2}}{L_{dc}} I_{L2} X_{v2} + \frac{r_c K_{ii,2}}{L_{dc}} I_{L2} X_{i2} + \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \\
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{1}{C_{dc} R_{dc}} V_{dc} + \frac{K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1}^2 + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1} - \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} X_{v1} - \frac{K_{ii,1}}{C_{dc}} I_{L1} X_{i1} \\
- \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* + \frac{K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2}^2 + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2} V_{o2} - \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2} X_{v2} \\
- \frac{K_{ii,2}}{C_{dc}} I_{L2} X_{i2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \\
\dot{I}_{L1} = -\frac{K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} I_{L1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} V_{o1} - \frac{V_{o1}}{L_1} + \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} X_{v1} + \frac{K_{ii,1}}{L_1} V_{dc} X_{i1} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} V_{o1}^* \\
\dot{V}_{o1} = \frac{1}{C_1} I_{L1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1} \\
\dot{X}_{v1} = -V_{o1} + V_{o1}^* \\
\dot{X}_{i1} = -I_{L1} - K_{pv,1} V_{o1} + K_{iv,1} X_{v1} + K_{pv,1} V_{o1}^* \\
\dot{I}_{L2} = -\frac{K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} I_{L2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} V_{o2} - \frac{V_{o2}}{L_2} + \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} X_{v2} + \frac{K_{ii,2}}{L_2} V_{dc} X_{i2} + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} V_{o2}^* \\
\dot{V}_{o2} = \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{R_2 C_2} V_{o2} \\
\dot{X}_{v2} = -V_{o2} + V_{o2}^* \\
\dot{X}_{i2} = -I_{L2} - K_{pv,2} V_{o2} + K_{iv,2} X_{v2} + K_{pv,2} V_{o2}^*
\end{cases} \quad (5.3)$$

จากสมการที่ (5.3) จะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งของทั้ง 2 ชุด แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบที่ได้รับการอธิบายไว้ในสมการที่ (5.1) ได้ถูกนำมาใช้เป็นสมการที่ (5.3) ซึ่งมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอ รวมถึงตัวแปรสถานะ  $X_{v1}$ ,  $X_{v2}$ ,  $X_{i1}$  และ  $X_{i2}$  ที่เพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง นอกจากนี้ แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบยังเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้น จากสมการที่ (5.3) สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์ อันดับ 1 ซึ่งรายละเอียดของการทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้น จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.2.3



### 5.2.3 การทำให้เป็นเชิงเส้น

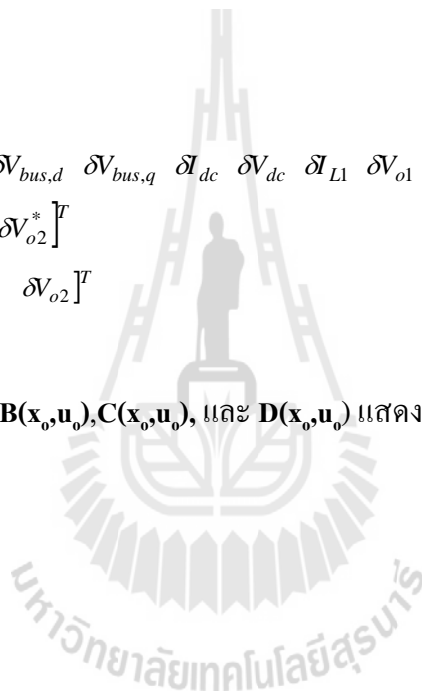
จากสมการที่ (5.3) สามารถทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นได้ โดยอาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์ อันดับ 1 ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองที่ทำให้เป็นเชิงเส้นจากสมการที่ (5.3) แสดงดังสมการที่ (5.4) ดังนี้

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (5.4)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{x} &= [\delta I_{ds} \quad \delta I_{qs} \quad \delta V_{bus,d} \quad \delta V_{bus,q} \quad \delta I_{dc} \quad \delta V_{dc} \quad \delta I_{L1} \quad \delta V_{o1} \quad \delta X_{v1} \quad \delta X_{i1} \quad \delta I_{L2} \quad \delta V_{o2} \quad \delta X_{v2} \quad \delta X_{i2}]^T \\ \delta \mathbf{u} &= [\delta V_m \quad \delta V_{o1}^* \quad \delta V_{o2}^*]^T \\ \delta \mathbf{y} &= [\delta V_{dc} \quad \delta V_{o1} \quad \delta V_{o2}]^T \end{aligned}$$

รายละเอียดของ  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ,  $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ,  $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ , และ  $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  แสดงดังสมการที่ (5.5) ดังนี้



$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 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 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} & -\left(\frac{R_{dc} - r_c}{L_{dc} R_{dc}}\right) & a(5,7) & -\frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{iv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{ii,1} I_{L1,o}}{L_{dc}} & a(5,11) & -\frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{ii,2} I_{L2,o}}{L_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & a(6,7) & \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{C_{dc}} & -\frac{K_{iv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{C_{dc}} & -\frac{K_{ii,1} I_{L1,o}}{C_{dc}} & a(6,11) & \frac{K_{pv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{C_{dc}} & -\frac{K_{iv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{C_{dc}} & -\frac{K_{ii,2} I_{L2,o}}{C_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & -\frac{K_{pi,1} V_{dc,o}}{L_1} & -\frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{dc,o} + 1}{L_1} & \frac{K_{vi,1} K_{pi,1} V_{dc,o}}{L_1} & \frac{K_{ii,1} V_{dc,o}}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv,1} & -K_{iv,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(11,6) & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{pi,2} V_{dc,o}}{L_2} & -\frac{K_{pv,2} K_{pi,2} V_{dc,o} + 1}{L_2} & \frac{K_{vi,2} K_{pi,2} V_{dc,o}}{L_2} & \frac{K_{ii,2} V_{dc,o}}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv,2} & -K_{iv,2} & 0 \end{bmatrix}_{14 \times 14}$$

$$a(5,7) = -\frac{2r_c K_{pi,1} I_{L1,o}}{L_{dc}} - \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{iv,1} K_{pi,1} X_{v1,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{ii,1} X_{i1,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1,o}^*}{L_{dc}} \quad a(6,7) = \frac{2K_{pi,1} I_{L1,o}}{C_{dc}} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1,o}}{C_{dc}} - \frac{K_{iv,1} K_{pi,1} X_{v1,o}}{C_{dc}} - \frac{K_{ii,1} X_{i1,o}}{C_{dc}} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1,o}^*}{C_{dc}}$$

$$a(5,11) = -\frac{2r_c K_{pi,2} I_{L2,o}}{L_{dc}} - \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2} X_{v2,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{ii,2} X_{i2,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}^*}{L_{dc}} \quad a(6,11) = \frac{2K_{pi,2} I_{L2,o}}{C_{dc}} + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}}{C_{dc}} - \frac{K_{iv,2} K_{pi,2} X_{v2,o}}{C_{dc}} - \frac{K_{ii,2} X_{i2,o}}{C_{dc}} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}^*}{C_{dc}}$$

$$a(7,6) = -\frac{K_{pi,1}I_{L1,o}}{L_1} - \frac{K_{pv,1}K_{pi,1}V_{o1,o}}{L_1} + \frac{K_{iv,1}K_{pi,1}X_{v1,o}}{L_1} + \frac{K_{ii,1}X_{i1,o}}{L_1} + \frac{K_{pv,1}K_{pi,1}V_{o1,o}^*}{L_1}$$

$$a(11,6) = -\frac{K_{pi,2}I_{L2,o}}{L_2} - \frac{K_{pv,2}K_{pi,2}V_{o2,o}}{L_2} + \frac{K_{iv,2}K_{pi,2}X_{v2,o}}{L_2} + \frac{K_{ii,2}X_{i2,o}}{L_2} + \frac{K_{pv,2}K_{pi,2}V_{o2,o}^*}{L_2}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\cos(\lambda_o)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sin(\lambda_o)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{L_{dc}} \\ 0 & -\frac{K_{pv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{C_{dc}} & -\frac{K_{pv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{C_{dc}} \\ 0 & \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{dc,o}}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & K_{pv,1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{pv,2} K_{pi,2} V_{dc,o}}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & K_{pv,2} \end{bmatrix}_{14 \times 3}$$

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

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

(5.5)



### 5.2.4 การคำนวณค่าในสถานะคงตัว

แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5.4) มีความสอดคล้องสำหรับการคำนวณหาค่า  $V_{dc,o}$ ,  $\lambda_o$ ,  $V_{o1,o}$ ,  $V_{o2,o}$ ,  $I_{L1,o}$ ,  $I_{L2,o}$ ,  $X_{v1,o}$ ,  $X_{v2,o}$ ,  $X_{i1,o}$ , และ  $X_{i2,o}$  โดยในครั้งแรกสามารถประยุกต์สมการการไหลกำลังไฟฟ้าสำหรับการคำนวณค่าในสถานะอยู่ตัวทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ในที่นี้คือ  $V_{bus,o}$  และ  $\lambda_o$  ซึ่งได้มีการพิสูจน์ไว้ในบทที่ 4 ดังนั้น ค่าในสถานะคงตัวที่สอดคล้องกับแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5.4) สามารถคำนวณได้จากค่า  $V_{bus,o}$  และ  $\lambda_o$  โดยอาศัยสมการที่ (5.6) ดังนี้

$$\begin{cases} V_{dc,o} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{bus,o}) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,o} - r_L I_{dc,o} \\ V_{o1,o} = V_{o1}^*, \quad V_{o2,o} = V_{o2}^* \\ I_{L1,o} = \frac{V_{o1,o}}{R_1}, \quad I_{L2,o} = \frac{V_{o2,o}}{R_2} \\ X_{v1,o} = \frac{I_{L1,o}}{K_{iv,1}}, \quad X_{v2,o} = \frac{I_{L2,o}}{K_{iv,2}} \\ X_{i1,o} = \frac{V_{o1}}{K_{ii,1}V_{dc,o}}, \quad X_{i2,o} = \frac{V_{o2}}{K_{ii,2}V_{dc,o}} \end{cases} \quad (5.6)$$

โดยที่

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

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

### 5.2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ

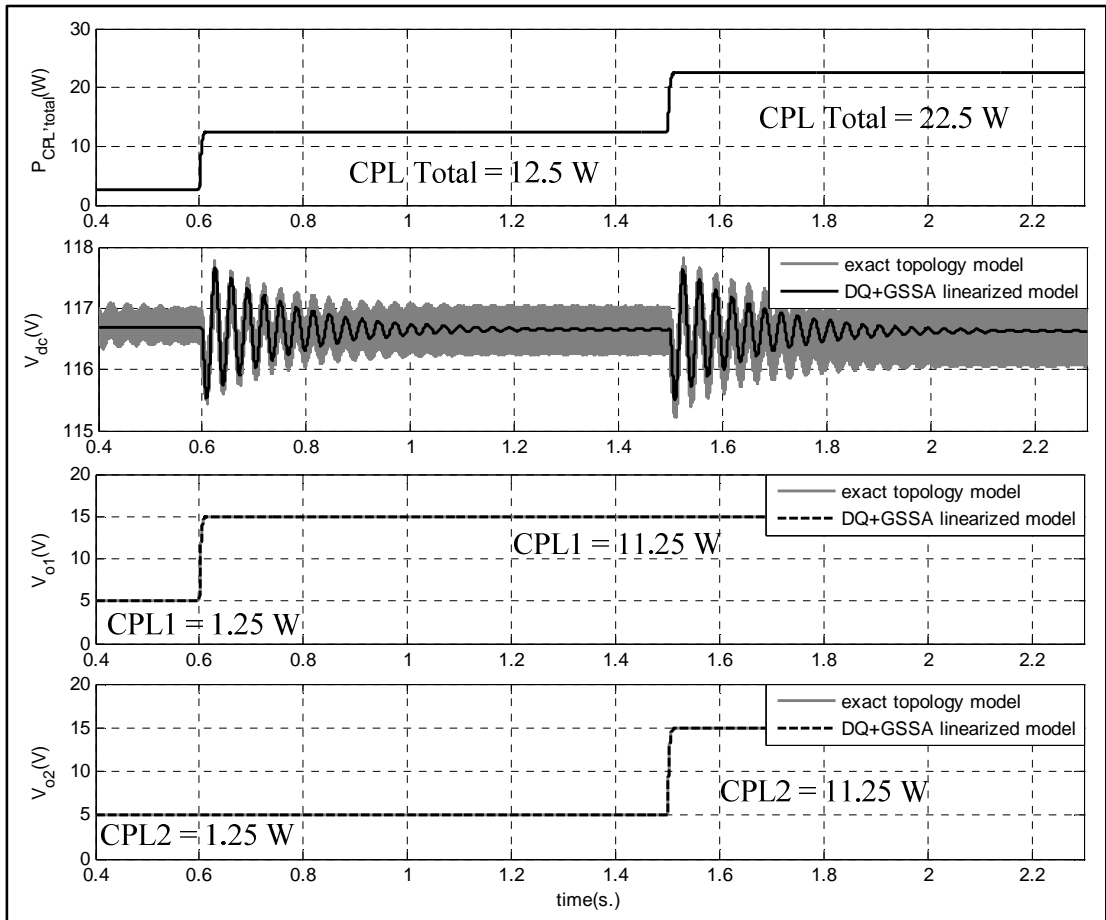
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5.4) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ของสัญญาณขนาดเล็กรูปไซน์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 5.1 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB คู่มือได้จากภาคผนวก ข.4 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 5.1

พร้อมด้วยพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัก์ค์ที่ได้รับการออกแบบไว้ในบทที่ 4 สามารถแสดงได้ดังนี้  $K_{pv1} = K_{pv2} = 0.05$ ,  $K_{iv1} = K_{iv2} = 50$ ,  $K_{iv1} = K_{iv2} = 0.7728$ , และ  $K_{ii1} = K_{ii2} = 11040$  ตามลำดับ

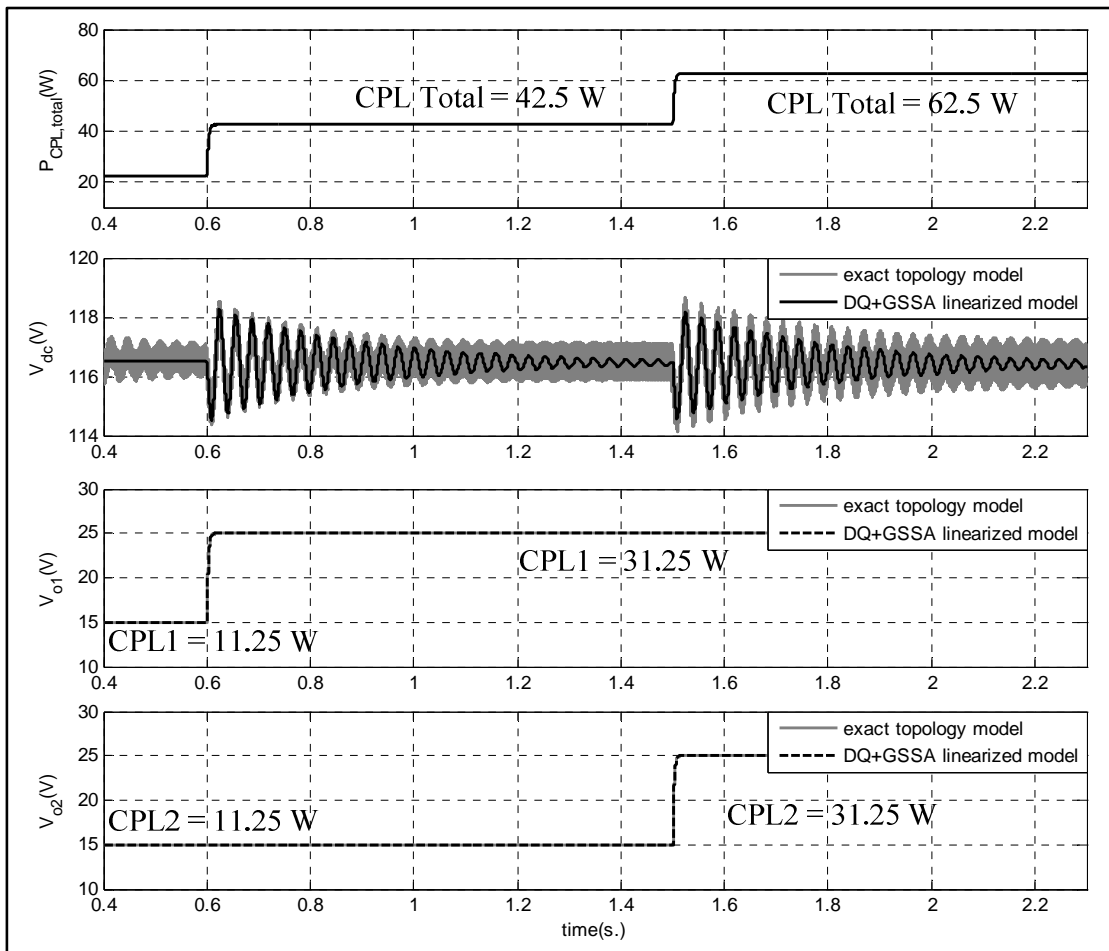
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_s$	50 V <sub>rms/phase</sub>	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
$\omega$	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
$R_{eq}$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานของสายส่ง
$L_{eq}$	24 $\mu$ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
$C_{eq}$	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
$r_L$	0.01 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
$L_{dc}$ ( $\Delta I_{dc} \leq 1.5$ A)	50 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$C_{dc}$ ( $\Delta V_{dc} \leq 30$ V)	500 $\mu$ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$r_c$	0.4 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ
$R_{dc}$	500 $\Omega$	ความต้านทานที่เชื่อมต่อกับวงจรกรอง
$L_1 = L_2$ ( $\Delta I_{dc} \leq 0.1$ A)	15 mH	ความเหนี่ยวนำของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ค์
$C_1 = C_2$ ( $\Delta V_{dc} \leq 10$ mV)	125 $\mu$ F	ความจุไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ค์
$R$	20 $\Omega$	ความต้านทานของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ค์

รูปที่ 5.4 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) แรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัก์ค์ชุดที่ 1 ( $V_{o1}$ ) และ แรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัก์ค์ชุดที่ 2 ( $V_{o2}$ ) โดยมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดของวงจรแปลงผันแบบบัก์ค์ชุดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ ) และชุดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) จาก 5 V ไปเป็น 15 V ที่เวลา 0.6 วินาที และ จาก 5 V ไปเป็น 15 V ที่เวลา 1.5 วินาที ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 5.5 แสดงผลการตอบสนองเช่นเดียวกันกับรูปที่ 5.4 โดยมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดของวงจรแปลงผันแบบบัก์ค์ชุดที่ 1 ( $V_{o1}^*$ ) และชุดที่ 2 ( $V_{o2}^*$ ) จาก 15 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 0.6 วินาที และ จาก 15 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 1.5 วินาที ตามลำดับ



รูปที่ 5.4 ผลการตอบสนอง  $V_{dc}$ ,  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1  
ที่มีการเปลี่ยนแปลง  $V_{o1}^*$  และ  $V_{o2}^*$



รูปที่ 5.5 ผลการตอบสนอง  $V_{dc}$ ,  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1  
ที่มีการเปลี่ยนแปลง  $V_{o1}^*$  และ  $V_{o2}^*$

จากผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณในรูปที่ 5.4 และ 5.5 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว ดังนั้น จึงยืนยันได้ว่า การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีคิว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการต่อขนานของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักคัทที่มีการควบคุมและโหลดความต้านทานถือเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง แม่นยำ จึงสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวไปวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งรายละเอียดการวิเคราะห์เสถียรภาพจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.3

### 5.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพ

แบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคคั่นกันที่ได้อาจสมการที่ (5.4) มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการศึกษาและการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่จ่ายโหลดให้กับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้น แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5.4) ได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเฉพาะนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ค่าเฉพาะสามารถคำนวณได้จากเมทริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  ดังสมการที่ (5.7) ดังนี้

$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (5.7)$$

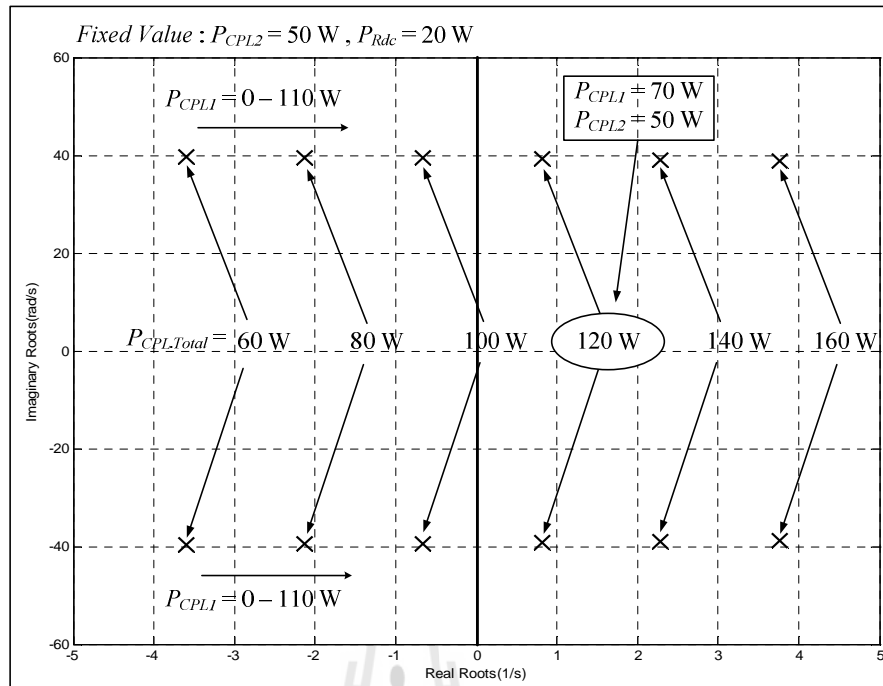
และถ้าระบบมีเสถียรภาพ สามารถเขียนแสดงดังสมการที่ (5.8) ดังนี้

$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (5.8)$$

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

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 ค่าเฉพาะที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ประกอบไปด้วย  $\lambda_1 - \lambda_{14}$  โดยค่าเฉพาะสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาเฉพาะ  $\lambda_5$  และ  $\lambda_6$  เนื่องจากเป็นค่าเฉพาะที่มีผลต่อเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 ดังนี้



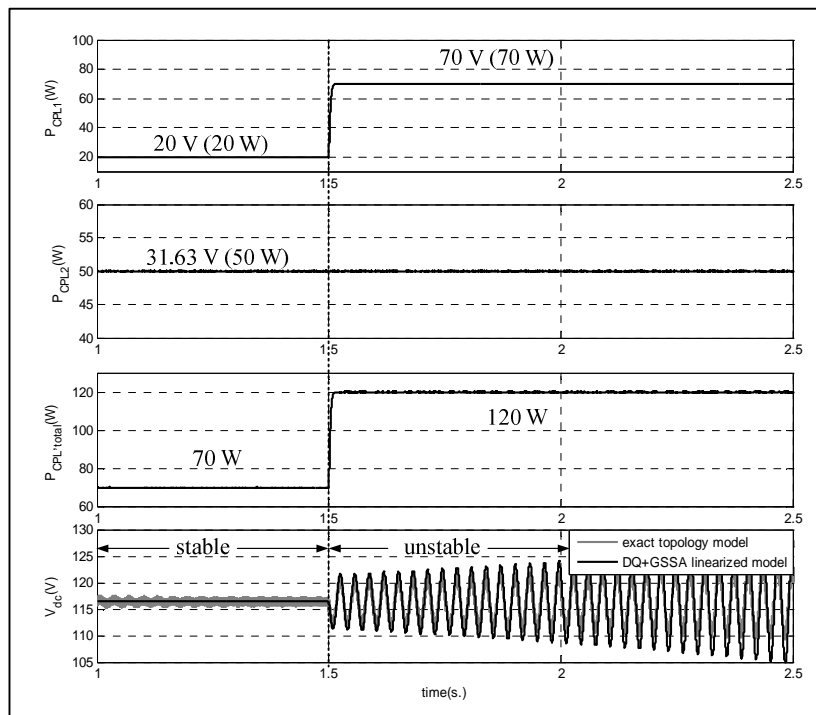


รูปที่ 5.6 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากรูปที่ 5.6 เป็นการพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงของโหนด วงจรแปลงผันแบบบักซ์ชูดที่ 1 ( $P_{CPL1}$ ) จาก 0 – 110 W โดยกำหนดให้โหนดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชูดที่ 2 ( $P_{CPL2}$ ) และโหนดความต้านทานที่เชื่อมต่อกับวงจรกรอง ( $P_{Rdc}$ ) มีค่ากำลังไฟฟ้ามัก่า 50 W และ 27 W ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 สามารถเปลี่ยนไปเป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพได้เมื่อโหนดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชูดที่ 1 มีค่าประมาณ 70 W หรือผลรวมของโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL\_Total}$ ) มีค่าประมาณ 120 W ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแสดงดังสมการที่ (5.9)

$$P_{CPL\_total} = P_{CPL1} + P_{CPL2} \quad (5.9)$$

สำหรับการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในรูปที่ 5.1 จะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังเช่นเดียวกันกับการตรวจความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ แสดงดังรูปที่ 5.7 ดังนี้



รูปที่ 5.7 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 5.7 สังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าแบบอุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 120 W จะทำให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่เพิ่มมากขึ้น หรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบ ดังนั้น แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นที่ได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาใช้ในการพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพ ซึ่งสามารถคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ นอกจากนี้ ยังได้นำทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีต่อเสถียรภาพ ซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.4

## 5.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค่านานกัน โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิ่วและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จึงได้อาศัยความรู้จากการพิสูจน์หาแบบจำลองที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ซึ่งในขั้นต้น ผู้วิจัยได้เริ่มจากการพิสูจน์หาแบบจำลองเชิงพลวัต การทำให้เป็นเชิงเส้น การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของ

ระบบด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแบบจำลองของระบบมีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว ดังนั้น แบบจำลองของระบบถือว่าเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำไปคาดเดาการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ไว้แล้ว จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทนี้ สามารถคาดเดาจุดที่ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ อย่างไรก็ตาม การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ อาจจะไม่เพียงพอต่อความน่าเชื่อถือมากนัก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สร้างชุดทดสอบสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งการสร้างชุดทดสอบจะเป็นเนื้อหาในส่วนของบทที่ 6 โดยรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอต่อไป



## บทที่ 6

### การสร้างชุดทดสอบ

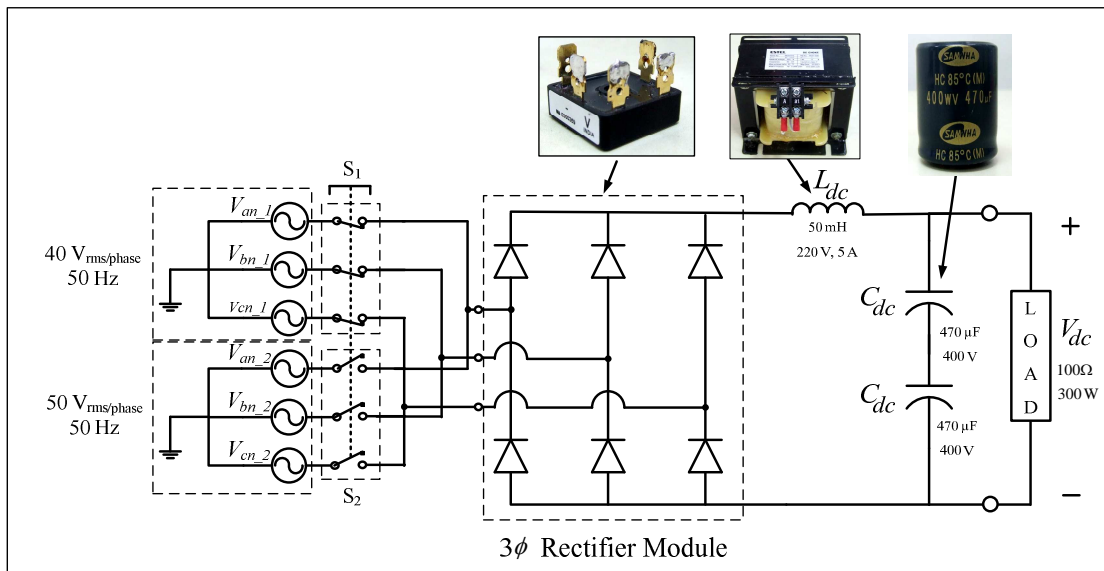
#### 6.1 บทนำ

การวิเคราะห์เสถียรภาพที่อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ไว้แล้ว สามารถคาดเดาจุดที่ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ อาจไม่เพียงพอต่อความน่าเชื่อถือมากนัก ดังนั้น จึงมีความจำเป็นสำหรับการสร้างชุดทดสอบ เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพให้มีความถูกต้องแม่นยำ และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ในบทนี้ จึงได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบโดยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดความต้านทาน และวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีโหลดความต้านทาน จากนั้นจึงได้นำวงจรทั้งสองมาเชื่อมต่อกัน ซึ่งเรียกว่า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีการควบคุม โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 เป็นตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัก์ เนื่องจาก ผู้วิจัยมีความถนัดและเชี่ยวชาญเป็นอย่างดี ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอเพิ่มเติมในส่วนที่เกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR คือ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR การทดสอบบอร์ด AVR การสร้างตัวควบคุมแบบพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR การสร้างชุดตรวจจับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า รวมถึงการอธิบายหลักการทำงานและเสนอผลการทดสอบในแต่ละวงจรอย่างละเอียด

#### 6.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

##### 6.2.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ

การสร้างชุดทดสอบของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน แสดงดังรูปที่ 6.1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับค่าได้จำนวน 2 ชุด โดยมีรีเลย์ (relay) ทำหน้าที่สำหรับการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุต ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน 2 ตัว และโหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 6.1 แผนภาพผังงาน (schematic diagram) สำหรับการทดสอบวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

จากรูปที่ 6.1 ของการต่อวงจรทดสอบ จะสังเกตได้ว่า มีอินพุตที่จ่ายให้กับมอดูลเรียงกระแสสามเฟส (3 $\phi$  rectifier module) 2 ค่า เนื่องจาก ผู้วิจัยต้องการผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) เพื่อสามารถนำไปประยุกต์สำหรับการระบุเอกลักษณ์ของระบบได้ ซึ่งเป็นเนื้อหาในส่วนของบทที่ 7 และการเลือกพิกัดของมอดูลเรียงกระแสสามเฟส ผู้วิจัยได้พิจารณาจากโพลดวงจรที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 5 พบว่ามีโพลดวงจรแปลงผันแบบบับค 2 ชุด ซึ่งมีพิกัดกำลังไฟฟ้าของแต่ละชุดคือ 300 W และโพลดความต้านทาน 27 W และ เมื่อกำหนดค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25 เปอร์เซ็นต์ มอดูลเรียงกระแสสามเฟสจะต้องรองรับกำลังไฟฟ้าที่มีค่าเป็น 784 W หรือ พิกัดแรงดัน 117 V และพิกัดกระแส 6.7 A ตามลำดับ เมื่อแรงดันอินพุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีค่าแรงดันเฟส 50 V<sub>rms</sub> ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้มอดูลเรียงกระแสสามเฟสที่สามารถหาซื้อในท้องตลาดได้ง่าย คือ พิกัดแรงดันไฟฟ้า 500 V และพิกัดกระแส 10 A สำหรับการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Mohan, Underland, and Robbins, 2003) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.1) ดังนี้

$$V_{dc} = 1.654V_m \quad (6.1)$$

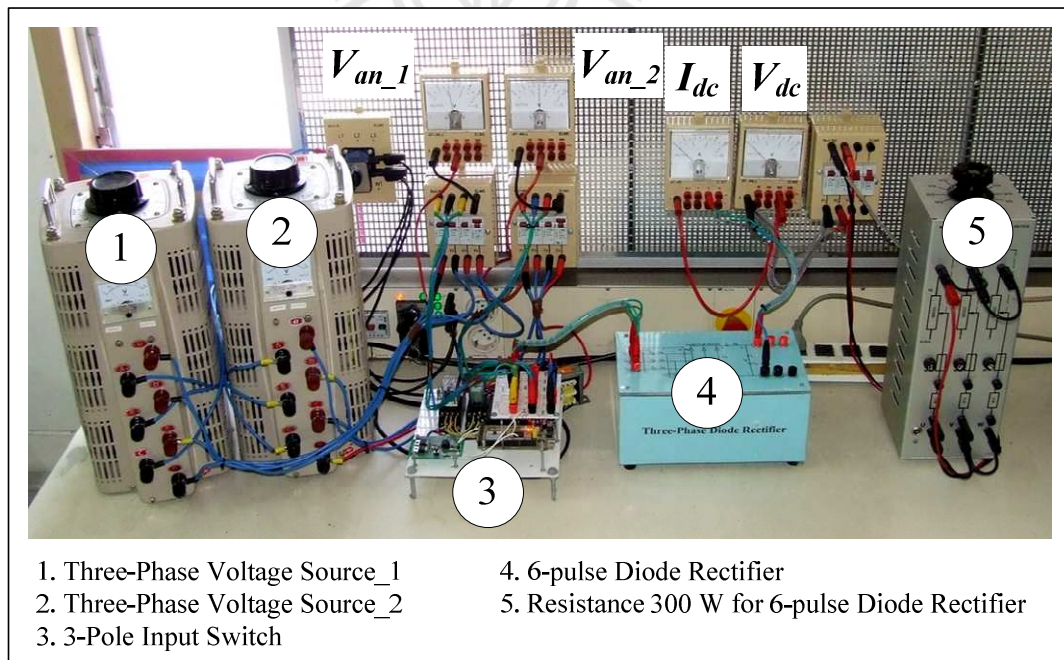
โดยที่  $V_m$  คือ ค่ายอดของแรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

จากรูปที่ 6.1 แรงดันอินพุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสมีค่าแรงดันเฟสเท่ากับ  $40 V_{rms}$  และ  $50 V_{rms}$  ดังนั้นค่าออกของแรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสจะมีค่าเท่ากับ  $56.59 V$  และ  $70.71 V$  ตามลำดับ ซึ่งการคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตดีซีของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ แสดงดังสมการที่ (6.2) ดังนี้

$$\begin{cases} V_{dc1} = 1.654 \times \sqrt{2} \times 40 = 93.56 V \\ V_{dc2} = 1.654 \times \sqrt{2} \times 50 = 116.95 V \end{cases} \quad (6.2)$$

### 6.2.2 ผลการทดสอบวงจรและอภิปรายผล

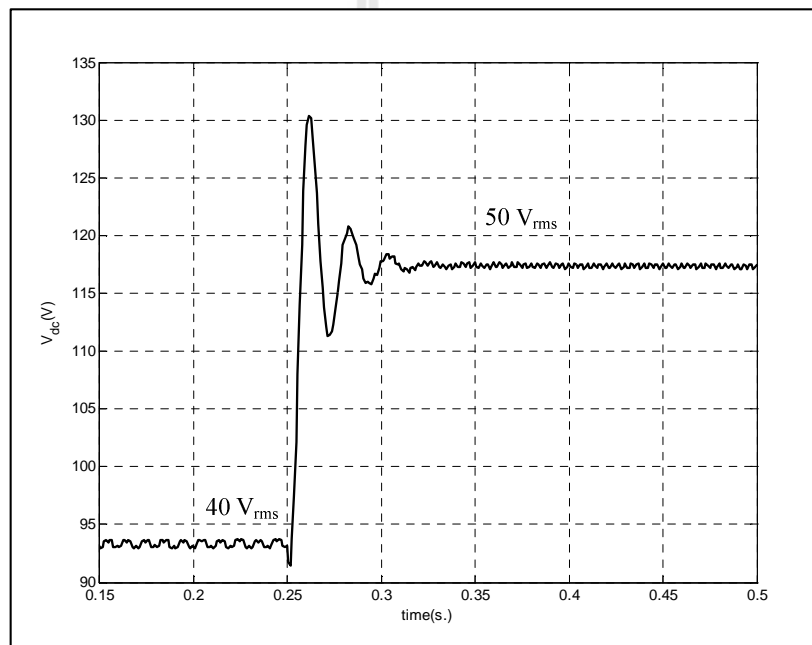
การทดสอบวงจรจะทดสอบที่แรงดันอินพุตเท่ากับ  $40 V_{rms}$  และ  $50 V_{rms}$  จ่ายให้กับมอดู โดยโหลดของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ในขณะทดสอบนี้จะใช้ความต้านทาน  $100 \Omega$  พิกัดสูงสุด  $300 W$  ซึ่งการทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนโดยขั้นตอนแรกจะจ่ายแรงดันอินพุตเท่ากับ  $40 V_{rms}$  โดยให้สวิตช์ที่  $S_1$  ปิดและ  $S_2$  เปิด และขั้นตอนสุดท้ายทำการจ่ายแรงดันอินพุตเท่ากับ  $50 V_{rms}$  โดยให้สวิตช์ที่  $S_1$  เปิดและ  $S_2$  ปิด ซึ่งในการทดสอบดังกล่าวได้ต่อวงจรตามแผนภาพแสดงดังรูปที่ 6.2 ดังนี้



รูปที่ 6.2 ภาพการต่อวงจรสำหรับทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

จากหมายเลข 3 ในรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าการปรับเปลี่ยนแรงดันอินพุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส จะใช้ รีเลย์ทั้งหมด 2 ตัว ซึ่งการกดสวิตช์ทั้งสองตัวดำเนินการด้วยมือ อาจจะทำให้ได้ยาก และมีโอกาสที่จะทำให้อุปกรณ์ป้องกันเกิดการทริปได้และสร้างความเสียหายต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลับที่สามารถปรับค่าได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เป็นตัวสั่งการกดสวิตช์ให้กับรีเลย์ทั้ง 2 ตัว โดยเขียนโปรแกรมให้กดสวิตช์เพียงปุ่มเดียว ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.3 ดังนี้

รูปที่ 6.3 แสดงผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก  $40\text{ V}_{\text{rms}}$  และเปลี่ยนไปเป็นแรงดัน  $50\text{ V}_{\text{rms}}$  ที่เวลา 0.25 วินาที

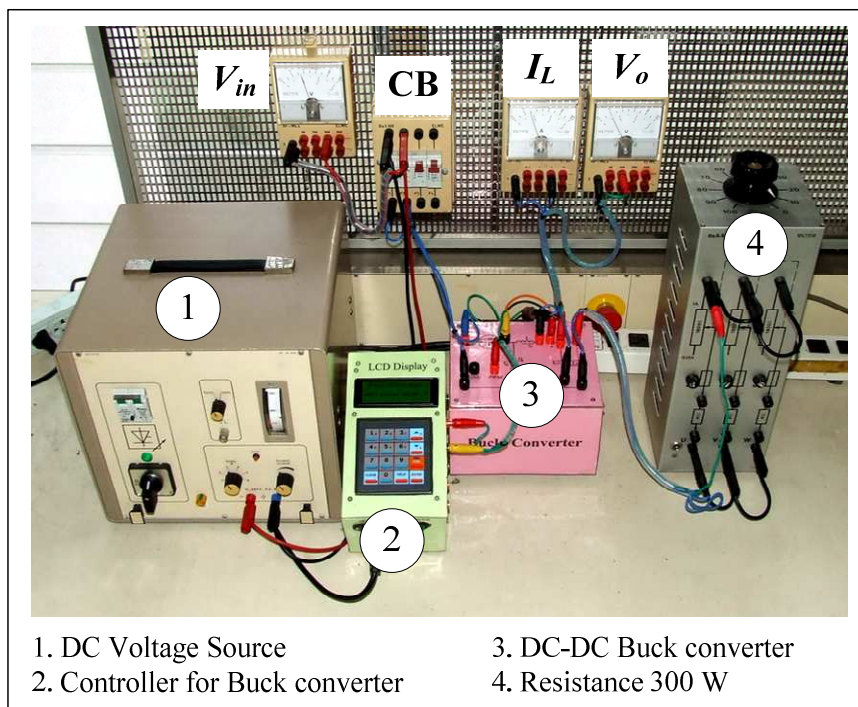


รูปที่ 6.3 ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ )

จากรูปที่ 6.3 จะสังเกตได้ว่า แรงดันเอาต์พุตดีซี มีค่าประมาณ 93.56 โวลต์ เมื่อแรงดันอินพุตต่อเฟสมีค่าเท่ากับ  $40\text{ V}_{\text{rms}}$  และ แรงดันเอาต์พุตดีซีมีค่าประมาณ 116.95 โวลต์ เมื่อแรงดันอินพุตต่อเฟสมีค่าเท่ากับ  $50\text{ V}_{\text{rms}}$  ดังนั้น แรงดันเอาต์พุตดีซีที่ได้จากผลการทดสอบของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดความต้าน มีค่าเท่ากับผลที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (6.2)

### 6.3 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

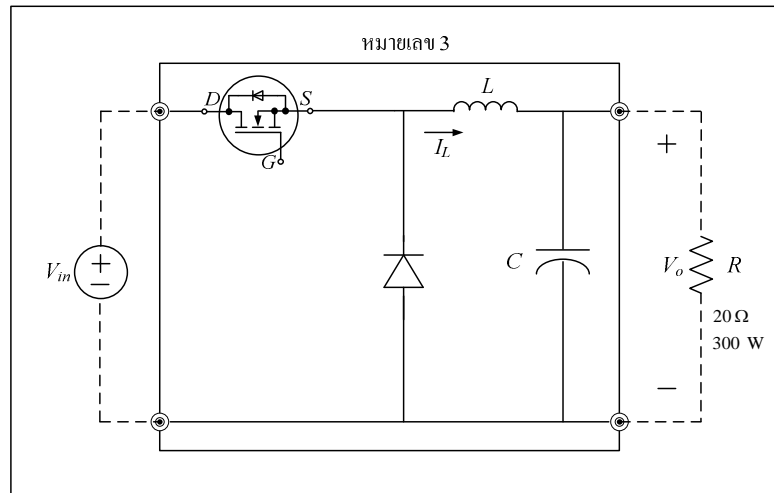
การสร้างชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคค์แสดงดังรูปที่ 6.4 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ชุดสร้างสัญญาณPWM ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ชุดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และโหลดความต้านทาน สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยเลือกใช้มอสเฟสเบอร์ IRFP460 เป็นอุปกรณ์สวิตช์



รูปที่ 6.4 ภาพต่อวงจรสำหรับทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดความต้านทาน



จากหมายเลข 3 ในรูปที่ 6.4 คือวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ที่มีแผนภาพวงจรดังรูปที่ 6.5 ดังนี้



รูปที่ 6.5 โครงสร้างของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

จากรูปที่ 6.5 การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ( $V_o$ ) (Mohan, Underland, and Robbins, 2003) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.3) ดังนี้

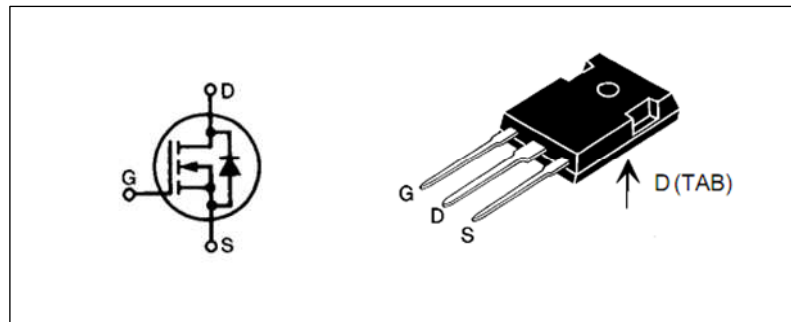
$$V_o = kV_{in} \quad (6.3)$$

โดยที่  $V_{in}$  คือ แรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์  
 $k$  คือ วัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

### 6.3.1 วิธีการออกแบบ

#### วิธีการออกแบบมอดูของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

วงจรแปลงผันแบบบัคค์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้วงจรที่เป็นลักษณะมอดู การออกแบบจะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแสเป็นสำคัญ โดยค่าพิกัดกระแสของโหลดเท่ากับ 3.5 A ในขณะที่แรงดันมีค่าเท่ากับ 100 V และเมื่อคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25 เปอร์เซนต์ มอดูที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์จะมีค่าพิกัดกระแสมากกว่า 4.37 A และมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่า 125 V เพราะฉะนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้มอดูที่มีพิกัดแรงดัน 500 V พิกัดกระแส 20 A ซึ่งมอดูดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 6.6 ดังนี้



รูป 6.6 มอดูลของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

#### วิธีการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุ

การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ ต้องคำนึงถึงค่าแรงดันพลิว (  $\Delta V_c$  : ripple voltage) ของแรงดันตกคร่อมโหลด และค่ากระแสพลิว (  $\Delta I_L$  : ripple current) ของกระแสที่ไหลผ่านโหลด โดยสมการที่ใช้สำหรับการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าของตัวเก็บประจุ (Mohan, Underland, and Robbins, 2003) แสดงดังสมการที่ (6.4) และ (6.5) ดังนี้

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

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

โดยที่  $V_{in}$  คือ แรงดันอินพุต,  $V_o$  คือ แรงดันเอาต์พุต,  $f$  คือ ความถี่ในการสวิตช์  
 $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำ,  $\Delta I_L$  คือ ค่ากระแสพลิว,  $\Delta V_c$  คือ ค่าแรงดันพลิว  
 $C$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

สำหรับค่าแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 116.9 V สามารถดูการคำนวณได้จากสมการที่ (6.2) ซึ่งค่าดังกล่าวคือ ค่า  $V_{in}$  ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ เพื่อง่ายต่อการคำนวณจะประมาณค่า  $V_{in}$  ให้มีค่าเท่ากับ 117 V โดยมีเงื่อนไขสำหรับการออกแบบเป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
 V_m &= 117 \text{ V} \\
 V_o &= 5 - 100 \text{ V} \\
 \Delta V_c &< 10 \text{ mV} \\
 \Delta I_L &< 0.1 \text{ A} \\
 f &= 10 \text{ kHz}
 \end{aligned}$$

จากเงื่อนไขดังกล่าวการออกแบบจะแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรงดันเอาต์พุตน้อยที่สุด และช่วงแรงดันเอาต์พุตมากที่สุดดังนี้

ช่วงที่ 1 ( $V_o = 5 \text{ V}$ )

การออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุจะพิจารณาจากสมการที่ (6.4) และ (6.5) เป็นสำคัญ และในงานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้ค่ากระแสพลิวมีค่าไม่เกิน 0.1 A เพราะฉะนั้นเมื่อแทนค่าดังกล่าวในสมการที่ (6.4) จะได้

$$L = \frac{5(117-5)}{10 \times 10^3 \times 117 \times 0.1} = 4.79 \text{ mH}$$

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสมการที่ (6.5) งานวิจัยวิทยานิพนธ์กำหนดให้ค่าแรงดันพลิวมีค่าไม่เกิน 10 mV เพราะฉะนั้นเมื่อแทนค่าดังกล่าวในสมการที่ (6.5) จะได้

$$C = \frac{0.1}{8 \times 10 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-3}} = 125 \mu\text{F}$$

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

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

$$L = \frac{100(117-100)}{10 \times 10^3 \times 117 \times 0.1} = 14.5 \text{ mH}$$

$$C = \frac{0.05}{8 \times 10 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-3}} = 125 \mu\text{F}$$

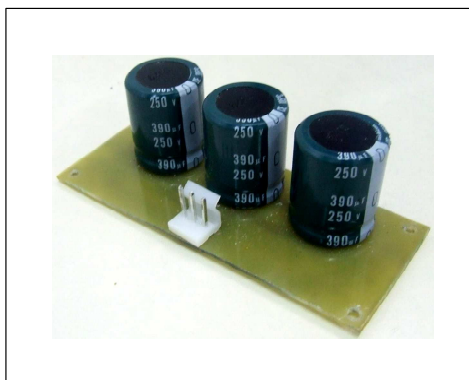
จากการออกแบบข้างต้น การเลือกใช้ความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุต้องครอบคลุมการทำงานทั้งหมดของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยมีเงื่อนไขว่าค่ากระแสพลีมีค่าไม่เกิน 0.1 A และค่าแรงดันพลีมีค่าไม่เกิน 10 mV นอกจากนี้ค่าพิกัดกระแสของขดลวดจะพิจารณาจากค่ากระแสพิกัดของโหลดความต้านทาน  $R$  ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยถ้าคำนึงถึงตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ ค่าพิกัดกระแสของขดลวดจะมีค่ามากกว่า 4.37 A และในส่วนของค่าพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุจะมีค่ามากกว่า 125 โวลต์ เพราะฉะนั้นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่าตัวเก็บประจุ ที่ใช้ในวงจรแปลงผันกำลังแบบบuckสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะมีค่าดังนี้

- $L = 15 \text{ mH}$  พิกัดกระแส 5 A แรงดัน 220 V แสดงดังรูปที่ 6.7 ดังนี้



รูปที่ 6.7 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบuck

- $C = 390 \mu\text{F}$  พิกัดแรงดัน 250 V อนุกรมกัน 3 ตัว เพื่อให้มีค่าความจุประมาณ  $125 \mu\text{F}$  แสดงดังรูปที่ 6.8 ดังนี้



รูปที่ 6.8 ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

#### วิธีการออกแบบไดโอด ( $D_m$ )

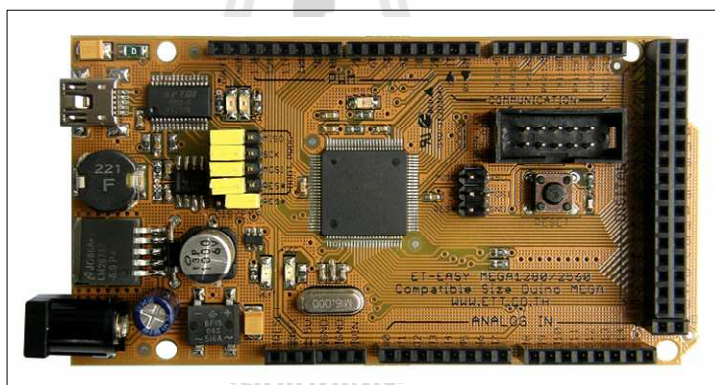
พิจารณาจากวงจรแปลงผันแบบบัคค์ในรูปที่ 6.5 ไดโอด  $D_m$  ต้องมีพิกัดแรงดันมากกว่าค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 116.9 V แต่เมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ ค่าพิกัดแรงดันของไดโอด  $D_m$  จะมีค่ามากกว่า 146.13 V เพราะฉะนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จึงเลือกใช้ไดโอด  $D_m$  ที่มีพิกัดแรงดัน 200 V ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6.9 ดังนี้



รูปที่ 6.9 ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

### 6.3.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เป็นหนึ่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ผลิตโดยบริษัท ATMEL โดย AVR จัดเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลใหม่จาก ATMEL ที่มีประสิทธิภาพและความสามารถสูง โดยแบ่งออกเป็นหลายรุ่น เพื่อรองรับความต้องการที่แตกต่างของผู้ใช้งาน ในขณะที่ยังคงความมีประสิทธิภาพที่เท่ากัน สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยเลือกใช้เบอร์ ATMEGA 1280 เนื่องจากเป็นชุดบอร์ด AVR ที่พัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C++ ของ Arduino ของทางบริษัท อีทีที เป็นผู้จัดทำ ซึ่งง่ายต่อการเขียนโปรแกรมสำหรับการใช้งาน และสามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย โดยปรับปรุงโปรแกรมให้ใช้กับชิพ AVR ที่ใหญ่ขึ้น เพื่อให้มีจำนวนพอร์ตอินพุต, พอร์ตเอาต์พุต รวมทั้ง พอร์ตดิจิทัล, พอร์ตแอนาล็อก, พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM, พอร์ตการสื่อสารอนุกรม ผ่านมอดูและขนาดหน่วยความจำที่เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม ทางบริษัทอีทีที จึงได้นำ ATMEGA1280 มาพัฒนาเป็นชุดบอร์ด โดยใช้ชื่อว่า ET-EASY MEGA1280 (โครงสร้างของชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280 สามารถดูได้จากภาคผนวก ก) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6.10 ดังนี้



รูปที่ 6.10 ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280

คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับชุดบอร์ด *ET-EASY MEGA1280*

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ประสิทธิภาพสูงแต่ใช้พลังงานต่ำในตระกูล AVR
- สถาปัตยกรรมแบบ RISC
  - มีชุดคำสั่ง 135 คำสั่ง และส่วนใหญ่คำสั่งเหล่านี้จะใช้เพียง 1 สัญญาณนาฬิกาในการประมวลผลคำสั่ง
  - มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัว

- ทำงานสูงสุดที่ 16 ล้านคำสั่งต่อวินาที (MIPS) เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz
- หน่วยความจำ
  - หน่วยความจำแฟลชสำหรับโปรแกรม 128 กิโลไบต์ เขียน/ลบได้ 10,000 ครั้ง
  - หน่วยความจำแบบ EEROM ขนาด 4 กิโลไบต์ เขียน/ลบได้ 100,000 ครั้ง
  - หน่วยความจำแรมชนิดเอสแรม (SRAM) ขนาด 8 กิโลไบต์
  - เก็บข้อมูลได้กว่า 20 ปี ที่อุณหภูมิ 85 °C และกว่า 100 ปี ที่ 25 °C
- มีระบบ โปรแกรมตัวเองอยู่ในชิพ
- สามารถทำการอ่านขณะเขียนได้จริง โดยสามารถล็อกการทำงานได้เพื่อความปลอดภัยของซอฟต์แวร์
- มีการเชื่อมประสานกับ JTAG (IEEE std. 1149.1 compliant)
- คุณสมบัติการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก
  - มีตัวตั้งเวลา และตัวนับขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงานได้ 2 โหมด
  - มีตัวตั้งเวลา และตัวนับเวลาขนาด 16 บิต จำนวน 4 ตัว ที่แยกโหมดการทำงานได้ 3 โหมด คือ prescaler, compare และ capture
  - มีตัวนับเวลาเวลาจริง (real time counter) ที่แยกวงจรกำหนดความถี่ได้
  - มี PWM จำนวน 12 ช่องสัญญาณที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 16 บิต
  - มีตัวปรับผลการเปรียบเทียบของเอาต์พุต
  - มีตัวแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ
  - มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับ/ส่งได้ จำนวน 4 พอร์ต
  - เชื่อมประสานแบบอนุกรมแบบ SPI ได้ทั้งแบบมาสเตอร์และสเลฟ
  - มีการเชื่อมประสานแบบอนุกรมด้วยสายสัญญาณ 2 เส้น แบบ ส่งข้อมูลเรียงไปต์
  - มีตัวตั้งเวลาแบบวอตช์ด็อกที่สามารถกำหนดการทำงานได้โดยสามารถแยกสัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ
  - มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณแอนาลอกในตัว

- มีการรองรับการขัดจังหวะและ เวก-อัฟ (wake-up) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของขาชีพ
- คุณสมบัติพิเศษ
  - มีระบบเริ่มระบบเมื่อมีการรีเซ็ตและมีระบบตรวจจับเกิดบราวน์เอาต์ (brown-out) ที่สามารถกำหนดการทำงานได้
  - มีตัวตรวจจับหาความเที่ยงตรงของออสซิลเลเตอร์อยู่ในตัว
  - มีแหล่งการขัดจังหวะทั้งภายในและภายนอก
- อินพุต/เอาต์พุต และตัวถัง
  - มีขาของอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถกำหนดการทำงานได้ 86 พิน
  - ตัวถังแบบ TQFP ชนิด 100 ขา
- ช่วงอุณหภูมิที่ชิพทำงานได้ -40 °C ถึง 85 °C
- การใช้พลังงาน
  - โหมดการทำงาน: ที่ 1 MHz ต้องการแรงดัน 1.8 V กระแส 0.5 mA
  - โหมดเพาเวอร์ดาวน์ (Power-down) ต้องการกระแส 0.1  $\mu$ A ที่แรงดัน 1.8 V

#### พอร์ตอินพุตเอาต์พุตสำหรับบอร์ด ET-EASY MEGA1280

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 มีจำนวน 100 พิน โดยมีพอร์ตอินพุตเอาต์พุตที่ใช้จำนวน 11 พอร์ต ประกอบไปด้วย พอร์ต A ถึง พอร์ต K แต่ละพอร์ตมีขนาด 8 บิต ซึ่งรายละเอียดของแต่ละพอร์ต สามารถดูได้จากภาคผนวก ง สำหรับพอร์ตที่จำเป็นสำหรับการใช้งานในวิจัยวิทยานิพนธ์ คือ พอร์ต A บิตที่ 0 ถึงบิตที่ 7 ทำหน้าที่ส่งข้อมูลไปยังมอดูล LCD เพื่อแสดงผล พอร์ต B บิตที่ 5 ทำหน้าที่เป็นเอาต์พุตเพื่อสร้างสัญญาณพีคดับเบิลยูเอ็ม พอร์ต C บิตที่ 0 ถึง บิตที่ 7 โดยให้ บิตที่ 0 ถึงบิตที่ 3 ทำหน้าที่เป็นอินพุต ส่วนบิตที่ 4 ถึงบิตที่ 7 ทำหน้าที่เป็นเอาต์พุต เพื่ออ่านค่าคีย์สวิตช์ปุ่มกดทั้ง 16 ตัว โดยใช้หลักการคีย์สวิตช์แบบเมตริกซ์ และ พอร์ต F บิตที่ 0 และ บิตที่ 1 ทำหน้าที่เป็นอินพุตเพื่อรับสัญญาณแอนะล็อก

#### การใช้งานมอดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR มีมอดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลหรือ ADC (analog to digital converter) ที่มีความละเอียดขนาด 10 บิต (10-bit resolution) สำหรับแรงดัน +5V ซึ่งหมายถึง เมื่อแปลงเป็นสัญญาณเป็นดิจิตอลแล้วจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 – 1024 โดยมีมอดูล ADC จำนวน 16 ช่องอินพุตสัญญาณ คือ ADC0 - ADC15 ซึ่งจะกำหนดไว้ที่พอร์ต F ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ใช้ช่องสัญญาณเพียง 2 ช่อง คือ ช่อง



ADC0 และ ช่องADC1 โดยผลการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.6)

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{REF}} \quad (6.6)$$

โดยที่  $V_{IN}$  คือ แรงดันด้านขาอินพุต

$V_{REF}$  คือ แรงดันอ้างอิงจะถูกกำหนดไว้ที่ 5 V

*การสร้างสัญญาณ PWM กับ ไทเมอร์/เคาน์เตอร์ 1*

การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR จะแบ่งออกเป็น 3 โหมด ได้แก่

- Fast PWM mode เป็นการสร้างสัญญาณ PWM ความถี่สูง ด้วยวิธีการแบบสโลปเดียว (single-slope) เหมาะสำหรับนำไปใช้งานทางด้าน power regulation, rectification เป็นต้น ข้อเสีย คือ ไม่สามารถปรับความถี่ได้ตามต้องการ
- Phase Correct PWM Mode เป็นการสร้างสัญญาณ PWM ความละเอียดสูง ด้วยวิธีการแบบสโลปคู่ (dual-slope) เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานทางด้านควบคุมมอเตอร์ ข้อเสีย เช่นเดียวกับ Fast PWM Mode
- Phase and Frequency Correct PWM Mode เป็นการสร้างเฟสและความถี่ของสัญญาณ PWM ความละเอียดสูง ซึ่งเป็นโหมดที่นำไปใช้สำหรับงานวิจัย วิทยานิพนธ์ โดยความถี่ของสัญญาณ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.7) ดังนี้

$$f_{pwm} = \frac{f_{clk}}{2 \cdot N \cdot TOP} \quad (6.7)$$

โดยที่  $N$  คือ ค่าปริสเกลเตอร์ (ตัวลดทอนสัญญาณ) ซึ่งมีค่าเป็น 1, 8, 64, 256 และ 1024 โดยสามารถกำหนดได้จากรีจิสเตอร์ที่ใช้สำหรับการกำหนดแหล่งสัญญาณนาฬิกา (TCCR1B) ในที่นี้กำหนดให้  $N = 1$

$TOP$  คือ ค่าที่กำหนดให้กับรีจิสเตอร์ ICR1 ซึ่งมีขนาด 16 บิต

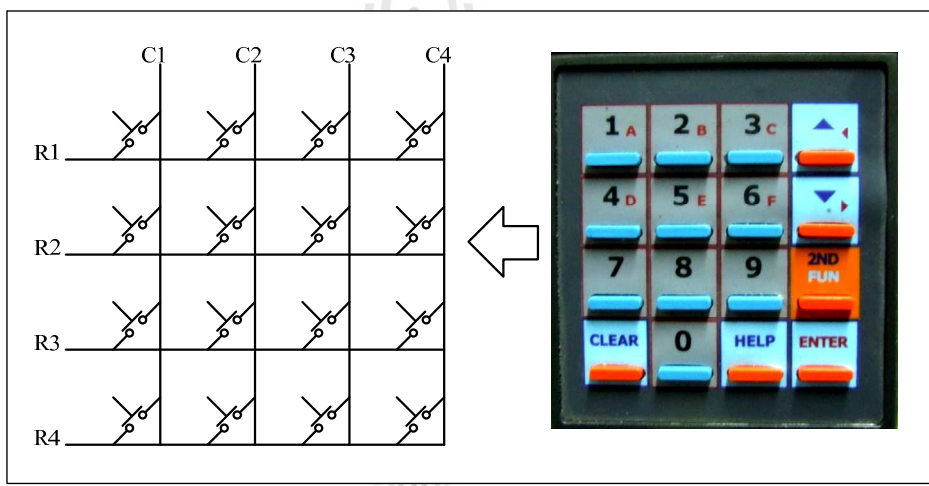
$f_{clk}$  คือ ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ในที่นี้ใช้ 16 MHz

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความถี่การสวิตช์มีค่าเท่ากับ 10 KHz ดังนั้น จากสมการที่ (6.7) จะสามารถหาค่าที่กำหนดให้กับรีจิสเตอร์ IRC1 แสดงได้ดังนี้

$$TOP = \frac{16 \times 10^6}{2 \times 1 \times 10 \times 10^3} = 800$$

*การใช้งานคีย์สวิตช์เมตริกซ์ (KEYPAD)*

การอ่านค่าคีย์สวิตช์ปุ่มกด หากใช้ขาพอร์ตต่อเข้ากับปุ่มโดยตรง จำนวนขาพอร์ตจะถูกใช้ไปเท่ากับจำนวนปุ่มกดที่ใช้งาน หากใช้สวิตช์จำนวน 16 ตัว จะต้องเสียขาพอร์ตไปทั้งหมด 16 ขาพอร์ต การต่อใช้งานพอร์ตจำนวนมากๆ จึงนิยมที่จะต่อในรูปแบบที่เรียกว่าคีย์สวิตช์เมตริกซ์ โดยการออกแบบคีย์เมตริกซ์แสดงดังรูปที่ 6.11 ดังนี้



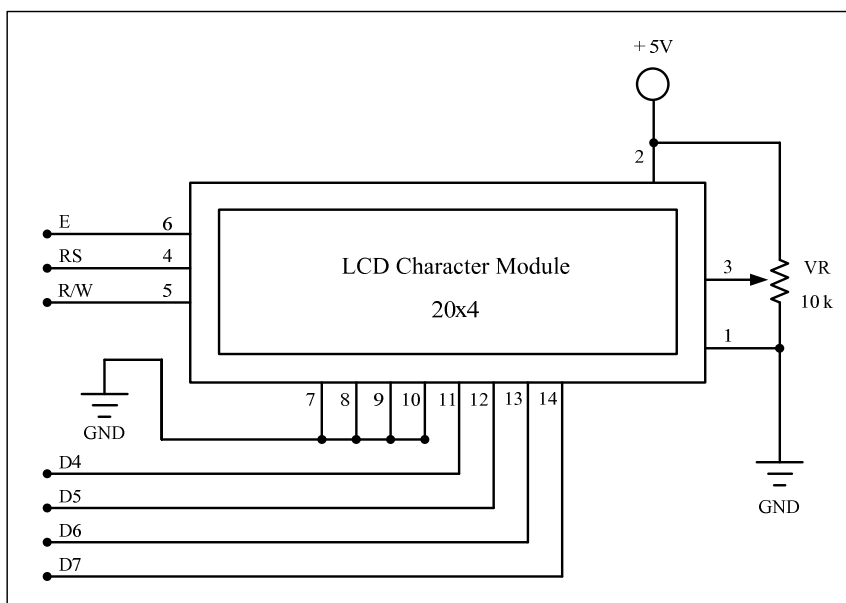
รูปที่ 6.11 การต่อสัญญาณแบบคีย์สวิตช์

จากรูปที่ 6.11 มีจำนวนปุ่มสวิตช์ทั้งหมด 16 ปุ่ม (4x4) จะใช้สัญญาณเพียง 8 เส้น โดยที่การต่อสัญญาณคีย์สวิตช์เมตริกซ์นั้น นิยมต่อแบบ pull-up สัญญาณ เพราะฉะนั้นสถานะของสวิตช์จะมีลอจิกเป็น 1 หรือเป็น High ทั้งหมด จากนั้นเมื่อต้องการอ่านค่าคีย์สวิตช์ จะต้องกำหนดค่าของคอลัมน์ (column) ที่ต้องการอ่านค่าโดยกำหนดให้เป็นลอจิก 0 หรือ Low เพราะค่าของคอลัมน์จะเป็นขาสัญญาณควบคุม เมื่อเขียนโปรแกรมและอ่านค่าจากแถว (row) ทั้งหมด โดยหากแถวใดมีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าแถวนั้นมีการกดคีย์สวิตช์ ทำให้ทราบว่าคีย์สวิตช์ตำแหน่ง

ใดมีการกดเกิดขึ้น ซึ่งการสแกนก็ย้บอร์คจะต้องกำหนดตำแหน่งที่จะสแกนในคอลัมน์และอ่านก็ย้จากแถว

### การใช้งานมอดูล LCD (LIQUID CRYSTAL DISPLAY MODULE)

หน่วยแสดงผลมอดูล LCD หรือ หน่วยแสดงผลแบบผลึกเหลว โดยมอดูล LCD จะมีอยู่สองชนิดด้วยกัน คือ แบบตัวอักษร และแบบกราฟิก สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้แบบตัวอักษรซึ่งโครงสร้างการต่อใช้งานพื้นฐานของมอดูล LCD แสดงดังรูปที่ 6.12 ดังนี้



รูปที่ 6.12 ภาพการต่อใช้งานมอดูล LCD

จากรูปที่ 6.12 รายละเอียดขาสัญญาณของมอดูล LCD มีดังนี้

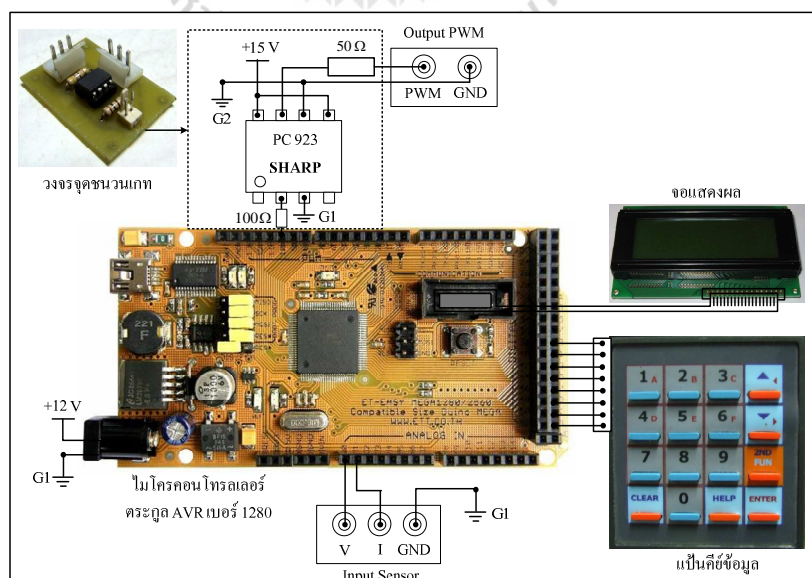
- ขาที่ 1 : GND สำหรับต่อขากราวด์ของวงจร
- ขาที่ 2 : +Vcc ต่อไฟเลี้ยง + 5V
- ขาที่ 3 : +Vo สำหรับปรับความสว่างของหน้าจอ
- ขาที่ 4 : RS (Register Select) ขาเลือกการติดต่อกับรีจิสเตอร์คำสั่งหรือข้อมูล โดย “0” จะติดต่อกับคำสั่ง “1” จะติดต่อกับข้อมูล
- ขาที่ 5 : R/W (Read/Write control) ขาอ่านหรือเขียนข้อมูลกับมอดูล LCD
- ขาที่ 6 : E (Enable) ขาป้อนสัญญาณพัลส์ Enable ให้มอดูลเริ่มทำงาน
- ขาที่ 7 ถึง 14 : D0 – D7 (DATA) เป็นขาข้อมูล

จากรูปที่ 6.12 ของขาข้อมูลที่ 7 ถึง 14 จะสังเกตได้ว่าเป็นการเชื่อมต่อขาข้อมูลของมอดูล LCD ผ่านชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 4 บิต จะทำให้ประหยัดขาสัญญาณอินพุต/เอาต์พุต ที่ต้องใช้ในการเชื่อมต่อกับ LCD ได้กว่าการเชื่อมต่อวงจรแบบ 8 บิต เนื่องจากวิธีนี้จะสูญเสียขาสัญญาณเพื่อใช้ในการควบคุมการแสดงผล LCD เพียง 7 เส้นเท่านั้น ซึ่งตามปกติแล้วการเชื่อมต่อขาสัญญาณเพื่อควบคุมการแสดงผล LCD แบบ 8 บิต นั้นจะต้องสูญเสียขาสัญญาณถึง 11 เส้น แต่วิธีการนี้ก็ต้องแลกมาด้วยความซับซ้อนในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการแสดงผลของ LCD ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำ ไลบรารี (Library) สำหรับการควบคุมการแสดงผลแบบ 4 บิตของบริษัท อีทีที ที่ได้เป็นผู้เขียน นำมาใช้งาน ทำให้สามารถเขียนโปรแกรมสั่งงาน LCD ได้ง่ายมากขึ้นและใช้โค้ด (Code) คำสั้นน้อยลงด้วย

### 6.3.3 การทดสอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

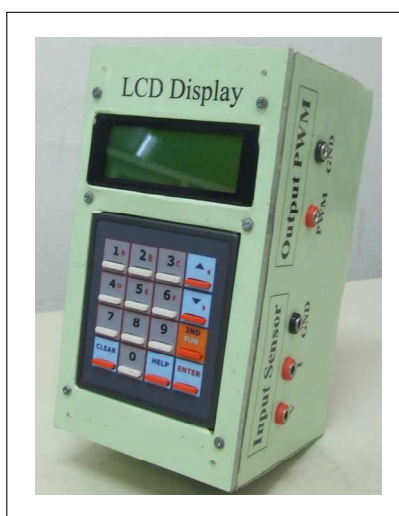
การทดสอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับงานในทางปฏิบัติ ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ ซึ่งในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอองค์ประกอบของชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR การเขียนโปรแกรมทดสอบสร้างสัญญาณ PWM วิธีการใช้งาน และผลการทดสอบการสร้างสัญญาณ PWM

- องค์ประกอบของชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR แสดงดังรูปที่ 6.13



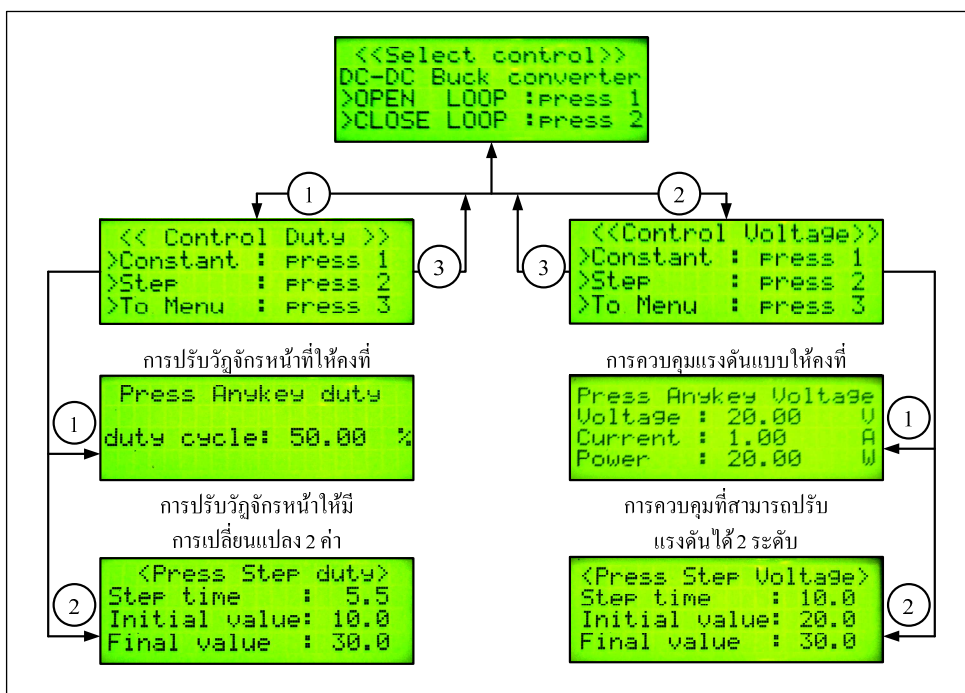
รูปที่ 6.13 องค์ประกอบของชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

จากรูปที่ 6.13 องค์ประกอบของชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ประกอบด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 จอแสดงผลมอดูล LCD เป็นคีย์ข้อมูลแบบ 16 ปุ่ม แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 2 ชุด ที่แรงดัน +12 V และ +15 V ตามลำดับ วงจรจุดชนวนเกท ซึ่งในที่นี้ใช้ไอซีเบอร์ PC 923 ของบริษัท SHARP ซึ่งจากรูปที่ 6.13 สามารถออกแบบเป็นชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR แสดงดังรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 ชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

- การใช้งานของชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เป็นการสั่งงานการควบคุมแบบวงเปิด (Open-loop control) และ แบบที่ 2 สั่งงานการควบคุมแบบวงปิด (Close-loop control) ซึ่งจะใช้สำหรับในหัวข้อถัดไป โดยการใช้งานสามารถแสดงเป็นแผนภาพการใช้งานแสดงดังรูปที่ 6.15 ดังนี้



รูปที่ 6.15 แผนภาพการใช้งานชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

จากรูปที่ 6.15 จะเห็นได้ว่า ผู้วิจัยได้โปรแกรมการสั่งงานการควบคุมแบบวงเปิด และวงปิด ไว้ในชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ด้วยกัน เพื่อจะทำให้ง่ายขึ้นและสะดวกต่อการใช้งาน ซึ่งลักษณะการควบคุมทั้ง 2 แบบ จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ การควบคุมแบบให้มีค่าคงที่ และการควบคุมที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าตามเวลาที่กำหนดได้

- การเขียนโปรแกรมทดสอบสร้างสัญญาณ PWM โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้นำซอฟต์แวร์ที่มีชื่อว่า Arduino มาใช้สำหรับการเขียนโปรแกรมทดสอบสร้างสัญญาณ PWM โดยลักษณะการเขียนโปรแกรมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งแสดงได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 คือ การประกาศตัวแปร

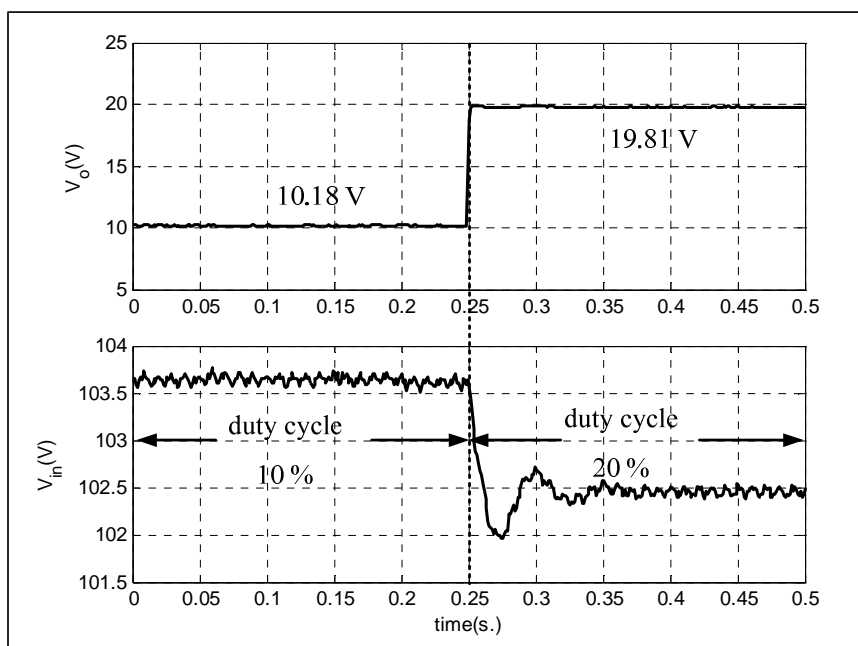
ส่วนที่ 2 คือ การปรับตั้งค่าสำหรับการเซตโหมดของการสัญญาณ PWM

ส่วนที่ 3 คือ รูปของการสั่งโปรแกรมการทำงานกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่

การเขียนโปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino สำหรับการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สามารถดูได้จากภาคผนวก จ.1

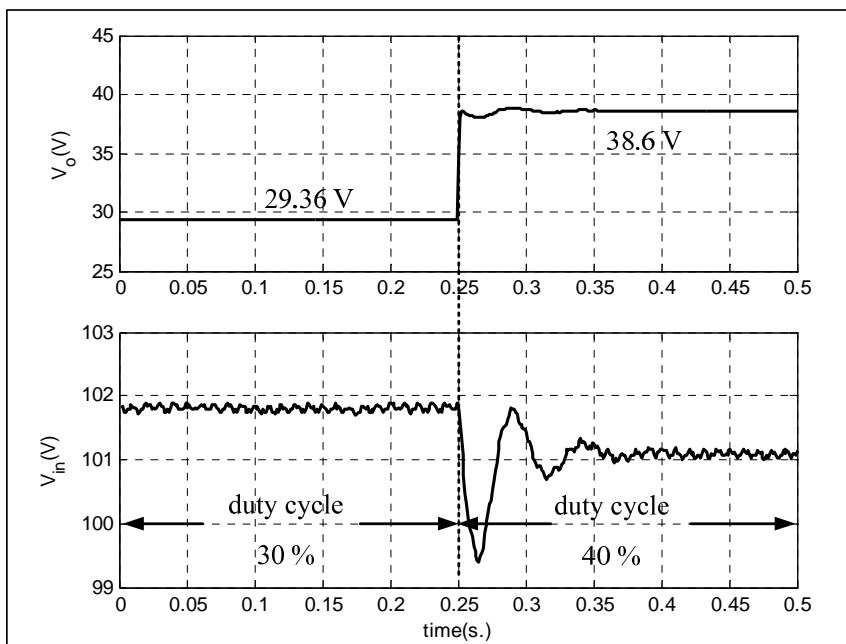
### 6.3.4 ผลการทดสอบวงจรและอภิปรายผล

การทดสอบการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สามารถดูภาพการทดสอบวงจรได้จากรูปที่ 6.4 โดยใช้แรงดันกระแสตรงจากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแทนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจาก แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าแรงดันพลั่วที่มากพอสมควร ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับเป็นแรงดันอินพุตให้กับวงจรแปลงผันแบบบัก์ โดยรูปที่ 6.16 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 10 % เป็น 20 % ที่เวลา 0.25 วินาที



รูปที่ 6.16 ผลการทดสอบจากการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 10 % เป็น 20 %

รูปที่ 6.17 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 30 % เป็น 40 % ที่เวลา 0.25 วินาที



รูปที่ 6.17 ผลการทดสอบจากการเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 30 % เป็น 40 %

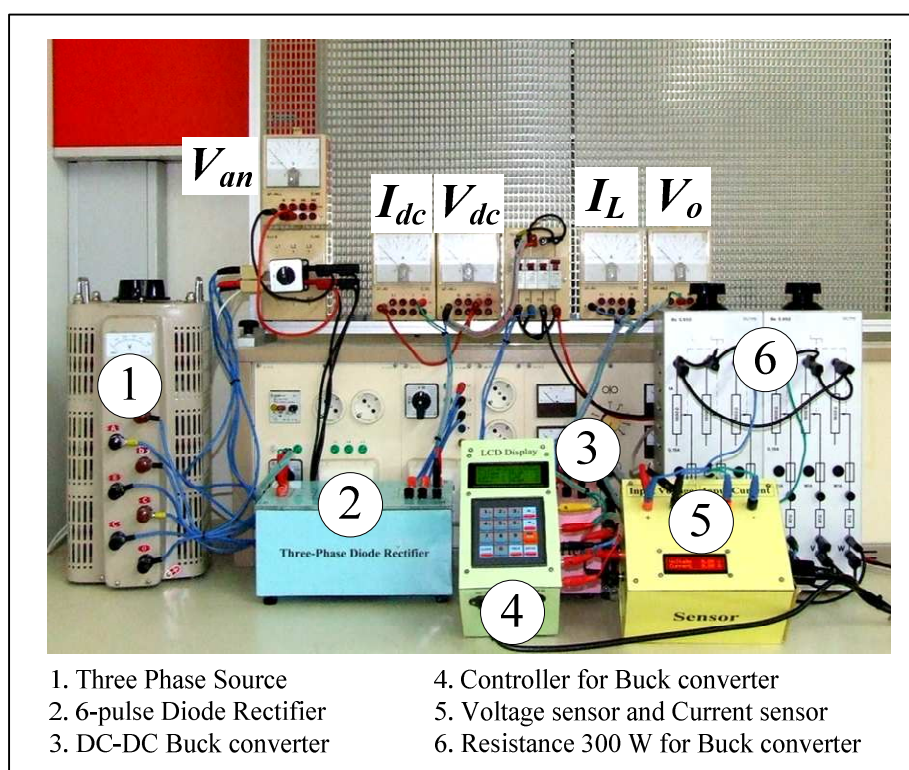
จากรูปที่ 6.16 และ 6.17 สังเกตได้ว่า การทดสอบการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งได้ด้วยการปรับค่าจากวัฏจักรหน้าที่ ซึ่งจากรูปที่ 6.16 ทดสอบการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 10 % เป็น 20 % จะเห็นว่า แรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นจากประมาณ 11 V ไปเป็น 20 V โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าประมาณ 103.5 V และ 102.5 ตามลำดับ และจากรูปที่ 6.17 ทดสอบการปรับค่าวัฏจักรหน้าที่จาก 30 % เป็น 40 % จะเห็นว่า แรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นจากประมาณ 29 V ไปเป็น 38 V โดยที่แรงดันอินพุตมีค่าประมาณ 102 V และ 101 ตามลำดับ ดังนั้น ผลการทดสอบการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งให้มีความใกล้เคียงและสอดคล้องตามสมการที่ (6.4)



## 6.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักค์

### 6.4.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ

ภาพรวมของการต่อวงจรของชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.18 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับค่าได้ ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักค์ ชุดทดสอบไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ชุดทดสอบวงจรตรวจจับ และ โหลดความต้านทานสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์และวงจรแปลงผันแบบบักค์



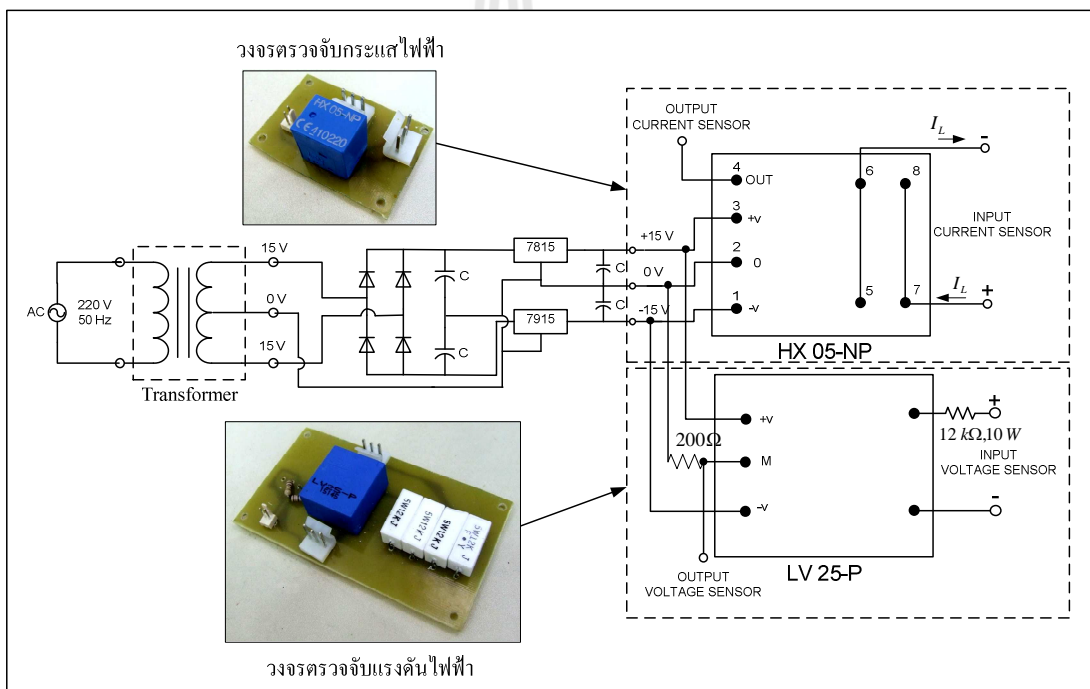
รูปที่ 6.18 ภาพการต่อวงจรสำหรับทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลด  
วงจรแปลงผันแบบบักค์ขนานกัน

จากรูปที่ 6.18 จะเห็นได้ว่าเป็นการนำทั้งสองวงจรระหว่างวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดความต้านทานจากหัวข้อที่ 6.2 และวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีโหลดความต้านทานจากหัวข้อที่ 6.3 มาเชื่อมต่อกัน โดยจะใช้วงจรแปลงผันแบบบักค์ที่พิจารณาเป็นแบบวงปิด เพื่อให้สอดคล้องกับระบบที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 4 ดังนั้น จากภาพการต่อวงจรดังกล่าวถ้าต้องการควบคุมวงจรแบบวงปิด จำเป็นที่จะต้องมีชุดทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าและ

แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มเข้ามาในของวงจรแปลงผันแบบบัคทั้ง 2 ชุด ซึ่งองค์ประกอบจะได้รับนำเสนอในหัวข้อที่ 6.4.2

### 6.4.2 ชุดทดสอบวงจรตรวจจับ

ชุดทดสอบของวงจรตรวจจับ ประกอบด้วย วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP พิกัดกระแส 5 แอมแปร์ ทำหน้าวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ และวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P พิกัด 500 โวลต์ ทำหน้าที่วัดแรงดันตกคร่อมของโหลดความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัค โดยทั้ง 2 วงจรจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกันที่แรงดัน -15V, 0V และ +15 V ซึ่งองค์ประกอบการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 6.19 ดังนี้



รูปที่ 6.19 ภาพการต่อวงจรชุดทดสอบวงจรตรวจจับ

จากรูปที่ 6.19 ของวงจรตรวจจับกระแส จะสังเกตได้ว่า การต่อวงจรของการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ หรือทางด้านปฐมภูมิ มีด้วยกัน 2 แบบ คือ การต่อแบบอนุกรม และ การต่อแบบขนาน ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้เลือกการต่อวงจรของการวัดกระแสไฟฟ้าแบบขนาน เพื่อเพิ่มพิกัดของการวัดกระแสไฟฟ้าเป็น 2 เท่า โดยจาก 5 แอมแปร์ ไปเป็น 10 แอมแปร์ และ ลดความเสี่ยงของการเกิดความเสียหาย เมื่ออุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ามีค่าเกิน

5 แอมแปร์ สำหรับวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า จะเห็นได้ว่า จากการต่อวงจรมีตัวต้านทานปรากฏอยู่ทั้งด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ เนื่องจาก พิกัดทางด้านแรงสูงมีที่วัดมีค่าแรงดันไฟฟ้า 500 V กระแสไฟฟ้า 10 mA ซึ่งการออกแบบค่าความต้านทานด้านแรงสูง พิจารณาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.8) ได้ โดยกำหนดให้แรงดันที่วัดจากด้านแรงสูง ( $V_{HV}$ ) ไม่เกิน 100 V

$$R_{HV} = \frac{V_{HV}}{I_{HV}} = \frac{100}{10 \times 10^{-3}} = 10k\Omega \quad (6.8)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (6.8) สังเกตได้ว่า เมื่อความต้านทานด้านแรงสูงมีค่ามาก จะทำให้กระแสทางด้านแรงสูงมีค่าน้อยลง แต่จะส่งผลให้การตรวจจับมีความละเอียดน้อยลง ดังนั้น ค่าความต้านทานที่ผู้วิจัยได้นำมาใช้งานและสามารถหาซื้อได้ในท้องตลาด คือ 12 k $\Omega$  สำหรับด้านแรงต่ำของค่าความต้านทาน เกิดขึ้นจากการปรับจูนด้วยมือ ซึ่งใช้หลักการ คือ ทดสอบจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ด้านแรงสูงมีค่าเท่ากับ 100 V เนื่องจากเป็นแรงดันสูงที่วัดค่าได้ และหลังจากนั้นทำการปรับค่าความต้านทานของทางด้านแรงต่ำเพื่อให้มีค่าเท่ากับ +5 V ซึ่งเป็นแรงดันสูงสุดที่ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สามารถอ่านค่าได้ ซึ่งค่าความต้านทานที่อ่านได้มีค่าเท่ากับ 200  $\Omega$  ดังนั้น จากรูปที่ 6.19 สามารถออกแบบเป็นชุดทดสอบวงจรตรวจจับที่สามารถแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ผ่านทางมอดูล LCD เพื่อลดความยุ่งยากสำหรับการต่อสายไฟที่เพิ่มมากขึ้น โดยแสดงดังรูปที่ 6.20 ดังนี้



รูปที่ 6.20 ชุดทดสอบวงจรตรวจจับ

### 6.4.3 การสร้างตัวควบคุมแบบพีไอด้วยชุดทดสอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

การสร้างตัวควบคุมแบบพีไอด้วยชุดทดสอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ได้อาศัยพื้นฐานมาจากการนำตัวควบคุมทั้ง 2 แบบ ซึ่งก็คือ การควบคุมแบบสัดส่วน และการควบคุมแบบอินทิกรัล มาใช้ร่วมกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ (6.9) ดังนี้

$$V_{out} = K_p \cdot V_{error} + K_i \int V_{error} dt \quad (6.9)$$

โดยที่	$V_{out}$	คือ	สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีไอ
	$K_p$	คือ	อัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน
	$K_i$	คือ	อัตราขยายของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล
	$V_{error}$	คือ	สัญญาณอินพุตของตัวควบคุมแบบพีไอ

จากสมการที่ (6.10) สามารถนำมาสร้างสมการใหม่ได้ โดยให้อยู่ในรูปแบบของเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete time) เพื่อใช้สำหรับการนำไปเขียน โปรแกรมสร้างตัวควบคุมด้วยชุดทดสอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR โดยการปรับรูปแบบสมการดังกล่าวแสดงได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 พิจารณาสมการของตัวควบคุมพีไอในช่วงเวลาต่อเนื่อง (continuous time) แสดงดังสมการที่ (6.10) ดังนี้

$$V_{out} = K_p \cdot V_{error} + K_i \int V_{error} dt \quad [ ] \quad (6.10)$$

ขั้นที่ 2 หาอนุพันธ์ทั้งสองข้างของสมการที่ (6.10) แสดงดังในสมการที่ (6.11) ดังนี้

$$\frac{dV_{out}}{dt} = K_p \cdot \frac{dV_{error}}{dt} + K_i \cdot V_{error} \quad (6.11)$$

ขั้นที่ 3 กำหนดให้  $dt = T_i$  เมื่อ  $T_i$  คือ การสุ่มตัวอย่างเวลา (sampling time) และอนุพันธ์ของแรงดันคลาดเคลื่อนประมาณค่าให้อยู่ในรูปแบบผลต่าง แสดงดังสมการที่ (6.12) ดังนี้

$$\frac{\Delta V_{out}}{T_i} = K_p \cdot \frac{\Delta V_{error}}{T_i} + K_i \cdot V_{error} \quad (6.12)$$

ขั้นที่ 4 กำหนดให้ ผลต่างของแรงดันเอาต์พุต ( $\Delta V_{out}$ ) มีค่าเท่ากับ  $V_{out(i)} - V_{out(i-1)}$  และผลต่างของแรงดันคลาดเคลื่อน ( $\Delta V_{error}$ ) มีค่าเท่ากับ  $V_{error(i)} - V_{error(i-1)}$  สามารถแสดงดังสมการที่ (6.13) ได้ดังนี้

$$\frac{V_{out(i)} - V_{out(i-1)}}{T_i} = K_p \cdot \frac{V_{error(i)} - V_{error(i-1)}}{T_i} + K_i \cdot V_{error(i)} \quad (6.13)$$

โดยที่  $V_{out(i)}$  คือ ค่าแรงดันปัจจุบัน  
 $V_{out(i-1)}$  คือ ค่าแรงดันอดีต  
 $V_{error(i)}$  คือ แรงดันคลาดเคลื่อนปัจจุบัน  
 $V_{error(i-1)}$  คือ แรงดันคลาดเคลื่อนอดีต

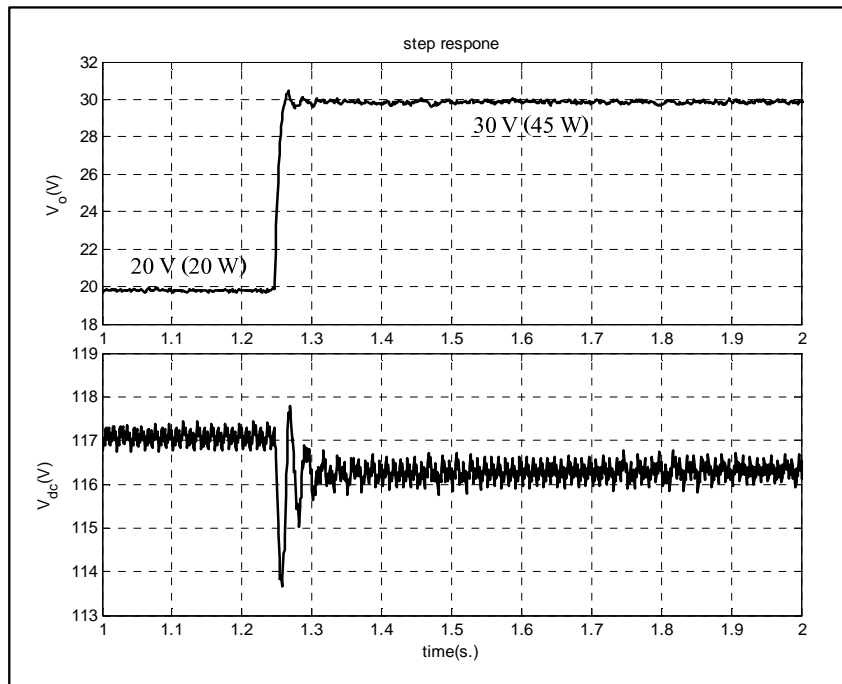
ขั้นที่ 5 คูณด้วย  $T_i$  ทั้งสองข้างของสมการ ดังนั้นจะได้สมการตัวควบคุมพีไอในช่วงเวลาไม่ต่อเนื่อง แสดงดังสมการที่ (6.14) ได้ดังนี้

$$V_{out(i)} = V_{out(i-1)} + K_p [V_{error(i)} - V_{error(i-1)}] + K_i \cdot T_i \cdot V_{error(i)} \quad (6.14)$$

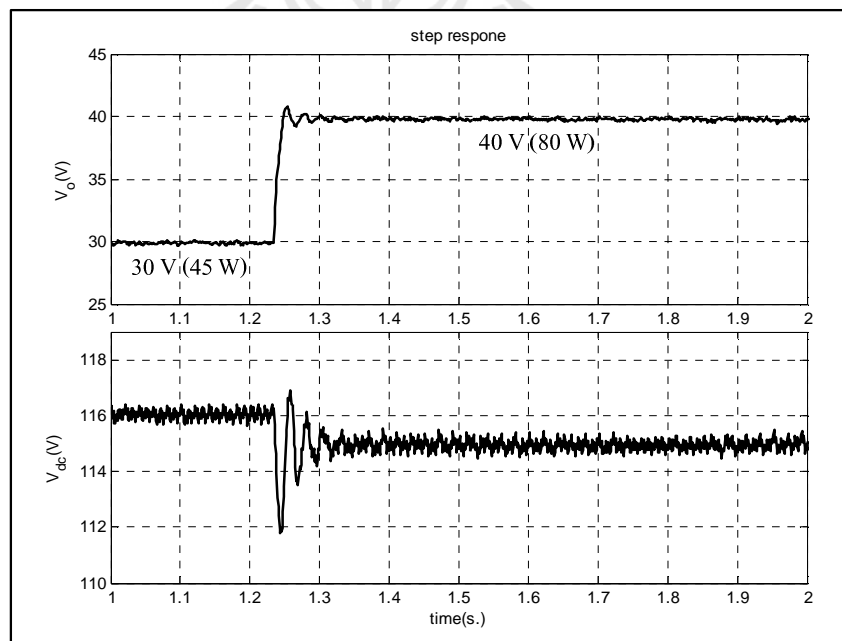
จากสมการที่ 6.14 เป็นสมการที่สามารถนำไปเขียนโปรแกรมด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ได้ ซึ่งรายละเอียดการเขียนโปรแกรม สามารถดูได้จากผนวก จ.2

#### 6.4.4 ผลการทดสอบวงจรและอภิปรายผล

การทดสอบการเขียนโปรแกรมตัวควบคุมแบบพีไอด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สามารถดูภาพการทดสอบวงจรได้จากรูปที่ 6.18 โดยรูปที่ 6.21 แสดงผลการทดสอบของการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) แรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักค์ ( $V_o$ ) โดยมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดของวงจรแปลงผันแบบบักค์ ( $V_o^*$ ) จาก 20 V ไปเป็น 30 V ที่เวลา 1.25 วินาที และรูปที่ 6.22 แสดงผลการทดสอบการตอบสนองเช่นเดียวกันกับรูปที่ 6.21 โดยมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดของวงจรแปลงผันแบบบักค์ ( $V_o^*$ ) จาก 30 V ไปเป็น 40 V ที่เวลา 1.25 วินาที



รูปที่ 6.21 ผลทดสอบการตอบสนอง  $V_{dc}$  และ  $V_o$  ของการทดสอบในรูปที่ 6.18  
ที่มีการเปลี่ยนแปลง  $V_o^*$



รูปที่ 6.22 ผลทดสอบการตอบสนอง  $V_{dc}$  และ  $V_o$  ของการทดสอบในรูปที่ 6.18  
ที่มีการเปลี่ยนแปลง  $V_o^*$

จากรูปที่ 6.21 และ 6.22 สังเกตได้ว่า การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักค์ของทั้ง 2 ชุด ด้วยการเขียนโปรแกรมตัวควบคุมแบบพีไอด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สามารถควบคุมแรงดันให้คงที่ และมีความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งสามารถเป็นชุดทดสอบสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ในบทย่อยๆ ไป

## 6.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 6 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ ซึ่งผู้วิจัยได้พิจารณาการสร้างชุดทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดความต้านทาน และชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีโหลดความต้านทาน เพื่อลดความยุ่งยากและการแก้ไขปัญหาการทดสอบวงจรเมื่อชุดทดสอบเกิดความบกพร่องและเสียหาย สำหรับการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักค์ที่มีโหลดความต้านทาน ผู้วิจัยได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์และการเลือกอุปกรณ์ของชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักค์ อีกทั้งยังได้สร้างชุดทดสอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สำหรับเป็นตัวควบคุมให้กับชุดทดสอบวงจรดังกล่าว ซึ่งได้อธิบายความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 องค์ประกอบของชุดทดสอบ และวิธีใช้งานไว้พอสังเขป จากนั้นเมื่อชุดทดสอบดังกล่าวของทั้ง 2 ชุดมีความมั่นคงและให้ผลการทดสอบมีความถูกต้องแม่นยำ ผู้วิจัยได้นำชุดทดสอบทั้ง 2 ชุดมาเชื่อมต่อกัน เพื่อให้ชุดทดสอบมีความสอดคล้องกับระบบที่ได้รับการนำเสนอไว้บทที่ 4 ซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาในงานวิจัย จากผลการทดสอบการเขียนโปรแกรมตัวควบคุมแบบพีไอ ด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมโหลดความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบักค์ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งสามารถเป็นชุดทดสอบสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงได้ ซึ่งเป็นเนื้อหาในบทที่ 7 โดยรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอต่อไป

## บทที่ 7

### การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบ

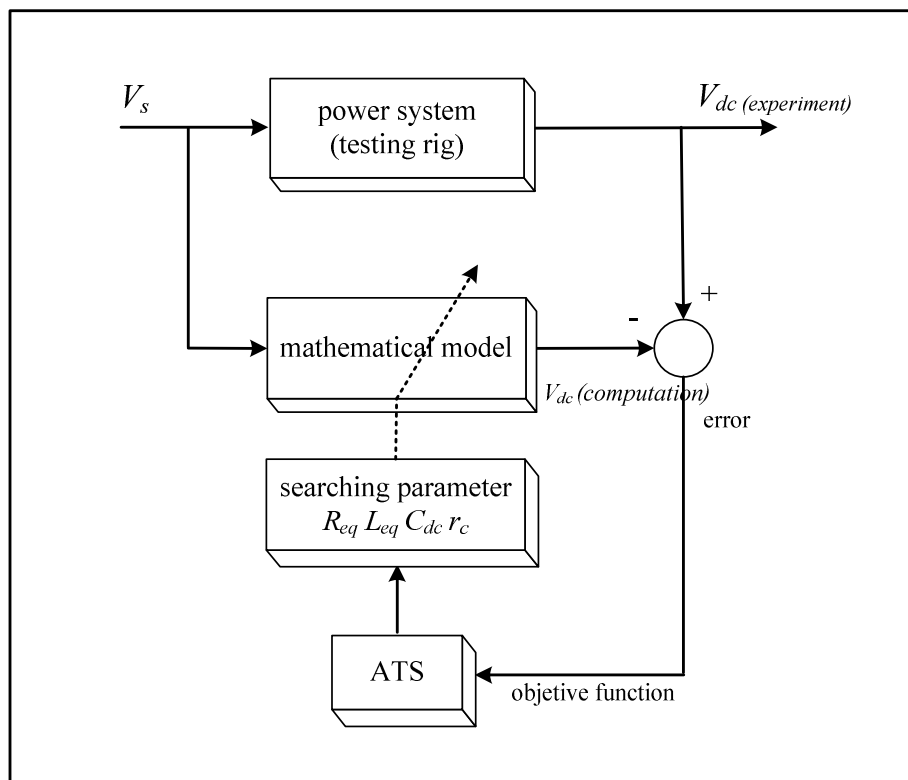
#### 7.1 บทนำ

ปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ถูกนำมาใช้งานด้านอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะระบบไฟฟ้าที่มีโหลดวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน ซึ่งโหลดที่มีการควบคุมการทำงานดังกล่าว จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ และสร้างความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง (Emadi, et al., 2006) เมื่อมีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของโหลด หรือการต่อขนานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power load : CPL) เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น เนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงแบบบัคค์ ซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ และได้อาศัยองค์ความรู้ที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 4 และบทที่ 6 ได้แก่ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพ และการสร้างชุดทดสอบ ซึ่งมีองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบ โดยรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 7.2

#### 7.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของระบบชุดทดสอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (ATS) เป็นแนวทางใหม่สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องจากชุดทดสอบ เพื่อให้การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน มีความถูกต้องแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการค้นหาแสดงดังรูปที่ 7.1 ดังนี้





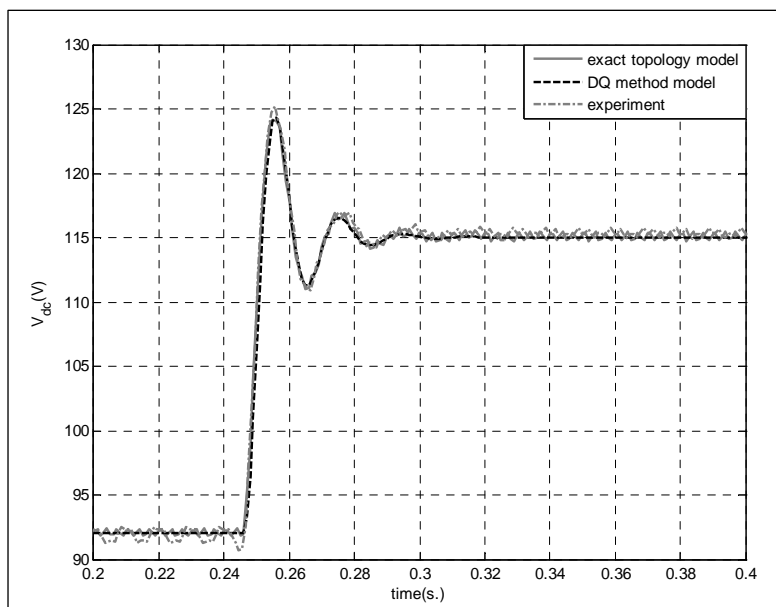
รูปที่ 7.1 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาพารามิเตอร์

รูปที่ 7.1 แสดงการค้นหาพารามิเตอร์ของชุดทดสอบด้วยวิธี ATS โดยวิธี ATS จะทำการปรับเปลี่ยนค่า  $R_{eq}$ ,  $L_{eq}$ ,  $C_{dc}$  และ  $r_c$  ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จนกระทั่งค่าแรงดัน  $V_{dc}$  ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหา มีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงดัน  $V_{dc}$  ที่ได้จากการทดสอบ (error เท่ากับ 0) หรืออีกความหมายหนึ่งก็คือ พารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธี ATS เป็นพารามิเตอร์ของระบบทดสอบจริง ซึ่งผลการทดสอบการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ แสดงดังตารางที่ 7.1 ดังนี้

ตารางที่ 7.1 ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบ

พารามิเตอร์	$R_{eq}$	$L_{eq}$	$C_{dc}$	$r_c$	error
ค่า	0.1040 $\Omega$	0.116 mH	230.72 $\mu\text{F}$	2.9367 $\Omega$	0.6433

จากตารางที่ 7.1 สามารถนำผลการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบไปตรวจสอบความถูกต้องกับผลการตอบสนองจากชุดทดสอบ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 7.2 ดังนี้



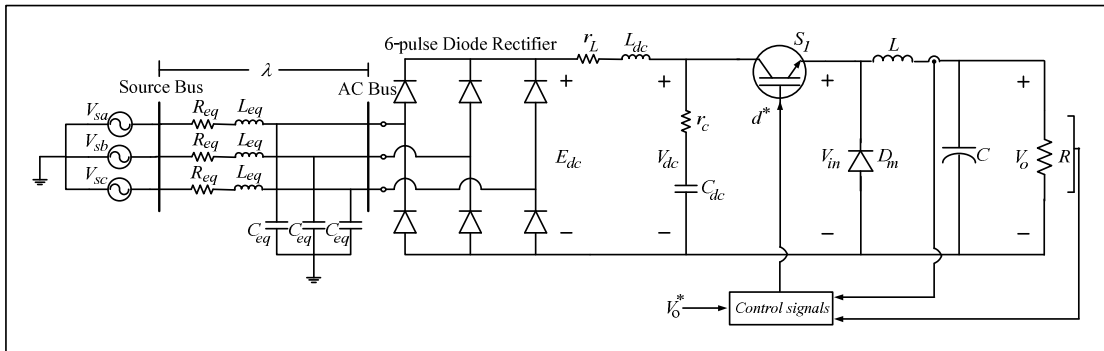
รูปที่ 7.2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก  $40 V_{rms}$  ไป  $50 V_{rms}$

จากรูปที่ 7.2 แสดงผลการตอบสนองของการเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตดีซี เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตจาก  $40 V_{rms}$  ไป  $50 V_{rms}$  ที่เวลา 0.25 วินาที สังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีสำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง บนคอมพิวเตอร์ มีลักษณะรูปสัญญาณในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว ที่สอดคล้องกับผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซีจากชุดทดสอบ ดังนั้น พารามิเตอร์ของระบบที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว จึงเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและถูกต้องที่สุด

### 7.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบ

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัย แสดงดังรูปที่ 7.3 คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และวงจรกรองสัญญาณดีซีที่เชื่อมต่อกับโหลดตัวต้านทาน และโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม ซึ่งจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 7.3 ดังกล่าวเป็นระบบที่พิจารณาเช่นเดียวกันกับบทที่ 4 ดังนั้น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบ ได้อาศัยองค์ความรู้ในบทที่ 4 คือ

การสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตโดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับ 1 การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบเป็นต้น



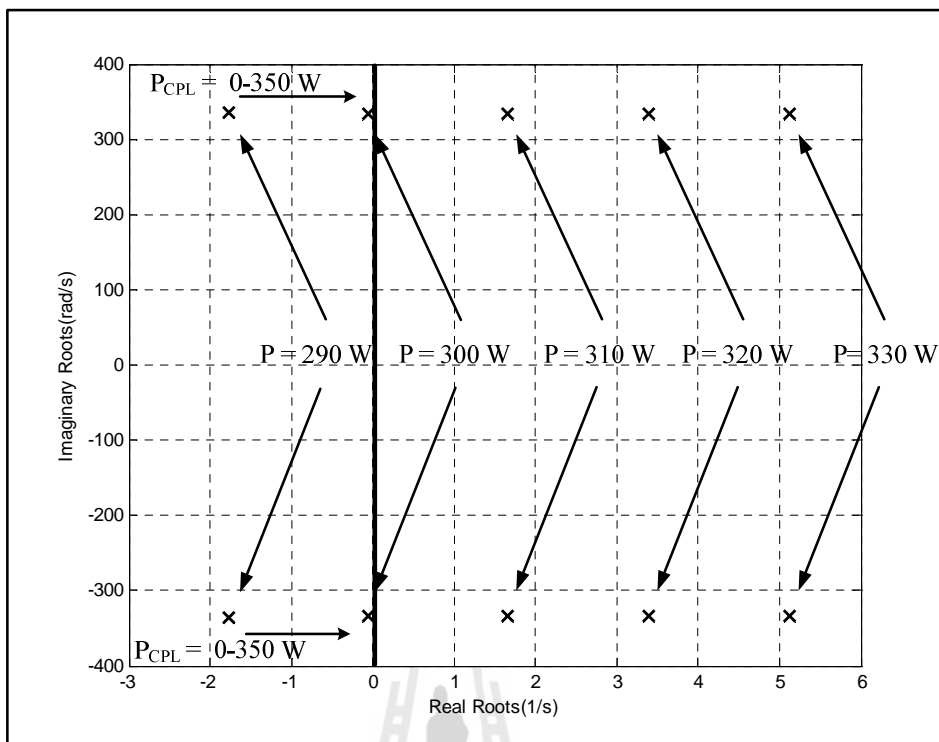
รูปที่ 7.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม

การอาศัยองค์ความรู้การสร้างแบบจำลองเชิงพลวัต ที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 4 จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าว การเปรียบเทียบผลการตอบสนองระหว่างการจำลองสถานการณ์ของสัญญาณขนาดเล็กแบบชั่วคราวด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องทั้งในสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัว ดังนั้น จึงยืนยันได้ว่าแบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม ถือเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง แม่นยำ จึงสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบได้ ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 6 เป็นการสร้างชุดทดสอบเพื่อให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงมีความสอดคล้องกับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7.3 โดยดูรูปการต่อวงจรได้จากรูปที่ 6.18 ของบทที่ 6 สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบนั้น พารามิเตอร์จากชุดทดสอบจะต้องมีค่าเท่ากับพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง เนื่องจากพารามิเตอร์จะส่งผลต่อเสถียรภาพ ดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.5 ดังนั้น พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้มาจากการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของระบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว เพื่อจะทำให้พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีค่าที่สอดคล้องกับพารามิเตอร์ของชุดทดสอบ ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบชุดทดสอบแสดงดังตารางที่ 7.2 ดังนี้

ตารางที่ 7.2 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบชุดทดสอบ

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_s$	50 V <sub>rms/phase</sub>	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
$\omega$	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
$R_{eq}$	0.104 $\Omega$	ความต้านทานของสายส่ง
$L_{eq}$	0.116 mH	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
$C_{eq}$	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
$r_L$	0.57 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$L_{dc} (\Delta I_{dc} \leq 1.5 \text{ A})$	37.7 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$C_{dc} (\Delta V_{dc} \leq 30 \text{ V})$	230.72 $\mu\text{F}$	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$r_c$	2.9367 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
$L_1 (\Delta I_{dc} \leq 0.1 \text{ A})$	15 mH	ความเหนี่ยวนำของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักค์
$C_1 (\Delta V_{dc} \leq 10 \text{ mV})$	125 $\mu\text{F}$	ความจุไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักค์
$R$	20 $\Omega$	ความต้านทานของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักค์

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองเชิงพลวัตที่ได้รับการพิสูจน์ไว้บทที่ 4 ประกอบไปด้วย  $\lambda_1 - \lambda_{14}$  โดยค่าเจาะจงสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบจริง จะพิจารณา  $\lambda_5$  และ  $\lambda_6$  เนื่องจากเป็นค่าเจาะจงที่มีผลต่อเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งหลักการวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาจากการเพิ่มโพลค่าลึงไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักค์ ( $P_{CPL}$ ) จาก 0 – 350 W ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 7.4 ดังนี้

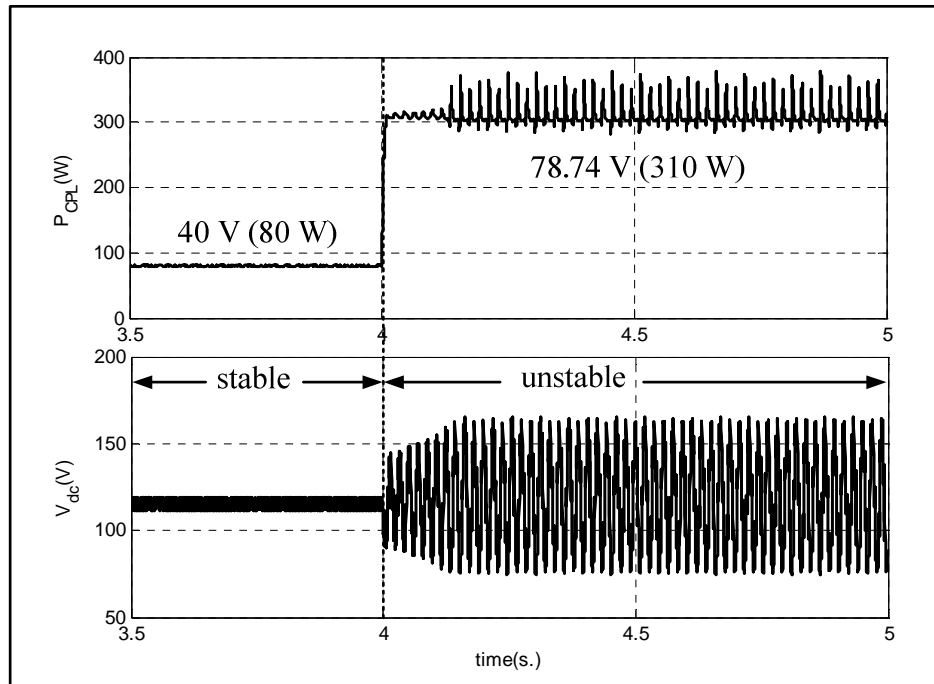


รูปที่ 7.4 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบ

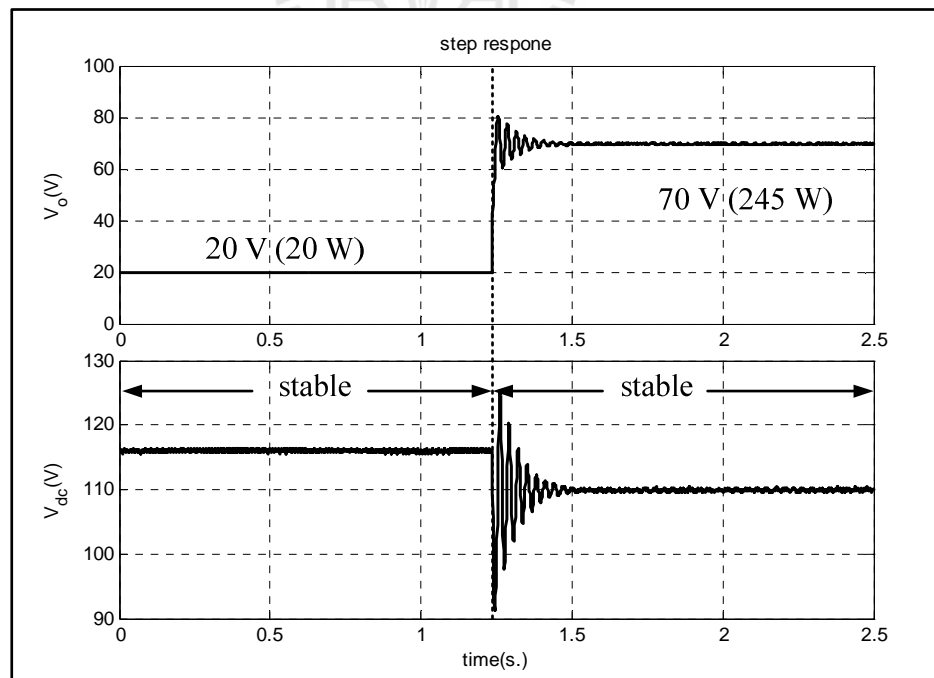
จากรูปที่ 7.4 จะสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 310 W จะทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยนี้ สามารถเปลี่ยนไปเป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพได้ อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบความถูกต้องการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 7.3 สำหรับการคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองเชิงพลวัต สามารถยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการยืนยันผลจากชุดทดสอบ ซึ่งผลการยืนยันและการอภิปรายผลดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 7.4

### 7.4 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ

การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณาสำหรับงานวิจัย จะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง เช่นเดียวกันกับการตรวจสอบถูกต้องของแบบจำลองพลวัตที่ได้รับการนำเสนอในบทที่ 4 และการยืนยันผลจากชุดทดสอบจะพิจารณาการต่อวงจรทดสอบเช่นเดียวกับวงจรในหัวข้อที่ 6.4 ของบทที่ 6 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 7.5 และ 7.6 ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ 7.5 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์



รูปที่ 7.6 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง

การยืนยันการขาดเสถียรภาพของระบบชุดทดสอบจากทฤษฎีบทค่าเจาะจง สามารถยืนยันได้ 2 วิธี คือ การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการทดลองจากชุดทดสอบจริง สำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 7.5 จะสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมมีค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) จาก 40 V ไปเป็น 78.74 V หรือจาก 80 W ไปเป็น 310 W ที่เวลา 4 วินาที จะทำให้ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) เกิดการกระเพื่อมของแรงดันที่เพิ่มมากขึ้น หรือเรียกว่า การขาดเสถียรภาพของระบบซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้วิเคราะห์ไว้แล้วดังรูปที่ 7.4 แต่สำหรับชุดทดสอบ การยืนยันผลในสถานะขาดเสถียรที่ค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 310 W ไม่สามารถทดลองได้เนื่องจากพิกัดของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดทดสอบมีค่าเพียง 245 W แต่อย่างไรก็ตาม การทำงานที่พิกัดของระบบจะต้องมีเสถียรภาพ ซึ่งแสดงผลการทดลองจากชุดทดสอบจริงได้ดังรูปที่ 7.6 โดยรูปที่ 7.6 เป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบ โดยกำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์มีค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต ( $V_o$ ) จาก 20 V ไปเป็น 70 V หรือจาก 20 W ไปเป็น 245 W ที่เวลา 1.25 วินาที จะเห็นได้ว่า ขนาดของแรงดันเอาต์พุตดีซี ( $V_{dc}$ ) เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณเพียงเล็กน้อย และเข้าสู่ในสถานะคงตัว หรือที่เรียกว่า การมีเสถียรภาพของระบบ ดังนั้น การวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองเชิงพลวัตที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สามารถคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยในรูปที่ 7.3 เกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยผลที่แสดงไว้ในบทนี้ แสดงให้เห็นว่าจุดที่ระบบขาดเสถียรภาพที่คาดเดาได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี มีค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และค่าที่ได้จากการทดสอบจริง

## 7.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 7 นี้แนะนำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง ซึ่งได้อาศัยองค์ความรู้ที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 4 และ บทที่ 6 ได้แก่ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพ และการสร้างชุดทดสอบ นำมาเป็นองค์ความรู้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการยืนยันผลจากชุดทดสอบ พบว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัย เกิดการขาดเสถียรภาพที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ค่าเท่ากับ 310 W ดังนั้น การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลัง หรือระบบที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยนี้คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงแบบบัคค์ ที่ได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง สำหรับการคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองเชิงพลวัตที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีการร่วมกัน

ระหว่างวิธีคิดและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สามารถคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ





## บทที่ 8

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ โดยงานวิจัยนี้ได้เริ่มจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมา คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ และงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้ ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้นถือเป็นพื้นฐานและองค์ความรู้ที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัยสำหรับการทำงานวิจัย ซึ่งผลงานวิจัยดังกล่าวได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 2

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติโดยใช้วิธีดีคิว ซึ่งเป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูงและเหมาะกับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส จากการสร้างแบบจำลองของวงจรดังกล่าว ถือเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญของผู้วิจัยที่สามารถนำไปพัฒนาในระบบที่พิจาณาสำหรับงานวิจัยนี้ได้ ซึ่งองค์ความรู้ต่างๆ ที่ได้รับจากบทที่ 3 คือ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีดีคิว การทำให้เป็นเชิงเส้น การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ โดยนำผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังพบว่าผลการเปรียบเทียบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นมีความถูกต้อง และสามารถนำไปคาดการณ์การวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ไว้แล้วด้วยวิธีดีคิว จากการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 สามารถคาดการณ์ที่ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ซึ่งเป็นเนื้อหาในบทที่ 4 โดยในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการร่วมกันระหว่างดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการหาแบบจำลอง โดยวิธีดีคิวใช้สำหรับการวิเคราะห์ในส่วนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปนำไปวิเคราะห์วงจรแปลงผันแบบบัคค์ ซึ่งในขั้นต้น ผู้วิจัยได้เริ่มจากการหาแบบจำลองของระบบที่

มีโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ไม่มีตัวควบคุม โดยได้อธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการหาแบบจำลองไว้ในบทที่ 4 พอสมควร ซึ่งผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของระบบดังกล่าวถือว่าเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำ จึงได้นำมาประยุกต์กับระบบที่มีโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ แบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทอร์เลอร์อันดับ 1 และนำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธีแบบดั้งเดิม จากนั้นได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น พบว่า ผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว ดังนั้น แบบจำลองของระบบที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยถือว่าเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำไปคาดเดาการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ไว้แล้ว จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 สามารถคาดเดาจุดที่ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ อีกทั้งยังได้นำเสนอผลการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อเสถียรภาพด้วย

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคก์ขนานกัน ซึ่งเป็นเนื้อหาในส่วนของบทที่ 5 โดยการสร้างแบบจำลองของระบบดังกล่าว ได้อาศัยองค์ความรู้จากการพิสูจน์หาแบบจำลองที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ซึ่งในขั้นต้น ผู้วิจัยได้เริ่มจากการพิสูจน์หาแบบจำลองเชิงพลวัต การทำให้เป็นเชิงเส้น การคำนวณค่าในสถานะคงตัว และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองของระบบดังกล่าวถือว่าเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำไปคาดเดาการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ไว้แล้ว จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 สามารถคาดเดาจุดที่ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ อย่างไรก็ตาม การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ อาจจะไม่เพียงพอต่อความน่าเชื่อถือมากนัก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการสร้างชุดทดสอบ เพื่อให้การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งการสร้างชุดทดสอบจะเป็นเนื้อหาในส่วนของบทที่ 6 คือ การสร้างชุดทดสอบของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ซึ่งผู้วิจัยได้พิจารณาการสร้างชุดทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโพลความต้านทาน และชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีโพลความต้านทาน เพื่อลดความยุ่งยากและการแก้ไขปัญหาการทดสอบวงจรเมื่อชุดทดสอบเกิดความ

บทพร้อมและเสียหาย สำหรับการทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดความต้านทาน ผู้วิจัยได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์และการเลือกอุปกรณ์ของชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบัคค์ อีกทั้งยังได้สร้างชุดทดสอบบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สำหรับเป็นตัวควบคุมให้กับชุดทดสอบวงจรดังกล่าว ซึ่งได้อธิบายความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 องค์ประกอบของชุดทดสอบ และวิธีใช้งานไว้พอสังเขป จากนั้น เมื่อชุดทดสอบดังกล่าวของทั้ง 2 ชุดมีความมั่นคงและให้ผลการทดสอบมีความถูกต้องแม่นยำ ผู้วิจัยได้นำชุดทดสอบทั้ง 2 ชุดมาเชื่อมต่อกัน เพื่อให้ชุดทดสอบมีความสอดคล้องกับระบบที่ได้รับการนำเสนอไว้บทที่ 4 ซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาในงานวิจัย จากผลการทดสอบการเขียนโปรแกรมตัวควบคุมแบบพีไอ ด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมโหลดความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งสามารถเป็นชุดทดสอบสำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบนั้น พารามิเตอร์จากชุดทดสอบจะต้องมีค่าเท่ากับพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง เนื่องจากพารามิเตอร์จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ ดังที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 ดังนั้น พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้มาจากการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของระบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว เพื่อจะทำให้พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีค่าที่สอดคล้องกับพารามิเตอร์ของชุดทดสอบ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบ ซึ่งเป็นเนื้อหาในส่วนของบทที่ 7 ได้อาศัยองค์ความรู้ที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 4 และ บทที่ 6 นำมาเป็นองค์ความรู้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบชุดทดสอบ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการยืนยันผลจากชุดทดสอบ พบว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัย เกิดการขาดเสถียรภาพที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ค่าเท่ากับ 310 W ดังนั้น การวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยคำนวณค่าเจาะจงจากแบบจำลองเชิงพลวัตที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สามารถคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบที่พิจารณาสำหรับงานวิจัย เกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งจุดที่ระบบขาดเสถียรภาพที่คาดเดาได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี มีค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และค่าที่ได้จากการทดสอบจริง

## 8.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- ควรมีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงด้วยการอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพมีความแม่นยำสูงยิ่งขึ้น

- ควรมีวงจรแยกที่พสำหรับการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อให้ระบบมีเสถียรเพิ่มมากขึ้น
- ควรพิจารณาแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบัคกั ภายใต้การทำงานในช่วงโหมดการนำกระแสแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous conduction mode:DCM) เพื่อให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบมีความหลากหลาย วิเคราะห์ระบบได้แบบไม่มีข้อจำกัด



## รายการอ้างอิง

- 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. **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)**.
- Baghrmian, A., and Forsyth, A.J. (2004). Averaged-Value Models of Twelve-Pulse Rectifiers for Aerospace Applications. **Power Electronics, Machines, and Drives (PEMD 2004)**.
- Chao, K-H. (2009). Dynamic Modeling and Robust Control of Multi-Module Parallel Soft-Switching-Mode Rectifiers. **WSEA Transactions on Systems**. 8: 659-672.
- 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**.
- 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.
- Emadi, A. (2004). Modeling and Analysis of Multiconverter DC Power Electronic Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. **IEEE Trans. on Indus. Elect.** 51(3): 661-668.
- Emadi, A. (2004). Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. **IEEE Trans. on Indus. Elect.** 51(5): 992-1000.

- 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.
- Gamelin, T.W. (2000). Complex Analysis.
- 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.
- 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.**
- Jianping Xu; Lee, C.Q. (1998). A unified averaging technique for the modeling of quasi-resonant converters. **IEEE Trans. on Power Electronics.** 13(3). : 556-563.
- Jusoh., A.B. (2004). The Instability Effect of Constant Power Loads. **National Power & Energy Conference (PECon).**
- Lipo, T. A., and Krause, P. C.(1969). Stability Analysis of a Rectifier-Inverter Induction Motor Drive. **IEEE Trans. on Power Electronics.** 88(1) : 55-66.
- Liutanakul, P., Pierfederici, S., Bilal, A., and Nahid-Mobarakeh, B. (2008). Stability investigation of inverter motor drive system with input filter - Optimisation of the DC-link capacitance value. **Power Electronics Specialists Conference.**
- Middlebrook, R.D. (1967). Input Filter Consideration in Design and Application of Switching Regulators. **IEEE Industry Application Society Annual Meeting.** : 366-382.
- 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.
- Mohan, N., Underland, T.M., and Robbins, W.P. (2003). Power Electronics: Converters, Applications, and Design. **John Wiley & Son.**
- Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Srikaew, A., and Sujitjorn, S. (2002). System Identification via Adaptive Tabu Search. **IEEE ICIT'02.**

- 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.
- 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.
- Sanders, S. R., Noworolski, J. M., Liu, X. Z., and Verghese, G.C.(1991). Generalized Averaging Method for Power Conversion Circuits. **IEEE Trans. on Power Electronics.** 6(2): 251-259.
- 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.
- Sun, J., and Colon, J.(2006). Input Impedance Modeling of Line-Frequency Rectifiers by the Method of Impedance Mapping. **IEEE Compel Workshop.**
- Tsang, K.M., and Chan, W.L. (2005). Cascade controller for DC/DC buck convertor. **IEE Proceedings Electric Power Applications.** 152(4): 827-831.



ภาคผนวก ก

โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราฟสัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



```

*****
ก.1 โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – رافสัน สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟส
แบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ โดยนายเทพพนม โสภานิมิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2554
*****

%%%ประกาศตัวแปรเพื่อกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณค่าในสถานะคงตัว%%%

Vs=50;
f=50;
Req=0.1;
Leq=24e-6;
Ceq=2e-9;
Pcp11=30;
w=2*pi*f;
ru=3*w*Leq/pi;
Sd=sqrt(3/2)*2*sqrt(3)/pi;
r=atand(w*Leq/Req);
Z=sqrt(Req^2+(w*Leq)^2);
Vout_rms=1.6554*sqrt(2)*Vs;
P_Total=Pcp11;
eaVbus=100;
ealampda=100;
es=1e-10;
k=0;

%%%ลูปโปรแกรมการค้นหาค่าด้วยวิธีของนิวตัน – رافสัน%%%

while eaVbus>=es & ealampda>=es
    if k~=0
        du= Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*cosd(r)/Z;
        DU=Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z;
        dv= Vs*sind(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*sind(r)/Z;
        DV=-Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z;
        U= Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*cosd(r)/Z - P_Total/3;

```

```

V= Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*sind(r)/Z;
Vbus(k+1)= Vbus(k)- (U*Dv-V*DU)/(du*Dv-DU*dv);
lampda(k+1)= lampda(k)- (V*du-U*dv)/(du*Dv-DU*dv);
eaVbus=abs((Vbus(k+1)-Vbus(k))/Vbus(k+1))*100 ;
ealampda=abs((lampda(k+1)-lampda(k))/lampda(k+1))*100;
V_bus=Vbus(k+1);
L=lampda(k+1);
A1=Vs-Vbus(k+1)*(cosd(lampda(k+1))-i*sind(lampda(k+1)));
B1=Z*(cosd(r)+i*sind(r));
Idc=(pi/(sqrt(6)))*abs(A1/B1)
Vout(k+1)=(3*sqrt(6)*Vbus(k+1)/pi) - 3*Leq*w*Idc/pi - rf*Idc;
V=Vout(k+1)
else
Vbus(k+1)=50;
lampda(k+1)=0.0001;
end
k=k+1;
end
%%ค่าสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณของลูปโปรแกรมการค้นหาค่าด้วยวิธีของนิวตัน - ราวสิ้น%%
Lampda=L;
vdc=V;

```

\*\*\*\*\*

ก.2 โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – رافสัน สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟส  
แบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม โดย นายเทพพนม โสภานเพิ่ม  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2554

\*\*\*\*\*

%%%ประกาศตัวแปรเพื่อกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณค่าในสถานะคงตัว%%%

Vs=220;

f=50;

Req=0.1;

Leq=24e-6;

Ceq=2e-9;

%%%โปรแกรมการออกแบบพารามิเตอร์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์%%%

R=20;

L= 14.186e-3;

C= 125e-6;

Vi=514;

N=50;

damping=0.7;

K1=1/(R\*C);

Wn=1/(R\*C)

Kpv=1/R

Kiv=1/(C\*R^2)

K2=((N^2)\*(Wn^2)\*L)/Vi;

T=(2\*damping)/(N\*Wn);

Kpi=K2\*T

Kii=K2

v1o=100;

w=2\*pi\*f;

ru=3\*w\*Leq/pi;

Sd=sqrt(3/2)\*2\*sqrt(3)/pi;

r=atand(w\*Leq/Req);



```

Z=sqrt(Req^2+(w*Leq)^2);
P_Total=(v1o^2)/R;
eaVbus=100;
ealampda=100;
es=1e-10;
k=0;
%%%%อุปโปรแกรมการค้นหาค่าด้วยวิธีของนิวตัน – ราวสัน%%
while eaVbus>=es & ealampda>=es
    if k~=0
        du= Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*cosd(r)/Z;
        DU=Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z;
        dv= Vs*sind(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*sind(r)/Z;
        DV=-Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z;
        U= Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*cosd(r)/Z - P_Total/3;
        V= Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*sind(r)/Z;
        Vbus(k+1)= Vbus(k)- (U*DV-V*DU)/(du*Dv-DU*dv);
        lampda(k+1)= lampda(k)- (V*du-U*dv)/(du*Dv-DU*dv);
        eaVbus=abs((Vbus(k+1)-Vbus(k))/Vbus(k+1))*100 ;
        ealampda=abs((lampda(k+1)-lampda(k))/lampda(k+1))*100;
        V_bus=Vbus(k+1);
        L=lampda(k+1);
        A1=Vs-Vbus(k+1)*(cosd(lampda(k+1))-i*sind(lampda(k+1)));
        B1=Z*(cosd(r)+i*sind(r));
        Idc=(pi/(sqrt(6)))*abs(A1/B1);
        Vout(k+1)=(3*sqrt(6)*Vbus(k+1)/pi) - 3*Leq*w*Idc/pi - rf*Idc;
        V=Vout(k+1);
    else
        Vbus(k+1)=220;
        lampda(k+1)=0.0001;
    end
    k=k+1;

```

end

%%%ค่าสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณของลูปโปรแกรมการค้นหาด้วยวิธีของนิวตัน – رافสัน%%%

Lampda=L;

vdc=V;

%%%ค่าที่ได้จากการคำนวณค่าในสภาวะคงตัวสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักค์%%%

vo=v1o;

iL=vo/R;

Xv=((iL)+(Kpv\*vo)-(Kpv\*v1o))/Kiv;

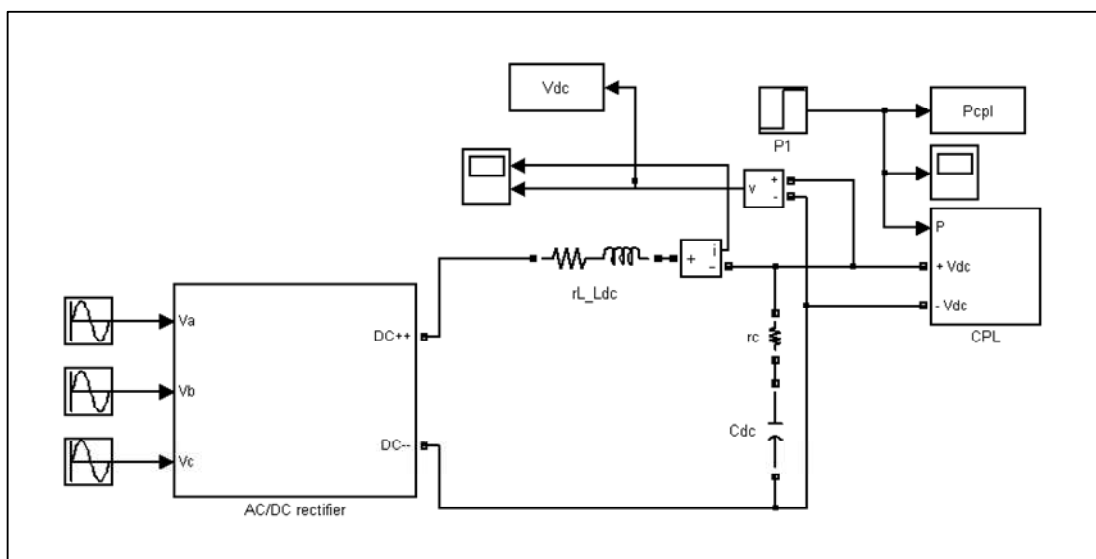
Xi=(vo)/(vdc\*Kii);



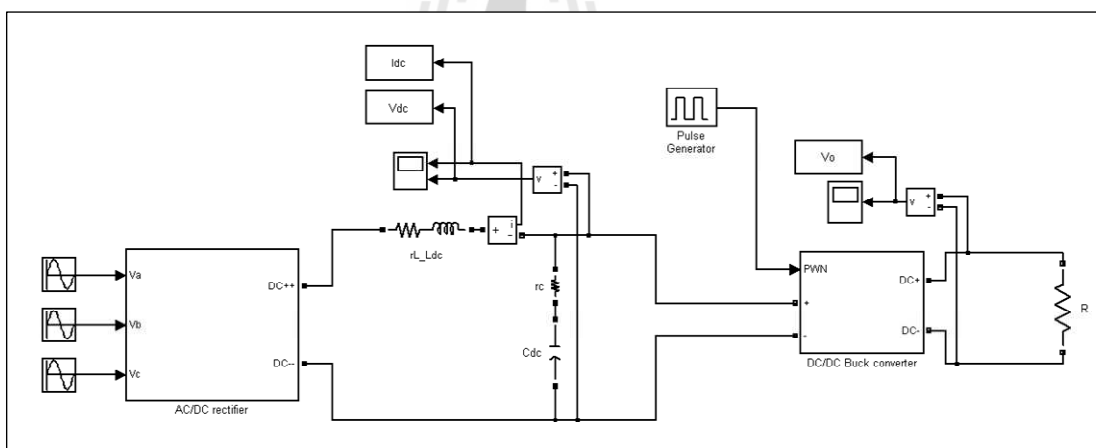


ภาคผนวก ข

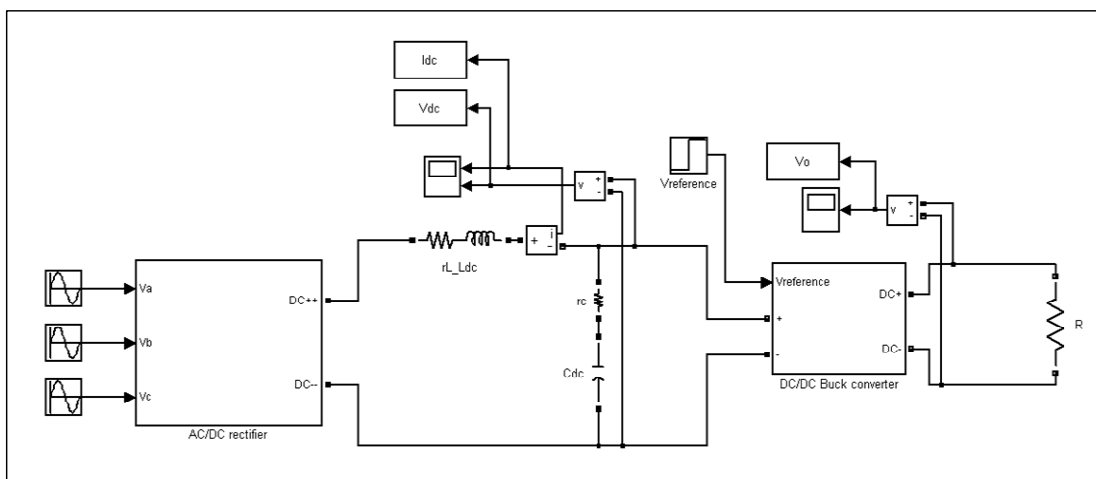
ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB



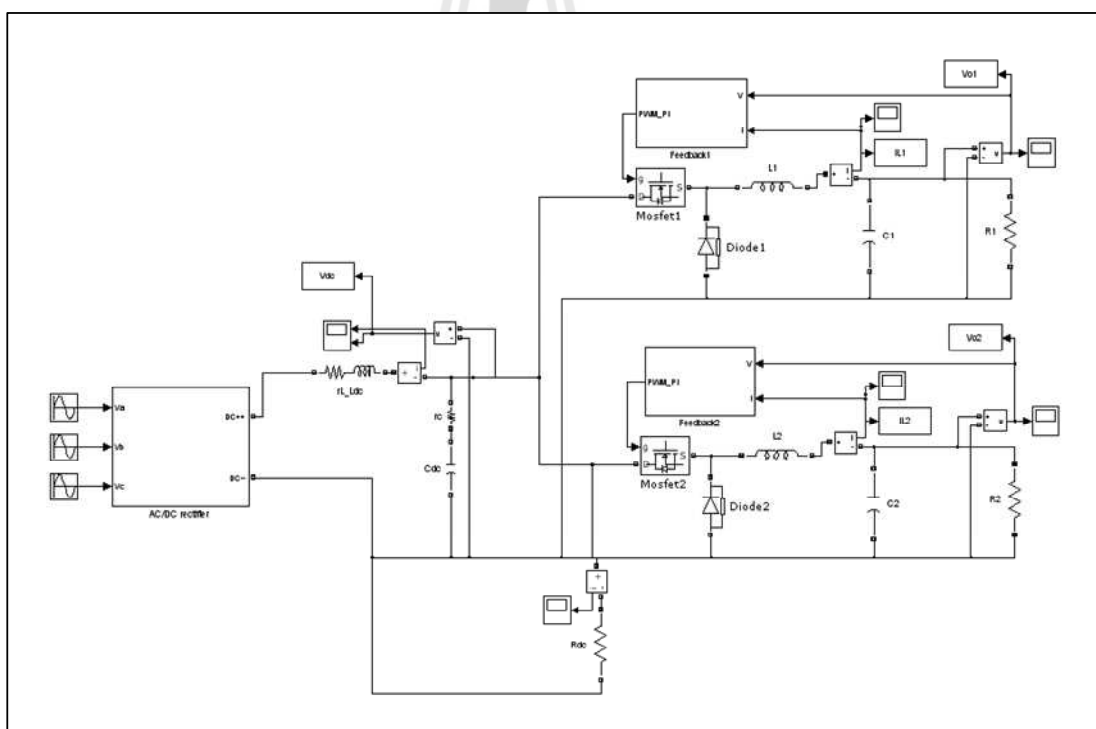
รูปที่ ข.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบออดมคติ



รูปที่ ข.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ไม่มีตัวควบคุม



รูปที่ ข.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์  
ที่มีการตัวควบคุม



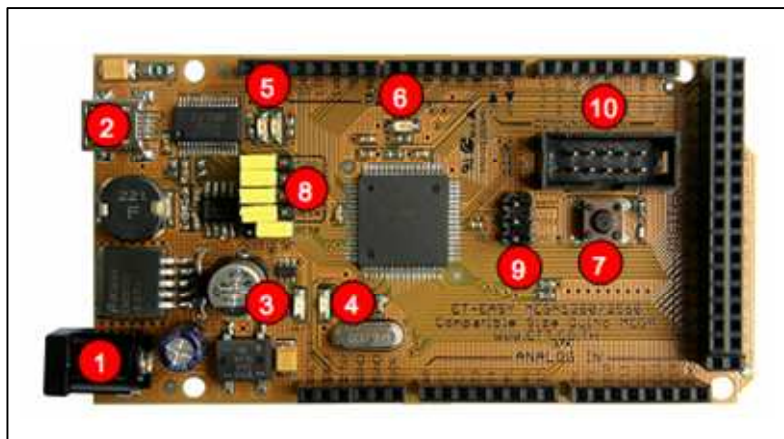
รูปที่ ข.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์  
ขนานกัน





ภาคผนวก ค

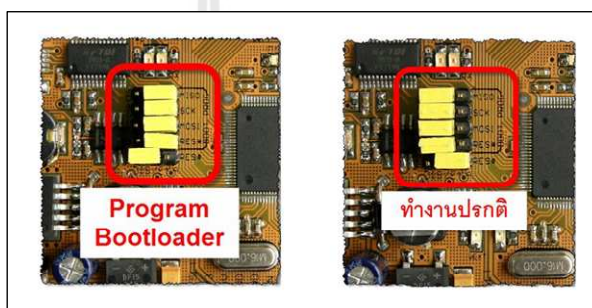
โครงสร้างชุดบอร์ด ET-EASY1280



รูปที่ ค.1 โครงสร้างบอร์ด ET-EASY MEGA1280

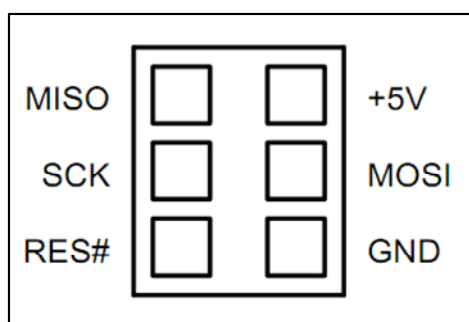
- หมายเลข 1 คือ ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงจากภายนอก สามารถใช้ได้กับแหล่งจ่ายทั้งแบบ AC และ DC พร้อมวงจร Bridge Rectifier และ Regulate แบบ Switching ช่วยลดความร้อนของ IC Regulate เมื่อมีการดึงกระแสมากๆ ได้เป็นอย่างดี สามารถใช้กับแรงดัน Input 7-20V
- หมายเลข 2 เป็นขั้วต่อ USB สำหรับติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ PC โดยใช้ FT232RL เป็น USB Bridge ในการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ PC และ MCU ในบอร์ด และยังสามารถใช้ไฟจาก พอร์ต USB เป็นแหล่งจ่ายให้กับบอร์ดได้ด้วย โดยจะมี Poly Fuse ขนาด 500 mA สำหรับป้องกันการดึงกระแสเกินจากพอร์ต USB ด้วย และที่พิเศษคือมีวงจรสำหรับตรวจสอบแหล่งจ่าย เพื่อสลับการใช้งานแหล่งจ่ายจาก USB ไปเป็น External Supply ได้เอง โดยอัตโนมัติ โดยเมื่อไม่ได้ต่อ External Supply บอร์ดจะใช้ไฟจากพอร์ต USB เป็นแหล่งจ่ายในการทำงาน แต่เมื่อมีการต่อ External Supply วงจรจะสลับไปใช้แหล่งจ่ายจาก External Supply เองโดยอัตโนมัติ
  - LED +VCC ใช้แสดงสถานะเมื่อมีการจ่ายไฟให้กับบอร์ด
  - LED VEXT ใช้แสดงสถานะเมื่อมีการจ่ายไฟจาก External Supply
- หมายเลข 3 เป็น LED VEXT ใช้แสดงสถานะเมื่อมีการจ่ายไฟเลี้ยงจาก External Supply
- หมายเลข 4 เป็น LED +VCC ใช้แสดงสถานะของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง (+VCC) ของบอร์ด โดยเมื่อบอร์ดใช้แหล่งจ่ายจาก External Supply จะแสดงสถานะโดยการให้ LED VEXT และ LED +VCC ติดสว่างพร้อมกันทั้งคู่ แต่ถ้าบอร์ดใช้แหล่งจ่ายจากพอร์ต USB จะแสดงสถานะโดยการให้ LED +VCC ติดสว่างเพียงดวงเดียว

- หมายเลข 5 เป็น LED แสดงสถานะของ RX และ TX ใช้สำหรับแสดงการรับส่งข้อมูลระหว่างบอร์ด ET-EASY MEGA1280 กับคอมพิวเตอร์ PC ผ่านทางพอร์ต USB
- หมายเลข 6 เป็น LED D13 ใช้สำหรับแสดงการทำงานของ Bootloader และใช้ทดสอบการทำงานของบอร์ดจากการควบคุมของ Pin Digital-13 ทำงานด้วย Logic “1” และ หยุดทำงานด้วย Logic “0”
- หมายเลข 7 เป็นสวิตช์ Reset ใช้สำหรับส่ง Reset การทำงานของบอร์ด
- หมายเลข 8 เป็นชุด Jumper สำหรับเลือก การ Program Bootloader ผ่าน USB Port และ การใช้งานตามปกติ



รูปที่ ค.2 Jumper สำหรับเลือก การ Program Bootloader

- หมายเลข 9 เป็นขั้วต่อ AVRISP ใช้สำหรับ Download Code ให้กับ MCU โดยขั้วต่อ AVRISP นี้จะสามารถใช้งานได้กับเครื่องโปรแกรมทุกรุ่นที่รองรับการใช้งานกับ ATMEGA1280 และใช้ขั้วต่อ ตรงตามมาตรฐาน AVRISP ดังรูปที่ ค.3 ดังนี้



รูปที่ ค.3 ขั้วต่อ AVRISP

- หมายเลข 10 เป็นขั้วต่อสัญญาณจาก D[22..29] สำหรับเชื่อมต่อกับบอร์ด I/O ของ อีทีที รวมทั้งจอแสดงผล LCD โดยใช้ร่วมกับ 10PIN LCD หรือ ET-CONV SPI TO LCD





ภาคผนวก ง

พอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**Port A (PA7...PA0)**

พอร์ต A เป็นไอ/โอพอร์ตแบบทำงาน 2 ทิศทาง (bi-directional I/O port) ขนาด 8 บิต ที่มีวงจรถวลอ์พอยู่ภายใน (เลือกได้เป็นรายบิต) จึงสามารถทำงานเป็นเอาต์พุตได้ทั้งแบบซิงค์และซอร์ส

**Port B (PB7...PB0)**

พอร์ต B เป็นไอ/โอพอร์ตแบบทำงาน 2 ทิศทาง ขนาด 8 บิต ที่มีวงจรถวลอ์พอยู่ภายใน (เลือกได้เป็นรายบิต) สามารถทำงานเป็นเอาต์พุตได้ทั้งแบบซิงค์และซอร์ส จุดเด่นของพอร์ตนี้ก็คือ เป็นพอร์ตที่มีความสามารถในการขับเคลื่อนได้ดีกว่าพอร์ตอื่นๆ

**Port C (PC7...PC0)**

พอร์ต C เป็นไอ/โอพอร์ตแบบทำงาน 2 ทิศทาง ขนาด 8 บิต ที่มีวงจรถวลอ์พอยู่ภายใน (เลือกได้เป็นรายบิต) จึงสามารถทำงานเป็นเอาต์พุตได้ทั้งแบบซิงค์และซอร์ส

**Port D (PD7...PD0)**

พอร์ต D เป็นไอ/โอพอร์ตแบบทำงาน 2 ทิศทาง ขนาด 8 บิต ที่มีวงจรถวลอ์พอยู่ภายใน (เลือกได้เป็นรายบิต) จึงสามารถทำงานเป็นเอาต์พุตได้ทั้งแบบซิงค์และซอร์ส

**Port E (PE7...PE0)**

พอร์ต E เป็นไอ/โอพอร์ตแบบทำงาน 2 ทิศทาง ขนาด 8 บิต ที่มีวงจรถวลอ์พอยู่ภายใน (เลือกได้เป็นรายบิต) จึงสามารถทำงานเป็นเอาต์พุตได้ทั้งแบบซิงค์และซอร์ส

**Port F (PF7...PF0)**

พอร์ต F รองรับการนำเข้ามาเพื่อทำการแปลงสัญญาณแอนาลอกมาเป็นดิจิทัล

พอร์ต F เป็นไอ/โอพอร์ตแบบทำงาน 2 ทิศทาง ขนาด 8 บิต ที่มีวงจรถวลอ์พอยู่ภายใน (เลือกได้เป็นรายบิต) จึงสามารถทำงานเป็นเอาต์พุตได้ทั้งแบบซิงค์และซอร์ส

พอร์ต F รองรับหน้าที่การเชื่อมประสานกับ JTAG และถ้ามีการเปิดการทำงานการเชื่อมประสานกับ JTAG ตัวพวลอ์พของขา PF7(TDI), PF5(TMS), และ PF4(TCK) จะทำงานจนกว่าจะเกิดการรีเซ็ต

**Port G (PG5...PG0)**

พอร์ต G เป็นไอ/โอพอร์ตแบบทำงาน 2 ทิศทาง ขนาด 8 บิต ที่มีวงจรถวลอ์พอยู่ภายใน (เลือกได้เป็นรายบิต) จึงสามารถทำงานเป็นเอาต์พุตได้ทั้งแบบซิงค์และซอร์ส

**Port H (PH7...PH0)**

พอร์ต H เป็นไอ/โอพอร์ตแบบทำงาน 2 ทิศทาง ขนาด 8 บิต ที่มีวงจรถวลอ์พอยู่ภายใน (เลือกได้เป็นรายบิต) จึงสามารถทำงานเป็นเอาต์พุตได้ทั้งแบบซิงค์และซอร์ส

**Port J (PJ7...PJ0)**

พอร์ต J เป็นไอ/โอพอร์ตแบบทำงาน 2 ทิศทาง ขนาด 8 บิต ที่มีวงจรพูลอัพอยู่ภายใน (เลือกได้เป็นรายบิต) จึงสามารถทำงานเป็นเอาต์พุต ได้ทั้งแบบซิงค์และชอร์ส

**Port K (PK7...PK0)**

พอร์ต K รองรับการนำเข้าเพื่อทำการแปลงสัญญาณแอนาลอกมาเป็นดิจิทัล

พอร์ต K เป็นไอ/โอพอร์ตแบบทำงาน 2 ทิศทาง ขนาด 8 บิต ที่มีวงจรพูลอัพอยู่ภายใน (เลือกได้เป็นรายบิต) จึงสามารถทำงานเป็นเอาต์พุต ได้ทั้งแบบซิงค์และชอร์ส

**Port L (PL7..PL0)**

พอร์ต L เป็นไอ/โอพอร์ตแบบทำงาน 2 ทิศทาง ขนาด 8 บิต ที่มีวงจรพูลอัพอยู่ภายใน (เลือกได้เป็นรายบิต) จึงสามารถทำงานเป็นเอาต์พุต ได้ทั้งแบบซิงค์และชอร์ส





ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

โปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



\*\*\*\*\*

จ.1 โปรแกรมการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR  
 โดยนายเทพพนม โสภานเพิ่ม สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
 พ.ศ. 2554

\*\*\*\*\*

```
#include <avr/io.h>

int EN = 11;          %กำหนดให้พินที่ 11 สำหรับสร้างสัญญาณ PWM
int duty_cycle =0;   %กำหนดให้วัฏจักรหน้าที่เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0 %

void setup()
{
  %%%กำหนดโหมดการสร้างสัญญาณ PWM%%%
  pinMode(EN, OUTPUT);
  TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A0);
  TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B0);
  TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
  TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);
  TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS00);
  ICR1 = 800;
  OCR1A = 0;
  OCR1B = 0;
  TCNT0=0;
}

void loop()
{
  duty_cycle = 10;    % ทดสอบที่วัฏจักรหน้าที่เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 10 %
  OCR1A = duty_cycle;
}

```

\*\*\*\*\*

จ.2 โปรแกรมการสร้างตัวควบคุมแบบพีไอด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

โดยนายเทพพนม โสภานันท์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พ.ศ. 2554

\*\*\*\*\*

```
#include <avr/io.h>
```

```
int EN = 11;
```

```
float setpoint=0;
```

```
%%%กำหนดพารามิเตอร์ของลูปแรงดันไฟฟ้า%%%
```

```
///voltage///
```

```
float err_v,Upv,Uiv,Uiv_1,Upi_v;
```

```
float kp2=0.05;
```

```
float kiv2=20;
```

```
%%%กำหนดพารามิเตอร์ของลูปกระแสไฟฟ้า%%%
```

```
///current///
```

```
float err_i,Upi,Uii,Uii_1,Upi_i;
```

```
float kpi2=3.41;
```

```
float kii2=48645;
```

```
int Upi_max=800,Upi_min=0;
```

```
%%% กำหนด sampling time %%%
```

```
float Ts=0.00045; // ms
```

```
%%%พินสำหรับรับสัญญาณจากชุดตัวตรวจจับ%%%
```

```
int voltage_sensor = 1;
```

```
int current_sensor = 0;
```

```
%%%กำหนดตัวแปรรับสัญญาณจากชุดตัวตรวจจับมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 %%%
```

```
float SumVoltage=0, SumCurrent=0;
```

```
int Read_Voltage=0, Read_Current=0;
```

```
float V1=0, V2=0, I1=0, I2=0;
```

```

void setup()
{
  %%%กำหนดโหมดการสร้างสัญญาณ PWM%%
  pinMode(EN, OUTPUT);
  TCCR1A = (1<<COM1A1)|(1<<COM1A1);
  TCCR1A |= (1<<COM1B1)|(1<<COM1B1);
  TCCR1B = (1<<WGM13)|(0<<WGM12);
  TCCR1A |= (0<<WGM11)|(0<<WGM10);
  TCCR1B |= (0<<CS12)|(0<<CS11)|(1<<CS10);
  ICR1 = 800;
  OCR1A = 0;
  OCR1B = 0;
  TCNT1=0;
}
void loop()
{
  while(1)
  {
    %%%รับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า%%
    SumVoltage=0, SumCurrent=0;
    Read_Voltage = analogRead(voltage_sensor);
    Read_Current = analogRead(current_sensor);
    V1 = (((float)SumVoltage/n)/1023)*5;
    I1 = (((float)SumCurrent/n)/1023)*5;
    %%% ปรับปรุงเป็นค่าจริง%%
    V2=V1*23.98;
    I2=I1*1.25;
    %%% เข้าสู่ลูปแรงดันไฟฟ้าของตัวควบคุมแบบพีไอ%%
    err_v=setpoint-V2;
    Upv=kpv2*err_v;
    Uiv=(kiv2*Ts*err_v)+Uiv_1;
  }
}

```

```

Upi_v=Upv+Uiv; // PI value
if (Upi_v >= Upi_max)
{
    Upi_v=Upi_max;
}
else if (Upi_v <=Upi_min)
{
    Upi_v=Upi_min;
}
%%% เข้าสู่ลูปกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมแบบพีไอ%%%
err_i=Upi_v-I2;
Upi=kpi2*err_i;
Uii=(kii2*Ts*err_i)+Uii_1;
Upi_i=Upi+Uii;
if (Upi_i >= Upi_max)
{
    Upi_i=Upi_max;
}
else if (Upi_i <=Upi_min)
{
    Upi_i=Upi_min;
}
%%% ส่งค่า PWM ไปยังพินที่ 11 %%%
OCR1A = Upi_i;
Uiv_1=Uiv;
Uii_1=Uii;
}
}

```



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- Sopapirm, T., Areerak, K-N., Areerak, K-L. (2011). **Mathematical Model of a Three-Phase Diode Rectifier Feeding a Controlled Buck Converter**. International Review on Modelling and Simulations. 4(4): 1426-1439.
- Sopapirm, T., Areerak, K-N., Areerak, K-L. (2011). **The Mathematical Model of a Three-Phase Diode Rectifier with Multi-Converter Power Electronic Loads**. 11<sup>th</sup> WSEAS/IASME International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines (POWER'11). : 100-105.
- Sopapirm, T., Areerak, K-N., Areerak, K-L. (2012). **The Averaging Model of a Six-Pulse Diode Rectifier Feeding Paralleled Buck Converters**. International Journal of Mathematics and Computers in Simulation. 6(1): 58-65.



## ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

กองพล อารีรักษ์ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี โท และเอก ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2543 2546 และ 2550 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ และหัวหน้าหน่วยวิจัยคุณภาพกำลังไฟฟ้า ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความชำนาญทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง วงจรรอกกำลังแอคทีฟ การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า คุณภาพกำลังไฟฟ้า ระบบควบคุม และการประยุกต์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์



## ประวัตินักวิจัย

กองพัน อารีรักษ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี และปริญญาโททางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2543 และ 2544 ตามลำดับ สำเร็จการศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยทุนกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากมหาวิทยาลัยนอตติงแฮม ประเทศอังกฤษ เมื่อปี พ.ศ. 2552 ด้วยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยเน้นทางด้านระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน ภายหลังจากสำเร็จการศึกษา ได้ดำเนินงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง ซึ่งงานวิจัยที่มีความชำนาญ จะเน้นไปทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ การประยุกต์วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับปัญหาทางวิศวกรรม ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า ตลอดจนทฤษฎีระบบควบคุม ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ และหัวหน้ากลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เครื่องจักรกล และการควบคุม ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

