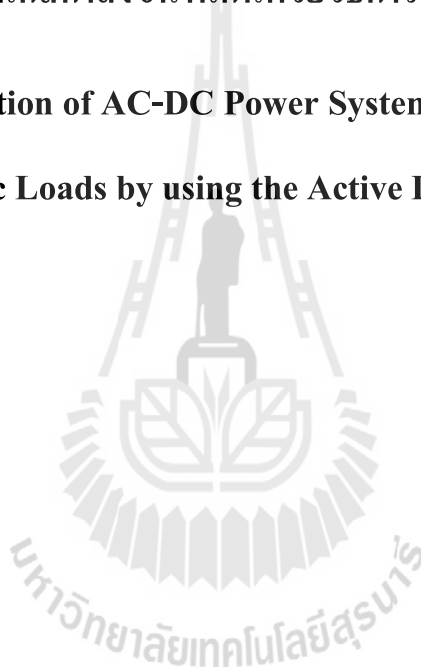




รายงานการวิจัย

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น
อิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกันด้วยวิธีการหน่วงแบบแอคทีฟ
(Instability Mitigation of AC-DC Power System feeding Paralleled Power
Electronic Loads by using the Active Damping Method)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น
อิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกันด้วยวิธีการหน่วงแบบแอคทีฟ
(Instability Mitigation of AC-DC Power System feeding Paralleled Power
Electronic Loads by using the Active Damping Method)

หัวหน้าโครงการวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เครื่องจักรกล พลังงาน และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

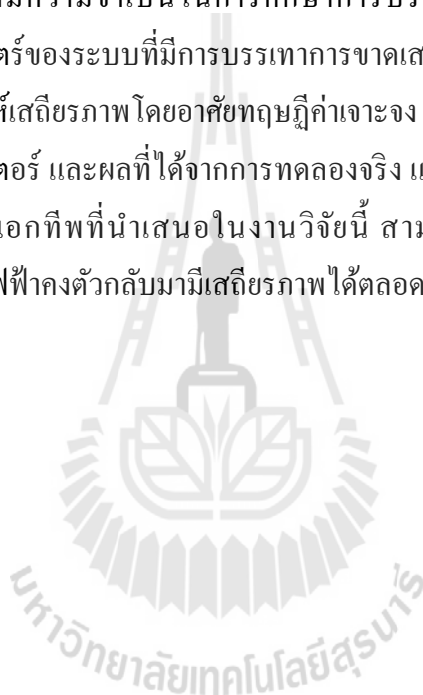
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2559

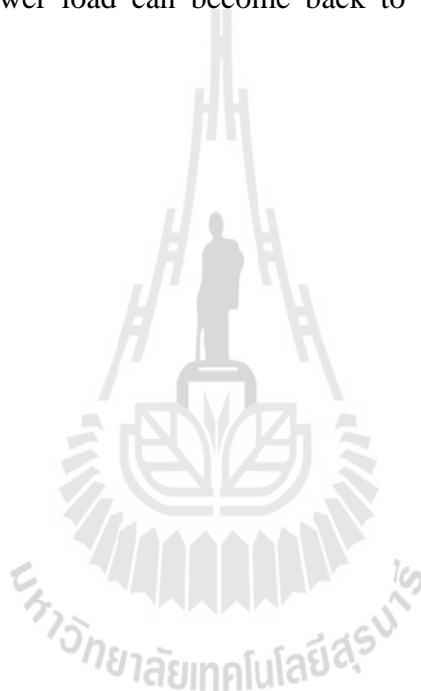
บทคัดย่อ

ในวิจัยนี้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแยกทีพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งขนานกัน วงจรแปลงผันที่มีการควบคุมดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมเป็นอย่างมาก การขาดเสถียรภาพจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการศึกษาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแยกทีพ สำหรับนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยทฤษฎีค่าเจาะจง จากผลการศึกษาผ่านทางกรจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ และผลที่ได้จากการทดลองจริง แสดงให้เห็นว่าระบบที่มีการควบคุมด้วยวิธีการหน่วงแบบแยกทีพที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวกลับมามีเสถียรภาพได้ตลอดย่านการทำงาน



Abstract

This research presents the instability mitigation of AC-DC power system feeding paralleled controlled buck converters by using an active damping method. Power converters with their controls normally behave as constant power loads. These loads can significantly degrade power system stability margin and system performance. Therefore, it is necessary to study the instability mitigation technique for improving the system stability. The active damping method is therefore illustrated in the research. The simulation and experimental results show that the unstable system due to a constant power load can become back to the stable operation using the proposed technique.

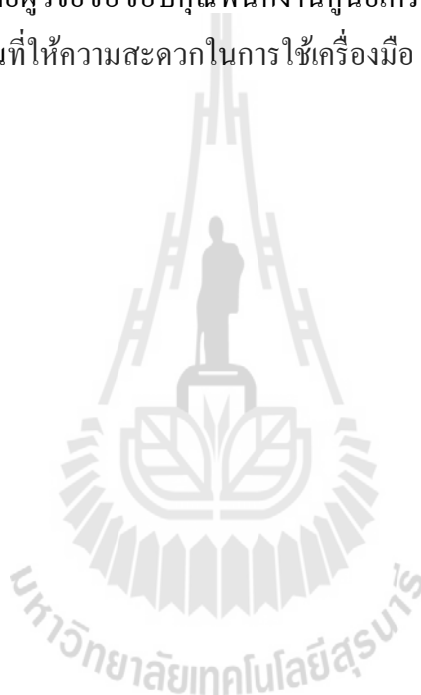


กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นสีเขียวที่มีโพลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกันด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ นายเทพพนม โสภะเพิ่ม ที่เป็นผู้ช่วยวิจัย ที่มีความทุ่มเท และการเอาใจใส่อย่างยิ่งในการทำงานวิจัย สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณพนักงานศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 3 ทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

กองพัน อารีรักษ์

ตุลาคม 2559



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.6 การจัดรูปแบบรายงานวิจัย.....	6
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ.....	7
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	9
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและงานวิจัยที่ได้รับการ พัฒนาในงานวิจัยนี้.....	16
2.6 สรุป.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง	
	เอเชียเป็นดัชนีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ขนานกัน.....	20
3.1	บทนำ.....	20
3.2	ผลของ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟส	
	แบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ขนานกัน.....	20
3.2.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	20
3.3	การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ.....	23
3.3.1	ระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบ	
	แอกทีฟ.....	23
3.3.2	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีตีคว	
	และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป.....	25
3.3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ.....	35
3.3.4	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียร	
	ภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ.....	38
3.4	สรุป.....	41
4	การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ	
	ด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ.....	43
4.1	บทนำ.....	43
4.2	การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วย	
	วิธีการห้วงแบบแอกทีฟ.....	43
4.2.1	อุปกรณ์ที่ใช้สร้างระบบไฟฟ้าที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรด้วยวิธี	
	การห้วงแบบแอกทีฟ.....	45
4.2.2	การโปรแกรมระบบควบคุมการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธี	
	การห้วงแบบแอกทีฟ.....	57
4.3	การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ.....	59
4.4	สรุป.....	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	65
5.1	สรุป.....	65
5.2	สรุปประเด็นของงานวิจัย.....	67
5.3	ข้อเสนอเพิ่มงานวิจัยในอนาคต.....	68
	รายการอ้างอิง.....	69
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราฟสัน.....	74
	ภาคผนวก ข. โครงสร้างชุดบอร์ด ET-EASY MAGA1280.....	78
	ภาคผนวก ค. พอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MAGA1280.....	82
	ภาคผนวก ง. โปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino.....	85



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ.....	8
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	10
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	13
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	16
3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 3.4.....	36



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพสรุปแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....15
2.2	แผนภาพสรุปการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ.....18
3.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และโหลดตัวต้านทานขนานกัน.....21
3.2	ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ทั้ง 2 มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 – 400 W.....22
3.3	การยืนยันผลการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์.....23
3.4	ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาการหน่วงแบบแอกทีฟ.....24
3.5	วงจรสมมูลที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว.....25
3.6	สัญญาณการสวิทช์ของระบบที่พิจารณา.....26
3.7	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB.....36
3.8	ผลการเปลี่ยนแปลงโหลดวงจรแปลงผัน เมื่อค่า $r_{LA} = 0.01 \Omega$37
3.9	ผลการเปลี่ยนแปลงค่า r_{LA} ที่มีผลต่อเสถียรภาพ โดยที่กำหนดให้ผลรวมของวงจร แปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่า 350 W.....39
3.10	ผลการเปลี่ยนแปลงค่า r_{LA} ที่มีผลต่อเสถียรภาพ โดยที่กำหนดให้ผลรวมของวงจร แปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่า 400 W.....39
3.11	การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อผลรวมระดับกำลังไฟฟ้า ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 350 W.....40
3.12	การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อผลรวมระดับกำลังไฟฟ้า ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 400 W.....41
4.1	ระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ.....44
4.2	แผนภาพการทำงานของวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟภายในบอร์ด AVR เบอร์ Atmega1280..44
4.3	ภาพการต่อวงจรชุดทดสอบ.....45
4.4	หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้ รุ่น IBC-VR3000-3.....46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ไดโอดรุ่น VS-26MT160.....46
4.6	วงจรวงจรการหน่วงแบบแอกทีฟ.....47
4.7	ภาพการต่อวงจรชุดทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า.....47
4.8	ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280.....48
4.9	ภาพการต่อใช้งานมอดู LCD.....52
4.10	การต่อสัญญาณแบบคีย์สวิตช์.....54
4.11	มอดูลการสวิตช์ของวงจรการหน่วงแบบแอกทีฟ.....55
4.12	ไดโอดวงจรการหน่วงแบบแอกทีฟ.....55
4.13	ตัวเหนี่ยวนำ L_{dc} ขนาดเท่ากับ 37.7 mH.....56
4.14	ตัวเก็บประจุ C_{dc} ขนาดเท่ากับ 237.35 μ F.....56
4.15	ชุดวงจรแปลงผันแบบบักกิ้ง.....56
4.16	ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 20 Ω57
4.17	แผนภูมิการโปรแกรมของวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ.....58
4.18	ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพโดยกำหนดให้ ผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 350 W.....59
4.19	ผลการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า r_{LA} มีค่าเท่ากับ 0.01
4.20	ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพโดยกำหนดให้ ผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 400 W.....61
4.21	ผลการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า r_{LA} มีค่าเท่ากับ 0.06.....62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน โหลดทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น วงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี และเอซีเป็นเอซี ที่ต่อกับโหลดมอเตอร์ไฟฟ้า หรือโหลดความต้านทาน ที่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ หรือมีการควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ติดคร่อมโหลดตัวต้านทาน ได้รับความนิยมนำใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ดังเช่น การใช้งานในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน เรือดำน้ำ รถไฟฟ้า หรือระบบการควบคุมในกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจาก โหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลังดังกล่าว ให้ประสิทธิภาพสูง การดูแลบำรุงรักษาต่ำ และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย ไม่ซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตาม โหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุม จะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power loads: CPL) เมื่อนำโหลดชนิดดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรอง จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ (Middlebrook R.D., 1997; Emadi A., Fahimi B. and Ehsani M., 1999; Emadi A., Khaligh A., Rivetta C.H. and Williamson G.A., 2006; Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G. and Thomos D.W.P., 2008) จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาและการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อสามารถนำไปใช้ในการคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพและหลีกเลี่ยงปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อระบบควบคุมได้ ดังนั้นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความจำเป็นต่อการนำมาใช้พิจารณาเสถียรภาพของระบบ ซึ่งการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี หรือดีซีเป็นดีซี ส่วนใหญ่จะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) เนื่องจากผลการสวิตช์ในวงจร เมื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะมีความยุ่งยากและซับซ้อน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องหาวิธีการในการทำแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time - invariant model) ซึ่งพบว่า วิธีที่นิยมกันมากในปัจจุบันมีด้วยกัน 3 วิธี โดยวิธีที่ 1 เรียกว่าวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging: GSSA) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายสำหรับการหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี (DC distribution system) (Emadi A., Ehsani M. and Miller J.M., 2004) รวมถึงวงจรเรียงกระแสที่มีการควบคุมและไม่มีการควบคุมในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส (Glover S.F., 2003) และวงจรเรียงกระแสแบบหก

และลีสองพัลส์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส (Baghrmian A. and Forsyth A.J., 2004) แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวถ้านำมาใช้กับระบบสามเฟส แบบจำลองที่ได้จะมีความซับซ้อน ซึ่งยากต่อการนำไปวิเคราะห์ระบบต่อไป แต่ข้อดีของวิธีการนี้คือ เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะมีความแม่นยำ และไม่ซับซ้อน วิธีที่ 2 คือ วิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear average-value) วิธีการนี้ใช้สำหรับหาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสแบบหกและลีสองพัลส์ (Uan-Zo-li A., Burgos R.P., Lacaux F., Wang F. and Boroyevich D., 2004) ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่าย แต่มีข้อเสียคือ ไม่สามารถหาแบบจำลองกับระบบที่มีความซับซ้อนได้ เช่น ระบบที่มีการต่อขนานกันของวงจรแปลงผัน วิธีที่ 3 คือวิธีดีคิว (DQ method) (Han S.B., Choi N.S., Rim C.T., Hu D.Y. and Cho G.H., 1990; Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M. and Thomas D.W.P., 2004) ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส แบบจำลองที่ได้ไม่ซับซ้อน มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนได้ เช่น ระบบที่มีการต่อขนานกันของวงจรแปลงผัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือผสมผสานกันจากทั้ง 3 วิธีข้างต้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จะนำมาใช้สำหรับการคาดเดาหาจุดขาดเสถียรภาพของระบบ ซึ่งในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นิยมในปัจจุบันสามารถแบ่งเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพอยู่ด้วยกัน 2 แนวทางคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น และการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear stability analysis) โดยแนวทางแรก การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น จะมี 2 วิธีการที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือ วิธีการบนระนาบ S โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theory) (Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M., Thomas D.W.P., Watson A. and Wu T., 2009) และวิธีการบนโดเมนความถี่โดยใช้หลักการของ มิดเดิลบรูค (R.D. Middlebrook, 1997) ซึ่งทั้ง 2 วิธีการนี้ เป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถพิจารณาขนาดของแอมพลิจูดที่เกิดการกระเพื่อมได้เมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และการวิเคราะห์เสถียรภาพจะต้องทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นไปเป็นเป็นจำลองที่เป็นเชิงเส้นเพื่อสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับแนวทางที่ 1 ได้ แต่ในขณะที่แนวทางที่ 2 เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยตรง ซึ่งมี 2 วิธีการคือ วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส(phase plane analysis) (Griffio A., Wang J., and Howe D., 2008) และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ(Lyapunov's direct method)(Matousek R., Svare I., Pivonka P., Osmera P. and Seda M., 2009; Weijing Du., Junming Zhang., Yang Zhang., and Zhoamong Qian., 2011) โดยวิธีแรกเป็นวิธีการทางเชิงกราฟ ซึ่งจะสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ (state

variables) 2 ตัว เป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อนและได้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำ แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ สามารถใช้กับระบบที่มีอันดับไม่เกิน 2 ถ้าอันดับของระบบเกิน 2 อาจทำการแปลงรูปแบบให้เป็นกลุ่มของระบบอันดับ 2 ได้ แต่จะมีความยุ่งยากซับซ้อนในการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบ ซึ่งจะทำให้ผลการวิเคราะห์เกิดความผิดพลาดได้ สำหรับวิธีที่ 2 เป็นวิธีการที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพราะนอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถที่จะประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ต้องคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณา จากนั้นนำฟังก์ชันที่คำนวณได้ไปตรวจสอบเสถียรภาพตามทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ซึ่งข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ และในทางปฏิบัติการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความยุ่งยากอีกทั้งมีข้อจำกัดสำหรับระบบที่มีโครงสร้างซับซ้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการที่ง่ายสุดนั่นคือ วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น สามารถนำมาใช้ในการคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่ยังไม่สามารถทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น โดยที่ไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ เพื่อให้ระบบที่ขาดเสถียรกลับมา มีเสถียรภาพได้ตลอดย่านการทำงาน ซึ่งวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการคือ วิธีแบบพาสซีฟ และวิธีแบบแอคทีฟ โดยวิธีแบบพาสซีฟ (Cespedes M., Xing L., Sun J., 2011) เป็นการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ หรือลดค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพในการจ่ายโหลดได้สูงขึ้น รวมถึงการเพิ่มค่าความต้านในระบบ ซึ่งง่ายต่อการออกแบบและการนำไปใช้งานจริง แต่วิธีการดังกล่าว จะก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียในวงจรกรอง ราคาแพง และทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลง ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยจึงเลือก วิธีการแบบแอคทีฟ ซึ่งมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแบ่งได้เป็น 2 แนวทางคือ แนวทางที่ 1 การควบคุมด้านแหล่งจ่าย (Rahimi, A.M. and Emadi, A., 2009; Weaver, W.W. and Krein, P.T., 2009) และแนวทางที่ 2 เป็นการควบคุมด้านโหลด (Mohamed Y.A-R.I., Radwan A.A.A. and Lee T.K., 2012) สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยเลือกการควบคุมด้านแหล่งจ่าย เนื่องจากมีความต้องการทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ ซึ่งมีวิธีการต่างๆ ส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้กับวงจรแปลงผันกำลังคิซีเป็นคิซี (Rahimi A.M., Williamson G.A. and Emadi A., 2012; Kim S. and

Williamson S. S., 2011; Radwan A.A.A. and Mohamed Y.A-R.I., 2012; Kazemlou S. and Mehraeen S., 2014) และมีวิธีการบางส่วนนำมาใช้กับวงจรแปลงผันกำลังเอชี่เป็นดีซี (Logue D.L. and Krein P.T., 2011) ที่มีโครงสร้างลักษณะเฉพาะของการทำวิจัย หรือไม่สามารถนำมาพัฒนาทั้งระบบแบบทั่วไปได้ แต่จะมี 2 วิธีการที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ วิธีการห้วงแบบแอกทีฟ และวิธีลูปลยคลิก ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ได้กับระบบทั่วไป และยังไม่ม้งานวิจัยในอดีตที่นำวิธีการดังกล่าวนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันเอชี่เป็นดีซี ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกวิธีการห้วงแบบแอกทีฟมาประยุกต์ใช้กับระบบ ไฟฟ้ากำลังเอชี่เป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน เนื่องจากวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่ายและมีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีลูปลยคลิก เมื่อนำมาสร้างใช้งานจริง รวมถึงกระบวนการของวิธีลูปลยคลิกจะต้องใช้ความเร็วของการคำนวณค่อนข้างสูง ซึ่งจะมีผลต่อต้นทุนสูงกล่าววิธีการห้วงแบบแอกทีฟ สำหรับการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบ จะดำเนินการด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ของโปรแกรม MATLAB และดำเนินการสร้างชุดทดสอบเพื่อทำให้วิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อมากขึ้น และเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับนำไปพัฒนาทั้งระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับผลของ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.2.2 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

1.2.3 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

1.2.4 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ใหม่สำหรับการนำวิธีการห้วงแบบแอกทีฟมาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

1.2.5 เพื่อศึกษาและดำเนินการสร้างชุดทดสอบสำหรับการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blocksets) ร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

1.3.2 ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

1.3.3 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พิสูจน์จากวิธีการร่วมกันระหว่างวิธีตัวเลขและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

1.3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพจะใช้ทฤษฎีบทค่าจางมาพิจารณาระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ

1.3.5 ตัวควบคุมที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์เป็นตัวควบคุมพีไอ

1.3.6 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ได้ใช้วิธีการแบบดั้งเดิมที่อาศัยพื้นฐานความรู้จากทฤษฎีระบบควบคุม

1.3.7 การสร้างชุดทดสอบของวงจรการห้วงแบบแอกทีฟ และวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตฟองอากาศใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MAGA 1280

1.3.8 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยนี้ อาศัยการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกันเท่านั้น

1.4.2 การทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรแปลงผันแบบบัคค์จะพิจารณาการทำงานในย่านโหมคการนำกระแสต่อเนื่องเท่านั้น (continuous conduction mode)

1.4.3 การยืนยันการขาดเสถียรภาพของระบบ จะใช้การจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SimPowerSystem (SPS™) ใน SIMULINK และการสร้างชุดทดสอบจริง

1.4.4 การบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะพิจารณาในส่วนของวงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุมจะส่งผลต่อเสถียรภาพ

1.5.2 ได้องค์ความรู้ด้านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพที่อาศัยวิธีการเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น

1.5.3 ได้องค์ความรู้ด้านการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจร วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน ด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ

1.5.4 ได้องค์ความรู้การออกแบบตัวควบคุมพีไอ สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์

1.5.5 ได้บทความวิจัยได้เผยแพร่ระดับชาติ หรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มงานวิจัย

ในวิจัยนี้ประกอบด้วย 5 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย และประโยชน์คาดว่าจะได้รับของการวิจัย

บทที่ 2 นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อเสถียรภาพ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพ และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

บทที่ 3 นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

บทที่ 4 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกันด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 5 ส่วน *ภาคผนวก ก.* แสดงรายละเอียดโปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวัตัน – ราฟสัน *ภาคผนวก ข.* แสดงรายละเอียดโครงสร้างชุดบอร์ด ET-EASY1280 *ภาคผนวก ค.* แสดงรายละเอียดพอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 *ภาคผนวก ง.* แสดงรายละเอียดโปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino

บทที่ 2

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ขนานกัน ซึ่งในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยที่เกี่ยวกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้มีผู้ทำการวิจัยค้นคว้า และพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนมาถึงปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้ในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ และงานวิจัยที่เกี่ยวกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพรวมถึงงานวิจัยในอดีตที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้ โดยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ซึ่งในแต่ละหัวข้อผู้วิจัยจึงนำเสนอเรียงตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงการอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป รวมถึงสรุปองค์ความรู้ที่ได้รับการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัย

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ

ปัจจุบัน วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมการทำงาน แต่เมื่อนำวงจรดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรอง จะส่งผลต่อเสถียรภาพโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงเริ่มศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ โดยปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ ตามที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1976	Middlebrook, R.D.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้าโดยรวม ซึ่งโหลดในลักษณะนี้จะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งนอกจากจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบแล้ว ยังส่งผลทำให้ระบบเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้น ระบบไฟฟ้าที่มีโหลดลักษณะดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เสถียรภาพ เพื่อหลีกเลี่ยงการขาดเสถียรภาพที่อาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายได้
1999	Emadi, A., Fahimi, B., and Ehsani M.	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับแนวคิดของการขาดเสถียรภาพของอิมพีแดนซ์เชิงลบด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีเพิ่มมากขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน
2004	Jusoh., A.B.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบของการขาดเสถียรภาพที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวรวมถึงทฤษฎีการออกแบบวงจรกรองและการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า
2005	Rivetta, C.H., Williamson, G.A., and Emadi, A.	บทความนี้เสนอวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังและวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีการควบคุมที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ รวมถึงการขาดเสถียรภาพเนื่องจากอิมพีแดนซ์เชิงลบในระบบกำลังไฟฟ้าของเรือดำน้ำ
2006	Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A.	บทความนี้นำเสนอโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและการขาดเสถียรภาพเนื่องจากอิมพีแดนซ์เชิงลบในระบบยานยนต์
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas D.W.P.	บทความนี้เสนอการขาดเสถียรภาพของอิมพีแดนซ์เชิงลบ ด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีเพิ่มมากขึ้นในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ดังตารางที่ 2.1 พบว่า โหลดของระบบไฟฟ้ากำลังที่เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน จะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบต่อระบบโดยรวม และโดยทั่วไป โหลดที่เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบของโหลดชนิดนี้ จะไปลดค่าความต้านทานของวงจรกรอง (damping) ซึ่งปกติค่าความต้านทานของวงจรกรองชนิดนี้จะมีค่าบวก การลดลงของค่าความต้านทานของวงจรกรองจะทำให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณขึ้น ถ้าระบบมีค่าอิมพีแดนซ์ติดลบมากพอ นั่นคือปริมาณโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากพอ จะทำให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณมีค่าสูงมาก หรือทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดเป็นแบบกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก เพราะถ้าระบบไฟฟ้ากำลังขาดเสถียรภาพอาจจะส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุม และทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของระบบเกิดความเสียหายได้ เนื่องจากผลของการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูง

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์การหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ เมื่อพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรแปลงผัน ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตซ์ดังกล่าว และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากขึ้น โดยสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1990	Rim, C.T., Hu, D.Y., and Cho, G.H.	บทความนี้นำเสนอการแปลงวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรเรียงกระแส และวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ ให้อยู่บนแกนคิกิว ในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับเวลา
1990	Sanders, S. R., Noworolski, J. M., Liu, X. Z., and Vergliese, G.C.	บทความนี้เสนอวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะสำหรับวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบใช้พีดับเบิลยูเอ็ม สำหรับการสวิตช์ รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบเรโซแนนซ์ประเภทต่างๆ
1993	Sudhoff, S.D., and Wasynczuk, O.	บทความนี้เสนอการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันที่มีโหลดเป็นเครื่องจักรกลเชิงโรตัส
1993	Baghrmian, A., and Forsyth, A.J.	บทความนี้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยใช้วิธีการค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น
1994	Rim, C.T., Choi, N.S., Cho, G.C., and Cho, G.H.	บทความนี้เสนอการแปลงวงจรไปอยู่บนแกนคิกิวสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ใช้เทคนิคการควบคุมการจ่ายกระแสด้วยพีดับเบิลยูเอ็ม
1997	Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D., and Ehsano, M.	บทความนี้เสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
1998	Han, S.B., Choi, N.S., Rim, C.T., and Cho, G.H.	บทความนี้เสนอการแปลงวงจรให้อยู่บนแกนคิกิวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสโดยใช้เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็มแบบบัทท์ รวมถึงการพิสูจน์สมการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลบนแกนคิกิว

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1998	Jianping, X., and Lee, C. Q.	บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับการวิเคราะห์ของวงจรแปลงผันแบบเรโซแนนซ์เสมือน
2004	Jalla, M.M., Emadi, A., Williamson, G.A., and Fahimi, B.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ระบบวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังหลายชนิด โดยใช้วิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2004	Mahdavi, J., Emadi, A., And Williamson, G.A.	บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองสถานการณ์ของระบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากำลังต่างๆ บนเรือโดยใช้วิธี ค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2006	Sun, J., and Colon, J.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการอินพุตอิมพีแดนซ์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี
2006	Dong, P., Cheng, K.W.E., Ho, S. L., Yang, J. M., and Choi, W.F.	บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบคลาสสิก โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยมาประยุกต์กับระบบยานยนต์
2007	Chen, M., Sun, J.	บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้อินพุตอิมพีแดนซ์แบบความถี่ต่ำสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ารวมถึงเกณฑ์เสถียรภาพในควิสต์
2007	Han, L., Wang, J., and Howe, D.	บทความนี้นำเสนอการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M. and Thomas D.W.P.	บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้วิธีคิ่ว ในระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้เทคนิคการควบคุมด้วยวิธีพีดับเบิลยูเอ็ม

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังดังตารางที่ 2.2 พบว่า การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี นิยมใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้มีความถูกต้องแม่นยำ และไม่ซับซ้อน ในขณะที่การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ทั้งแบบที่มีการควบคุมแรงดันบัสดีซีหรือที่ไม่มีการควบคุมแรงดันบัสดีซี นิยมใช้วิธีคิ่ว ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้มีความยืดหยุ่นสูง และไม่ซับซ้อนมากนัก ดังนั้นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัลค์ขนานกัน ซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ สามารถพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยวิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิ่วและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ปัจจุบัน ได้มีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นแบบจำลองไม่ขึ้นอยู่กับเวลามาทำการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ทั้งนี้เพื่อคาดเดาจุดการทำงานของโหลดดังกล่าวที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และหลีกเลี่ยงผลเสียต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

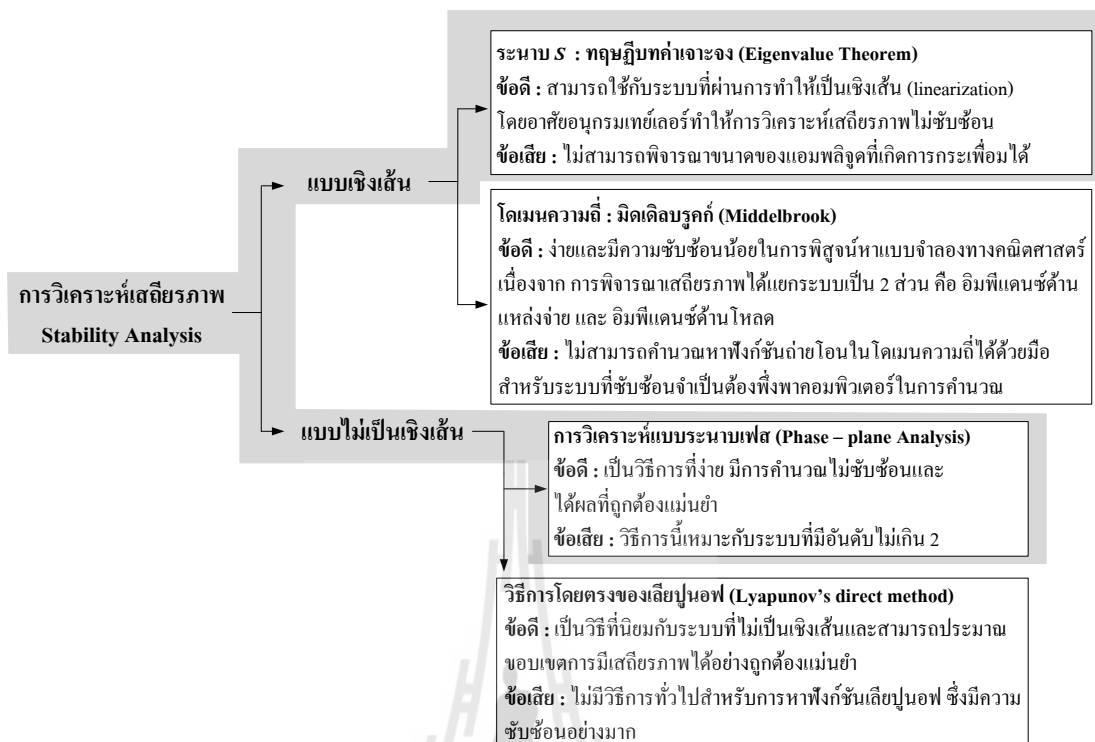
ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1969	Lipo, T. A., and Krause, P. C.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยจากแผนภาพในควิสต์ของวงจรรีจกระแอสสามเฟสแบบบริคจ์ที่เชื่อมต่อกับวงจรมอเตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
2003	Wang, X., Yao, R., and Rao, F.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กโดยพิจารณาจากอินพุต-เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซี
2006	Ying-xi, L., Xin-hua, M., Hong-juan, G., and Hua, J.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพและการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินที่ประกอบไปด้วยวงจรรีจกระแอสสามเฟสต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้าและพิจารณาโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ
2008	Griffio, A., Wang, J., and Howe, D.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังดิซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ด้วยวิธีการระนาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ พร้อมทั้งประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีเบรย์ทันและมอเซอร์
2008	Liutanakul, P., Pierfederici, S., Bilal, A., and Nahid-Mobarakeh, B.	นำเสนอการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์โดยใช้หลักการพิจารณาอินพุตอิมพีแดนซ์จากแผนภาพในควิสต์
2009	Matousek, R., Svare, I., Pivonka, P., Osmera, P., and Seda, M.	บทความนี้เสนอวิธีการสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยวิธีทำให้เป็นเชิงเส้น วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟและเกณฑ์ของโพพอฟ พร้อมทั้งเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสีย

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., Thomas, D.W.P. Watson, A., and Wu, T.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีของพลวัตชุดขับเคลื่อนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน รวมถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีดิกิว เพื่อนำไปคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ และได้แสดงการยืนยันผลจากชุดทดสอบ
2011	Weijing Du., Junming Zhang., Yang Zhang., and Zhoamong Qian.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้าในรถยนต์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ พร้อมทั้งประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟกำลังสอง
2011	Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินและศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและพลวัตการขับเคลื่อนที่มีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังตารางที่ 2.3 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 แผนภาพสรุปแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากแผนภาพในรูปที่ 2.1 จะพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพจะมีด้วยกัน 2 แนวทาง คือ การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น และการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยแนวทางแรก การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น จะมี 2 วิธีการที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน คือ วิธีการบนระนาบ S โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเฉพาะ และวิธีการบนโดเมนความถี่โดยใช้หลักการของ มิเดิลบรูค ซึ่งทั้ง 2 วิธีการนี้ เป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถพิจารณาขนาดของแอมพลิจูดที่เกิดการกระเพื่อมได้เมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และการวิเคราะห์เสถียรภาพจะต้องทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นไปเป็นเป็นจำลองที่เป็นเชิงเส้นเพื่อสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับแนวทางที่ 1 ได้ แต่ในขณะที่แนวทางที่ 2 เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยตรง ซึ่งมี 2 วิธีการคือ วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส และวิธีการ โดยตรงของเลียปูนอฟ โดยวิธีแรกเป็นวิธีการทางเชิงกราฟ ซึ่งจะสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ (state variables) 2 ตัว เป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และได้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำ แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ สามารถใช้กับระบบที่มีอันดับไม่เกิน 2 ถ้าอันดับของระบบเกิน 2 อาจทำการแปลงรูปแบบให้เป็นกลุ่มของระบบอันดับ 2 ได้ แต่จะมีความ

ยุ่งยากซับซ้อนในการสร้างการ โครของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบ ซึ่งจะทำให้ผลการวิเคราะห์เกิดความผิดพลาดได้ สำหรับวิธีที่ 2 เป็นวิธีการที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพราะนอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถที่จะประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ต้องคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณา จากนั้นนำฟังก์ชันที่คำนวณได้ไปตรวจสอบเสถียรภาพตามทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ และในทางปฏิบัติการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความยุ่งยากอีกทั้งมีข้อจำกัดสำหรับระบบที่มีโครงสร้างซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการที่ง่ายที่สุดนั่นคือ วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวิธีการดังกล่าว จะได้รับการอธิบายไว้ในส่วนที่เหมาะสมของงานวิจัย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและงานวิจัยในอดีตที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้

การวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง สามารถคาดเดาจุดการทำงานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ แต่ไม่สามารถทำให้ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดที่มีระดับกำลังที่สูงขึ้นได้ โดยที่ไม่ประสบปัญหาจากการขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ซึ่งเป็นงานวิจัยที่สำคัญสำหรับนำไปพัฒนาต่อยอดการประยุกต์ใช้กับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัลค์ขนานกัน ซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาในงานวิจัย จากศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Rahimi, A.M. and Emadi, A.	บทความนี้ได้นำเสนอวิธี การห้วงแบบแยกทีพ ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย

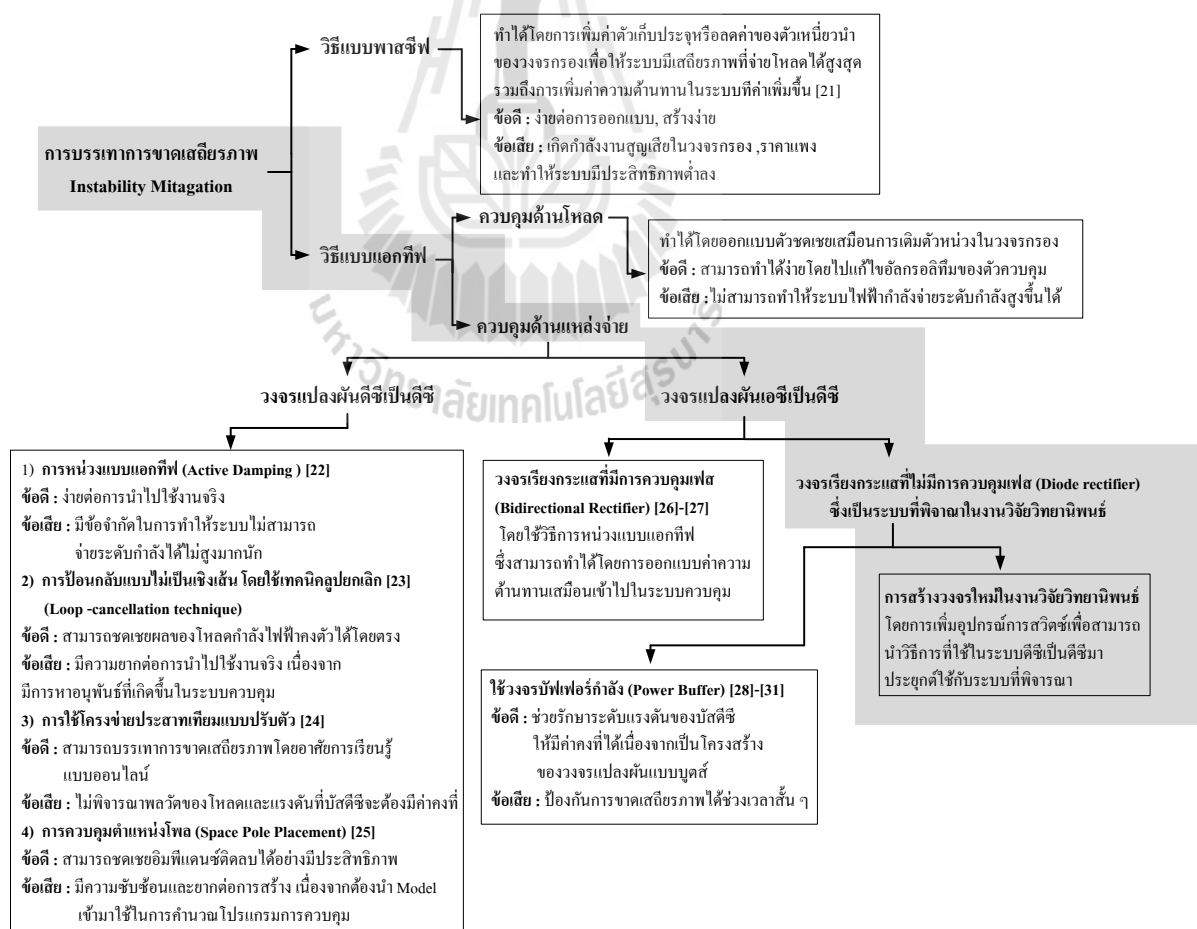
ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Weaver, W.W. and Krein, P.T.	บทความนี้แนะนำเสนอวิธีการควบคุมวงจรบัฟเฟอร์กำลังให้เหมาะสมที่สุดสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
2010	Rahimi, A.M., Williamson, G.A. and Emadi, A.	บทความนี้ได้แนะนำเสนอวิธีลูปลักษณ์ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพที่สุด ในการกำจัดค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ
2011	Logue, D.L. and Krein, P.T.	บทความนี้แนะนำเสนอแนวคิดวิธีการป้องกันการขาดเสถียรภาพของระบบโดยใช้วงจรบัฟเฟอร์กำลัง
2011	Cespedes, M., Xing, L. and J. Sun	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีพาสซีฟสำหรับวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี
2011	Kim, S. and Williamson, S. S.	บทความนี้แนะนำเสนอการควบคุมตำแหน่งชั่วคราวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายเพื่อทำการชดเชยค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ
2012	Mohamed, Y.A-R.I., Radwan, A.A.A., and Lee, T.K.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการหน้าต่างแบบแอกทีฟได้ในการควบคุมความเร็วของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส
2012	Radwan, A.A.A. and Mohamed, Y.A-R.I.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการหน้าต่างแบบแอกทีฟสำหรับระบบสถานีไฟฟ้ากระแสตรงขนาดย่อย
2013	Zhang, X., Vilathgamuwa, D. M., Tseng, K-J., Bhangu, B.S. and Gajanayake, C.J.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างวงจรบัฟเฟอร์กำลังสำหรับการป้องกันการขาดเสถียรภาพแบบชั่วขณะสำหรับวงจรแปลงผันเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ รวมถึงได้อธิบายโครงสร้างของวงจรการควบคุม

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2014	Kazemlou, S. and Mehraeen, S.	บทความนี้แนะนำให้ใช้วิธี โครงข่ายประสาทเทียมที่มีการปรับตัวมาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังตารางที่ 2.4 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังรวมถึงการนำวิธีการได้นำเสนอไว้ในอดีตมาประยุกต์กับงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ดังนี้



รูปที่ 2.2 แผนภาพสรุปการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

จากแผนภาพในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการคือ วิธีแบบพาสซีฟ และ วิธีแบบแอกทีฟ โดยวิธีแบบพาสซีฟเป็นการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ หรือลดค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพในการจ่ายโหลดได้สูงขึ้น รวมถึงการเพิ่มค่าความต้านในระบบ ซึ่งง่ายต่อการออกแบบและการนำไปใช้งานจริง แต่วิธีการดังกล่าว จะก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียในวงจรกรอง ราคาแพง และทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลง ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงเลือก วิธีการแบบแอกทีฟ ซึ่งมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ แบ่งได้เป็น 2 แนวทางคือ แนวทางที่ 1 การควบคุมด้านแหล่งจ่าย และแนวทางที่ 2 เป็นการควบคุมด้านโหลด สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยเลือกการควบคุมด้านแหล่งจ่าย เนื่องจากมีความต้องการทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ ซึ่งมีวิธีการต่างๆ ส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้กับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี และมีวิธีการบางส่วนนำมาใช้กับวงจรแปลงผันกำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโครงสร้างลักษณะเฉพาะของการทำวิจัยหรือไม่สามารถนำมาพัฒนากับระบบแบบทั่วไปได้ แต่จะมี 2 วิธีการที่ได้แสดงไว้ในส่วนการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีในรูปที่ 2.2 คือ วิธีการห่วงแบบแอกทีฟ และวิธีลูบยกเล็ก ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ได้กับระบบทั่วไป และยังไม่มียานวิจัยในอดีตที่นำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะเลือกวิธีการห่วงแบบแอกทีฟ มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน เนื่องจากวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถนำไปสร้างใช้งานจริงได้ง่ายกว่าวิธีลูบยกเล็ก โดยรายละเอียดต่าง ๆ จะได้รับการนำเสนอในบทถัดไป

2.6 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้น ถือเป็นพื้นฐานและองค์ความรู้ที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัยสำหรับการทำวิจัย คิดค้น และการพัฒนาด้านการบรรเทาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

บทที่ 3

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟสำหรับระบบ ไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

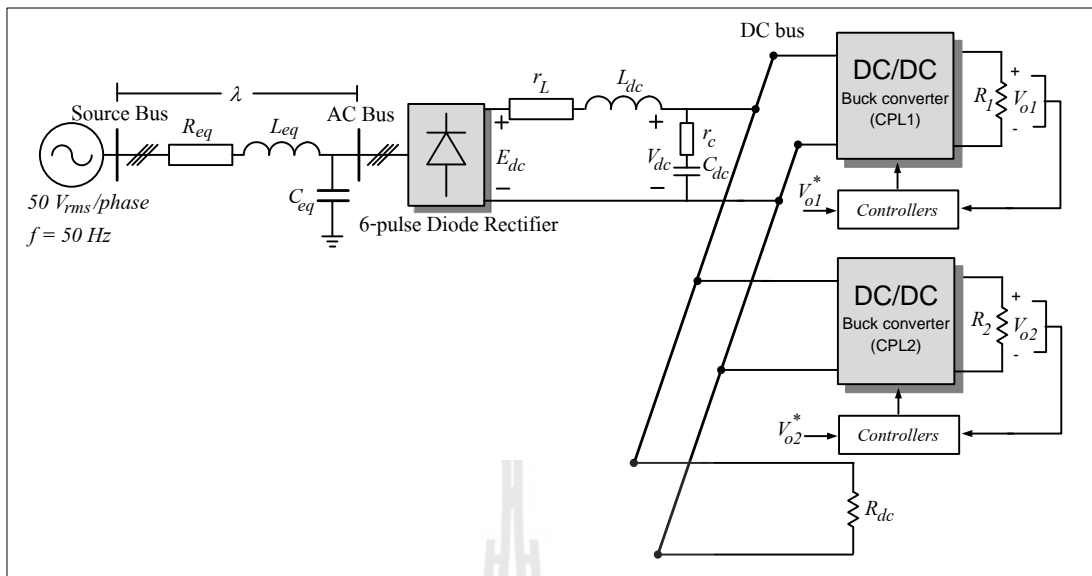
3.1 บทนำ

การเพิ่มค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรอง เมื่อถึงสภาวะการทำงานจุด ๆ หนึ่ง จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอ ผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟเพื่อทำให้ระบบที่ขาดเสถียรกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง เพียงสร้างวงจรควบคุมอย่างง่ายเข้าไปในระบบ นอกจากนี้ยังแสดงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงแบบแอกทีฟ (r_{LA}) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อนำแบบจำลองที่ได้ไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ซึ่งผลการยืนยันความถูกต้องของวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB

3.2 ผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

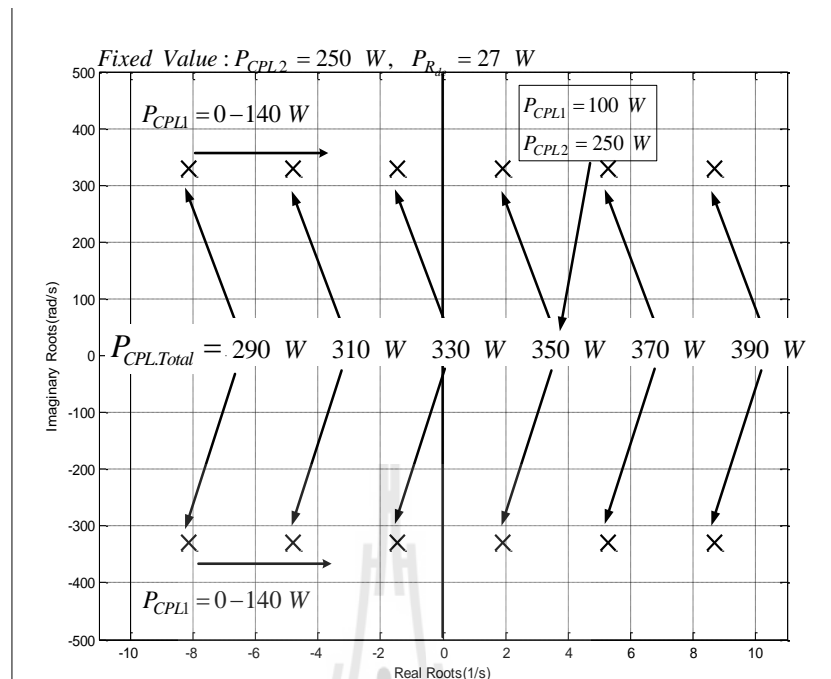
3.2.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย 5 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมดุล โดยที่ V_s คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแบบสมดุล R_{eq} , L_{eq} และ C_{eq} คือความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ ส่วนที่ 2 ไดโอดเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 วงจรกรองแรงดันบัคค์ซี โดยที่ L_{dc} , C_{dc} , r_L และ r_c คือความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ และความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ตามลำดับ ส่วนที่ 4 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันดักคร่อมตัวต้านทานจำนวน 2 ชุด และส่วนที่ 5 โหลดตัวต้านทาน โดยที่ R_{dc} คือความต้านทานที่ต่อขนานกับวงจรแปลงผันแบบบัคค์



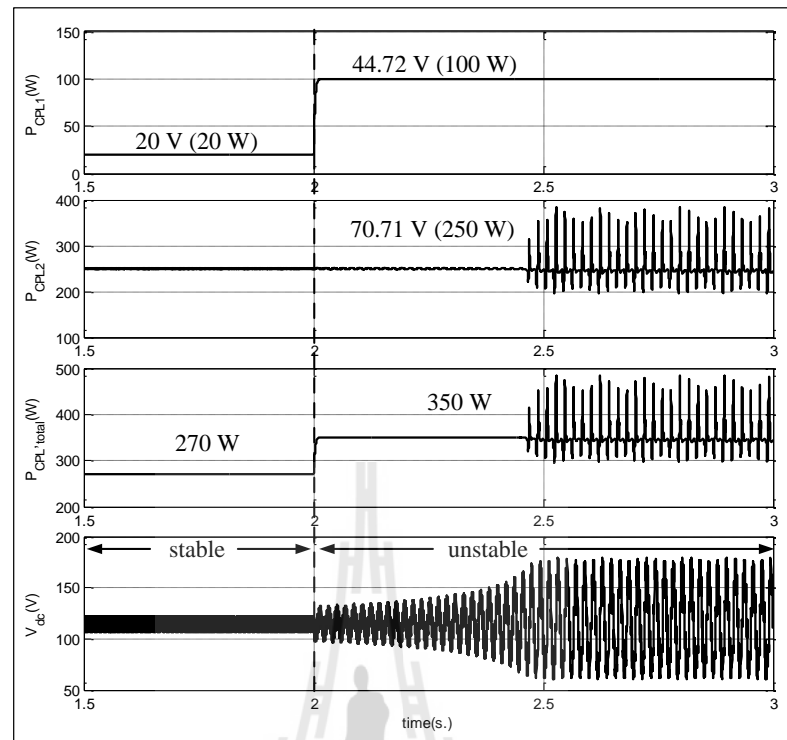
รูปที่ 3.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ และโหลดตัวต้านทานต่อขนานกัน

จากรูปที่ 3.1 จะสังเกตได้ว่า โหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมแรงดัน ฝั่งขาออกทั้ง 2 ชุด จะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และจะสามารถลดทอน เสถียรภาพของระบบได้ เมื่อผลรวมระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในที่นี้คือ $P_{CPL, Total}$ และเมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ จะทำให้แรงดันของวงจรกรองบัสดีซี (V_{dc}) เกิดการ แกว่งที่มีค่าสูงมากจนทำให้ระบบเกิดความเสียหายหรือส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมของระบบ ได้ ดังนั้นการคาดเดาจุดการทำงานของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดที่ทำให้ระบบเริ่มเกิด การขาดเสถียรภาพ สามารถทำได้โดยการอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง ซึ่ง ได้รับการพิสูจน์บนพื้นฐานของวิธีการใน (Sopapirm T., Areerak K-N. and Areerak K-L., 2011) และนำแบบจำลองที่ได้มาผ่านด้วยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งแสดงผล การวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 3.2 โดยกำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 2 มีระดับกำลังไฟฟ้า คงที่ 250 W และโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที ละ 20 W โดยเริ่มตั้งแต่ 0 W ไปจนถึง 140 W



รูปที่ 3.2 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อผลรวมระดับกำลังของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 - 400 W

จากรูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อผลรวมระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 330 W ไปเป็น 350 W จะทำให้ขั้วเด่นของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งซ้ายของระนาบเอสมาอยู่ฝั่งขวา ซึ่งหมายถึงระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 เริ่มเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยผลการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 3.2 จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 โดยที่กำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 2 มีค่าคงที่ระดับกำลังไฟฟ้า 250 W และโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับกำลังไฟฟ้าจาก 20 W ไปเป็น 100 W ที่เวลา 2 วินาที



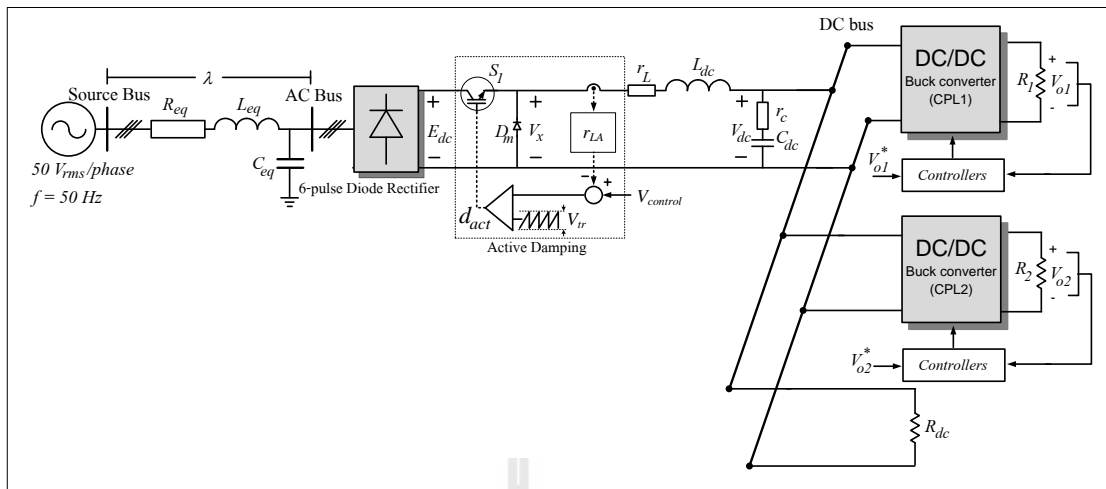
รูปที่ 3.3 การยืนยันผลการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์

จากรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่า เมื่อผลรวมระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งทั้ง 2 ชุดมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 270 W ไปเป็น 350 W ที่เวลา 2 วินาที จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งคู่ได้จากผลการแกว่งของแรงดันบัสดีซีที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และทำให้สมรรถนะการควบคุมของระบบแย่ลง ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงนำวิธีการหนึ่งแบบแอกทีพมาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งนานกัน ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และยังไม่มีการวิจัยในอดีตที่นำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันเอชเป็นดีซี ซึ่งรายละเอียดการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแอกทีพจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.3

3.3 การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแอกทีพ

3.3.1 ระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแอกทีพ

ระบบที่พิจารณาวิธีการหนึ่งแบบแอกทีพแสดงดังรูปที่ 3.4 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส สายส่งกำลังไฟฟ้า ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ อุปกรณ์การสวิตช์สำหรับวิธีการหนึ่งแบบแอกทีพ วงจรกรองสัญญาณดีซี และวงจรแปลงผันแบบบักกิ้ง 2 ชุด และโหลดตัวต้านทานที่มีการต่อขนานกัน

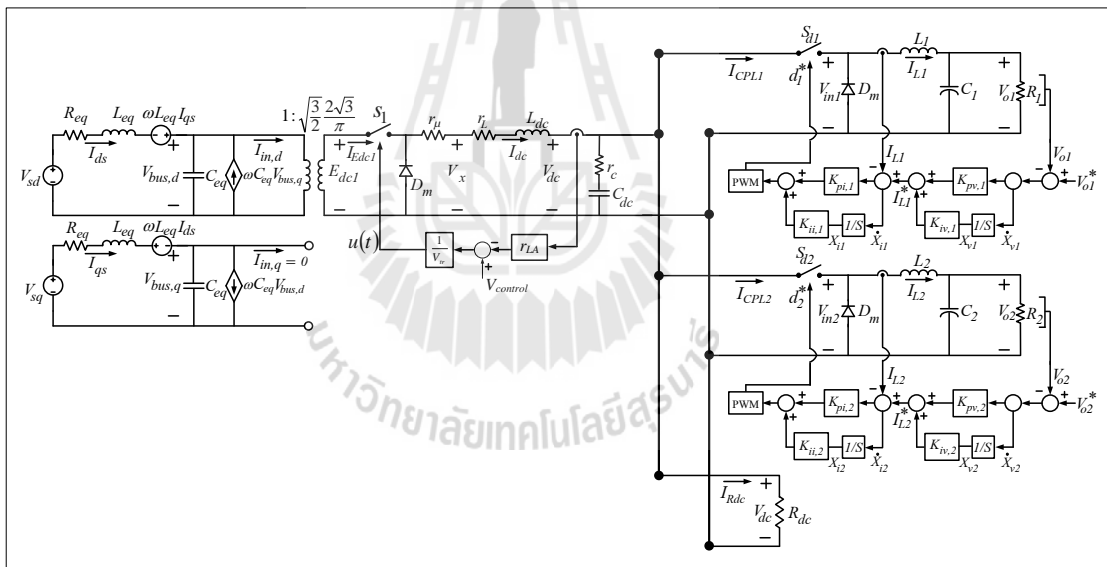


รูปที่ 3.4 ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาการหน่วงแบบแอคทีฟ

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่า มีอุปกรณ์สวิตช์ (S_l) ที่ถูกเพิ่มขึ้นถัดจากไดโอดเรียงกระแสสามเฟส ซึ่งอุปกรณ์การสวิตช์นี้ สามารถถูกควบคุมการเปิดและปิดผ่านด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ (d_{act}) ซึ่งจะเป็นส่วนในการควบคุมแรงดันเอาต์พุต ในที่นี้ก็คือ V_x และจะสามารถปรับค่าได้ โดยที่ V_x จะมีคอลลงเมื่อปรับ d_{act} ให้มีค่าน้อยกว่า 1 และส่งผลให้ V_{dc} มีคอลลงด้วย ซึ่งเสมือนว่ามีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองคิซี โดยการลดลงของแรงดันเอาต์พุตด้วยตัวต้านทานเสมือนจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น จากรูปที่ 3.4 เมื่อทำการปรับ $V_{control}$ และ V_{tr} มีค่าเท่ากับ 3 V โดยที่ค่าความต้านทานเสมือน (r_{LA}) มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ d_{act} มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์การสวิตช์นี้ ทำงานปิดดวงตลอดหรือ อีกนัยหนึ่งก็คือ วงจรการหน่วงแบบแอคทีฟยังไม่ทำงาน แต่ถ้า r_{LA} มีค่าไม่เท่ากับ 0 จะทำให้ d_{act} มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งจะส่งผลทำให้แรงดันเอาต์พุต (V_{dc}) มีคอลลงตามหลักการของวิธีการหน่วงแบบแอคทีฟ เปรียบเสมือนกับการมีตัวต้านทานเสมือนเข้าไปในระบบจึงสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} ที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้ จะอาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งรายละเอียดการพิสูจน์จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

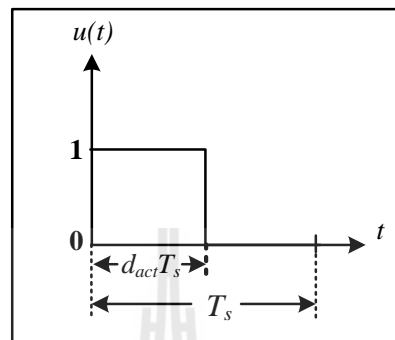
การวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} มีความจำเป็นในการอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบเมื่อค่า r_{LA} มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.4 ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสสมดุลและไดโอดเรียงกระแสสามเฟส สามารถแปลงให้อยู่ในรูปบนแกนหมุนคิควอย่างง่ายเมื่อกำหนดมุมเฟสการหมุนของแกนคิควเท่ากับมุมเฟสที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ($\phi = \phi_1$) (Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G. and Thomos D.W.P., 2008) และในส่วนของวงจรแปลงผันแบบบักที่ที่มีการควบคุมทั้ง 2 ชุด สามารถดำเนินการกำจัดผลการสวิตช์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งได้รับการพิสูจน์ของวิธีการไว้ใน (Sopapirm T., Areerak K-N. and Areerak K-L., 2011) ดังนั้นจะได้วงจรสมมูลที่อยู่บนแกนคิควแสดงดังรูปที่ 3.5 ดังนี้



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลที่อยู่บนแกนหมุนคิคว

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาซึ่งถูกแทนด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายที่อยู่บนแกนหมุนคิคว ยังเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลการสวิตช์ของวงจรการหน่วงแบบแอกทีฟ การกำจัดผลการสวิตช์ของวงรดังกล่าวจะอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Emadi A., Ehsani M. and Miller J.M., 2004) เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองของ

ระบบที่พิจารณาในรูปที่ 3.5 ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จะเริ่มพิจารณาจากสัญญาณการสวิตช์แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรการหน่วงแบบแอกทิฟแสดงได้สมการที่ (3-1)



รูปที่ 3.6 สัญญาณการสวิตช์ของระบบที่พิจารณา

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

โดยที่ d_{act} คือ วัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของอุปกรณ์การสวิตช์ S_1

จากรูปที่ 3.5 พิจารณาฝั่งซ้ายของวงจรกรองเมื่อสวิตช์ S_1 ปิด จะทำให้ $I_{dc} = I_{Edc1}$ และ $V_x = E_{dc1}$ และเมื่อสวิตช์ S_1 เปิด จะทำให้ $I_{dc} = 0$ และ $V_x = 0$ (สมมติให้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด D_m มีค่าเท่ากับ 0 V เมื่อไดโอดนำกระแส) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง I_{dc} กับ I_{Edc1} และ ความสัมพันธ์ระหว่าง V_x กับ E_{dc1} สามารถเขียนสมการที่อยู่ในรูปของ $u(t)$ แสดงดังสมการที่ (3-2) ดังนี้

$$\begin{cases} I_{dc} = u(t) I_{Edc1} \\ V_x = u(t) E_{dc1} \end{cases} \quad (3-2)$$

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สามารถวิเคราะห์ด้วยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ ร่วมกับสมการที่ (3-2) ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลในรูปที่ 3.5 ที่ไม่พิจารณาวงจรการหน่วงแบบแอกทิฟเข้ามาในระบบ แสดงได้ดังสมการที่ (3-3) ดังนี้

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

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.5 การวิเคราะห์สมการเชิงอนุพันธ์ในส่วน
ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมทั้ง 2 ชุด ผล
ของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรดังกล่าวได้ถูกกำจัดทิ้งโดยวิธีคิคว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ
ทั่วไป อย่างไรก็ตาม แบบจำลองที่ได้ในสมการที่ (3-3) ยังเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจาก
ผลการสวิตช์ของวงจรการหน่วงแบบแอกทิฟ ซึ่งในที่นี้คือ $u(t)$ ดังนั้นจึงได้นำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิ

สถานะทั่วไปมาใช้สำหรับการกำจัดผลการสวิตช์ของวงจรดังกล่าว เพื่อให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งตัวแปรสถานะของแบบจำลองในสมการที่ (3-3) สามารถเขียนเป็นสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของ I_{ds} , I_{qs} , $V_{bus,d}$, $V_{bus,q}$, I_{dc} , V_{dc} , I_{L1} , V_{o1} , X_{v1} , X_{i1} , I_{L2} , V_{o2} , X_{v2} และ X_{i2} โดยเลือกใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ หรือไม่คิดผลของการสั้นไกวของสัญญาณ ซึ่งสามารถกำหนดตัวแปรสถานะทั้ง 14 ตัวแปร แสดงดังสมการที่ (3-4) ดังนี้

$$\begin{cases} \langle I_{ds} \rangle_0 = I_{ds} \\ \langle I_{qs} \rangle_0 = I_{qs} \\ \langle V_{bus,d} \rangle_0 = V_{bus,d} \\ \langle V_{bus,q} \rangle_0 = V_{bus,q} \\ \langle I_{dc} \rangle_0 = I_{dc} \\ \langle V_{dc} \rangle_0 = V_{dc} \\ \langle I_{L1} \rangle_0 = I_{L1} \\ \langle V_{o1} \rangle_0 = V_{o1} \\ \langle X_{v1} \rangle_0 = X_{v1} \\ \langle X_{i1} \rangle_0 = X_{i1} \\ \langle I_{L2} \rangle_0 = I_{L2} \\ \langle V_{o2} \rangle_0 = V_{o2} \\ \langle X_{v2} \rangle_0 = X_{v2} \\ \langle X_{i2} \rangle_0 = X_{i2} \end{cases} \quad (3-4)$$

พิจารณาสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของสัญญาณการสวิตช์ในสมการที่ (3-1) จะได้สัมประสิทธิ์ที่มีการประมาณค่าอันดับศูนย์ ซึ่งรายละเอียดการพิสูจน์แสดงได้ดังสมการที่ (3-5)

$$\begin{aligned} \text{จาก } \langle x \rangle_k(t) &= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \\ \langle u_{act} \rangle_o &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} 1 \cdot e^0 dt \\ \langle u \rangle_o &= \frac{1}{T_s} [t]_{t=0}^{t=d_{act}T_s} \\ \langle u \rangle_o &= \frac{1}{T_s} \cdot d_{act} T_s \\ \langle u \rangle_0 &= d_{act} \end{aligned} \quad (3-5)$$

โดยที่ d_{act} คือ วัฏจักรหน้าที่ของวงจรสวิตช์ฝั่งดีซี

การกำจัดผลการสวิตช์ของวงจรการนำแบบแอคทีฟ จะอาศัยสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนมาประยุกต์กับสมการเชิงอนุพันธ์ที่ (3-3) และแทนค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ที่มีการประมาณค่าอันดับศูนย์ด้วยสมการที่ (3-4) ซึ่งจะได้แบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรสมมูลในรูปที่ 3.5 แสดงได้ดังสมการที่ (3-6)

$$\begin{cases}
 \dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
 \dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} \cdot d_{act} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\
 \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \cdot d_{act} V_{bus,d} - \frac{(r_{\mu} + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc}} \\
 \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{C_{dc}} \cdot \frac{P_{CPL}}{V_{dc}} \\
 \dot{I}_{L1} = -\frac{K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} I_{L1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} V_{o1} - \frac{V_{o1}}{L_1} + \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} X_{v1} \\
 \quad + \frac{K_{ii,1}}{L_1} V_{dc} X_{i1} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} V_{o1}^* \\
 \dot{V}_{o1} = \frac{1}{C_1} I_{L1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1} \\
 \dot{X}_{v1} = -V_{o1} + V_{o1}^* \\
 \dot{X}_{i1} = -I_{L1} - K_{pv,1} V_{o1} + K_{iv,1} X_{v1} + K_{pv,1} V_{o1}^* \\
 \dot{I}_{L2} = -\frac{K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} I_{L2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} V_{o2} - \frac{V_{o2}}{L_2} + \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} X_{v2} \\
 \quad + \frac{K_{ii,2}}{L_2} V_{dc} X_{i2} + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} V_{o2}^* \\
 \dot{V}_{o2} = \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{R_2 C_2} V_{o2} \\
 \dot{X}_{v2} = -V_{o2} + V_{o2}^* \\
 \dot{X}_{i2} = -I_{L2} - K_{pv,2} V_{o2} + K_{iv,2} X_{v2} + K_{pv,2} V_{o2}^*
 \end{cases} \quad (3-6)$$

พิจารณาโครงสร้างระบบควบคุมด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟในรูปที่ 3.4 สามารถเขียนสมการ d_{act}^* แสดงได้ดังสมการที่ (3-7)

$$d_{act}^* = \left(\frac{V_{control} - r_{LA} I_{dc}}{V_{tr}} \right) \quad (3-7)$$

ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาการควบคุมด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ สามารถดำเนินการได้โดยการแทนค่า d_{act}^* ของสมการที่ (3-7) ไปยังสมการที่ (3-6) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 3.4 ที่ได้จากการพิสูจน์ด้วยวิธีดีคิ้วและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ (3-8)

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\ \dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} \frac{V_{tr} \cdot I_{dc}}{(V_{control} - r_{LA} I_{dc})} \\ \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \left(\frac{V_{control}}{V_{tr}} \right) V_{bus,d} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \left(\frac{r_{LA}}{V_{tr}} \right) V_{bus,d} I_{dc} - \frac{(r_{\mu} + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \left(\frac{R_{dc} - r_c}{L_{dc} R_{dc}} \right) V_{dc} - \frac{r_c K_{pi,1}}{L_{dc}} I_L^2 \\ \quad - \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_{dc}} I_{L1} V_{o1} + \frac{r_c K_{iv,1} K_{pi,1}}{L_{dc}} I_{L1} X_{v1} + \frac{r_c K_{ii,1}}{L_{dc}} I_{L1} X_{i1} + \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* - \frac{r_c K_{pi,2}}{L_{dc}} I_{L2}^2 \\ \quad - \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_{dc}} I_{L2} V_{o2} + \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2}}{L_{dc}} I_{L2} X_{v2} + \frac{r_c K_{ii,2}}{L_{dc}} I_{L2} X_{i2} + \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{1}{C_{dc} R_{dc}} V_{dc} + \frac{K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1}^2 + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1} - \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} X_{v1} - \frac{K_{ii,1}}{C_{dc}} I_{L1} X_{i1} \\ \quad - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* + \frac{K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2}^2 + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2} V_{o2} - \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2} X_{v2} \\ \quad - \frac{K_{ii,2}}{C_{dc}} I_{L2} X_{i2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \end{array} \right.$$

$$\begin{cases}
\dot{I}_{L1} = -\frac{K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} I_{L1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} V_{o1} - \frac{V_{o1}}{L_1} + \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} X_{v1} + \frac{K_{ii,1}}{L_1} V_{dc} X_{i1} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} V_{o1}^* \\
\dot{V}_{o1} = \frac{1}{C_1} I_{L1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1} \\
\dot{X}_{v1} = -V_{o1} + V_{o1}^* \\
\dot{X}_{i1} = -I_{L1} - K_{pv,1} V_{o1} + K_{iv,1} X_{v1} + K_{pv,1} V_{o1}^* \\
\dot{I}_{L2} = -\frac{K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} I_{L2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} V_{o2} - \frac{V_{o2}}{L_2} + \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} X_{v2} + \frac{K_{ii,2}}{L_2} V_{dc} X_{i2} + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} V_{o2}^* \\
\dot{V}_{o2} = \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{R_2 C_2} V_{o2} \\
\dot{X}_{v2} = -V_{o2} + V_{o2}^* \\
\dot{X}_{i2} = -I_{L2} - K_{pv,2} V_{o2} + K_{iv,2} X_{v2} + K_{pv,2} V_{o2}^*
\end{cases} \quad (3-8)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟดังสมการที่ (3-8) จะสังเกตได้ว่า เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นปรากฏอยู่ในสมการคือ $V_{bus,d}$, I_{dc} , V_{dc} , I_{L1} และ I_{L2} ซึ่งการวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} จะอาศัยแบบจำลองที่ทำให้เป็นเชิงเส้น (linearized model) ภายใต้ทฤษฎีค่าเฉพาะ (eigenvalue theorem) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้อาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับ 1 ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้เป็นเชิงเส้น ได้ดังสมการที่ (3-9)

$$\begin{aligned}
\dot{\delta \mathbf{x}} &= \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\
\dot{\delta \mathbf{y}} &= \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u}
\end{aligned} \quad (3-9)$$

เมื่อ

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

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 $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ แสดงได้ดังนี้

$$A(x_o, 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}} \frac{(V_{control} - rLA^{I_{dc,o}}) V_{Tr} + rLA^{I_{dc,o}}}{(V_{control} - rLA^{I_{dc,o}})^2} & 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}} \frac{(V_{control} - rLA^{I_{dc,o}})}{V_{Tr}} & 0 & -\frac{(r_{\mu} + r_L + r_c)}{L_{dc}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \frac{(RLA^{V_{bus,d,o}})}{V_{Tr}} & -\frac{(R_{dc} - r_c)}{L_{dc} R_{dc}} & 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}} & \frac{1}{C_{dc} R_{dc}} & 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 & \frac{K_{pi,1} V_{dc,o}}{L_1} & a(7,6) & -\frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{dc,o} + 1}{L_1} & \frac{K_{iv,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 & \frac{1}{C_1} & 0 & -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_1 C_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 & \frac{K_{pi,2} V_{dc,o}}{L_2} & a(11,6) & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{pv,2} K_{pi,2} V_{dc,o} + 1}{L_2} & \frac{K_{iv,2} K_{pi,2} V_{dc,o}}{L_2} & \frac{K_{ii,2} V_{dc,o}}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & 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 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv,2} & -K_{iv,2} & 0 \end{bmatrix} \quad 14 \times 14$$

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

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

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

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

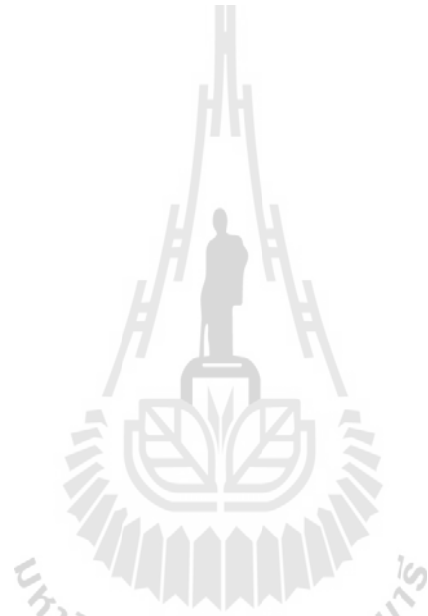
$$a(5,11) = -\frac{2r_c K_{pi,2} I_{L2,o}}{L_{dc}} - \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2} X_{v2,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{ii,2} X_{i2,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}^*}{L_{dc}}$$

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

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

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

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



จากสมการที่ (3-9) จะสังเกตได้ว่า แบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นจะมีค่ามุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้า (λ) ประกอบอยู่ในสมการ i_{ds} และ i_{qs} จึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาค่า λ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะคำนวณหาค่า λ โดยอาศัยทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้ามาวิเคราะห์ระบบทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 3.4 ซึ่งสามารถแสดงสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3-10) ดังนี้

$$\begin{cases} \frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = P_{bus} \\ \frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-10)$$

โดยที่ กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ เมื่อพิจารณาที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-11) ดังนี้

$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{1}{3} \left(\frac{(V_{o1}^*)^2}{R_1} + \frac{(V_{o2}^*)^2}{R_2} + P_{loss} \right) \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-11)$$

โดยที่ V_{o1}^* คือ แรงดันอ้างอิงของวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 1

V_{o2}^* คือ แรงดันอ้างอิงของวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 2

P_{loss} คือ กำลังงานสูญเสียเนื่องจาก r_μ และ r_L

จากสมการที่ (3-10) และ (3-11) สามารถเขียน โปรแกรมสำหรับการคำนวณหาค่า λ โดยอาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและกราฟเส้นด้วย M-file บนโปรแกรม MATLAB ได้ โดยรายละเอียดสามารถดูได้จากภาคผนวก ก. ซึ่งการทำงานของโปรแกรมจะดำเนินการคำนวณหาค่า V_{bus} และ λ ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งความคาดเคลื่อนของคำตอบที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าความคาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่าความคาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 1×10^{-6} เมื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรม จะได้ค่า V_{bus} และ λ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับแรงดันอ้างอิงของวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดทั้ง 2 ชุด หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า V_{bus} และ λ ที่คำนวณได้เป็นค่าในสภาวะคงตัว หรือเป็นค่า ณ จุดปฏิบัติการของระบบ ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดโปรแกรมจะได้ค่า $V_{bus,0}$ และ λ_0

จากค่า $V_{bus,o}$ และ λ_o ที่คำนวณได้ สามารถนำไปใช้สำหรับคำนวณหาค่าในสภาวะ กงตัวค่าอื่น ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{cases} V_{dc,o} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{bus,o}) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,o} - r_L I_{dc,o} \\ V_{o1,o} = V_{o1}^*, \quad V_{o2,o} = V_{o2}^* \\ I_{L1,o} = \frac{V_{o1,o}}{R_1}, \quad I_{L2,o} = \frac{V_{o2,o}}{R_2} \\ X_{v1,o} = \frac{I_{L1,o}}{K_{iv,1}}, \quad X_{v2,o} = \frac{I_{L2,o}}{K_{iv,2}} \\ X_{i1,o} = \frac{V_{o1}}{K_{ii,1}V_{dc,o}}, \quad X_{i2,o} = \frac{V_{o2}}{K_{ii,2}V_{dc,o}} \end{cases} \quad (3-12)$$

โดยที่

$$I_{dc,o} = \frac{\sqrt{3} \left| \frac{V_s e^{j0} - V_{bus,o} e^{-j\lambda_o}}{Z e^{j\gamma}} \right|}{\sqrt{\frac{3}{2} \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right)}} \quad (3-13)$$

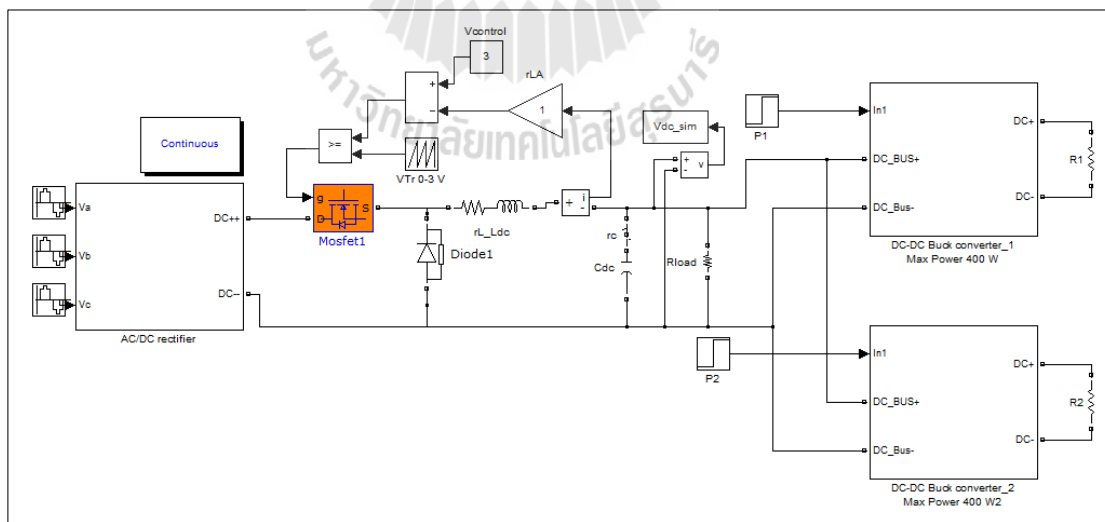
$$Z = \sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}, \quad \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \right)$$

3.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3-9) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ของสัญญาณขนาดเล็กแบบชั่วคราว เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 3.4 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ดูได้จากรูปที่ 3.7 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 3.1 พร้อมด้วยพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้ง สามารถแสดงได้ดังนี้ $K_{pv1} = K_{pv2} = 0.05$, $K_{iv1} = K_{iv2} = 50$, $K_{vi1} = K_{vi2} = 0.7728$, และ $K_{ii1} = K_{ii2} = 11040$ ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดการออกแบบสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากวิทยานิพนธ์ปริญญาโทของ เทพพนม โสกาเพิ่ม (เทพพนม โสกาเพิ่ม, 2554)

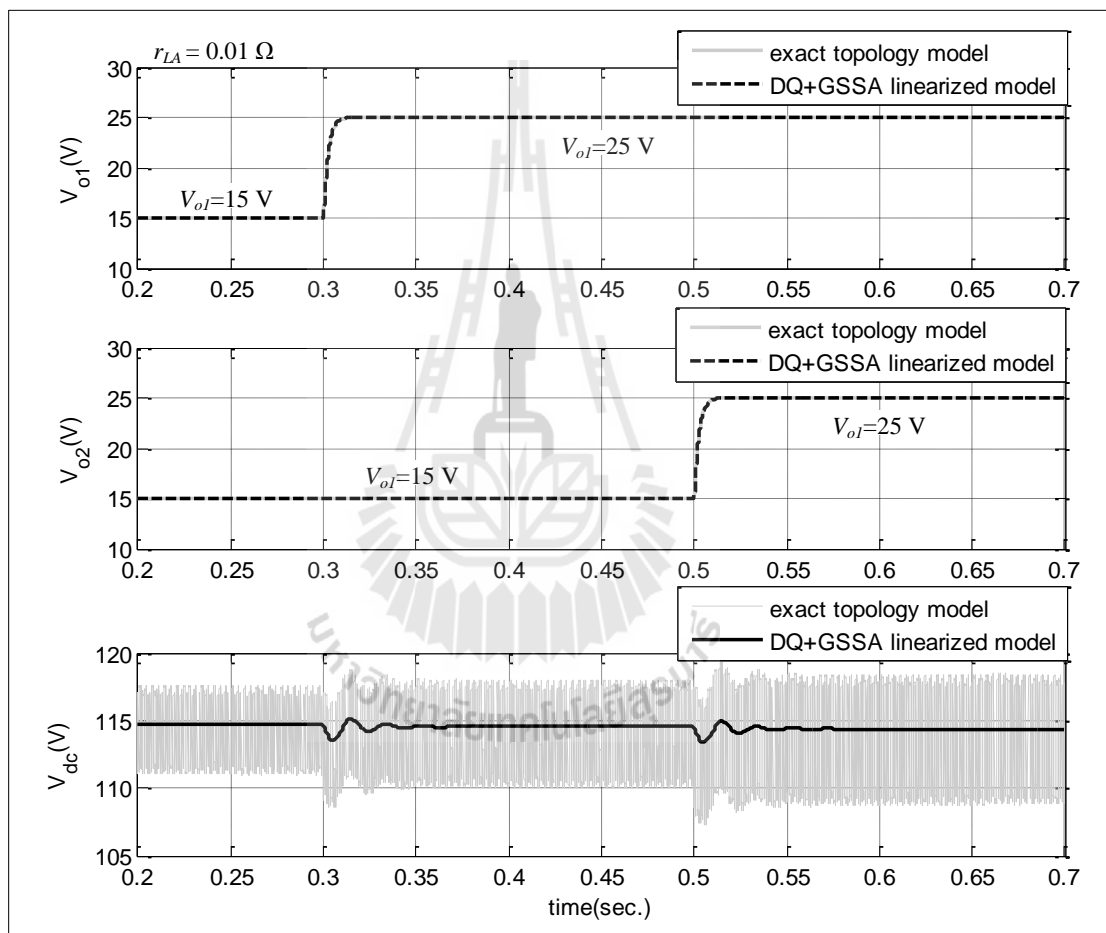
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.4

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	50 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	0.21 mH	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
r_L	0.57 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
L_{dc} ($\Delta I_{dc} \leq 1.5$ A)	37.7 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
C_{dc} ($\Delta V_{dc} \leq 30$ V)	235.35 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
r_c	2.97 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ
$L_1=L_2$ ($\Delta I_{dc} \leq 0.1$ A)	15 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์
$C_1=C_2$ ($\Delta V_{dc} \leq 10$ mV)	125 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์
$R_1=R_2$	20 Ω	ความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบักก์
$V_{control}$	3 V	แรงดันควบคุม
V_{tr}	3 V	แรงดันเปรียบเทียบรูปสัญญาณสามเหลี่ยม



รูปที่ 3.7 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

จากรูปที่ 3.7 แสดงการต่อวงจรโดยอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยการหน่วงแบบแอกทีฟ ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 โดยที่กำหนดให้วงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 1 (V_{o1}) มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตจาก 5 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 0.3 วินาที และวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 2 (V_{o2}) มีเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุต จาก 15 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 0.5 วินาที โดยที่กำหนดให้ค่า r_{LA} มีค่าคงที่เท่ากับ 0.01 Ω



รูปที่ 3.8 ผลการเปลี่ยนแปลงโวลตจวงจรแปลงผันแบบบัก์ชด เมื่อค่า $r_{LA} = 0.01 \Omega$

จากรูปที่ 3.8 สังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้เป็นเชิงเส้น มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้า

กำลัง ทั้งในสถานะชั่วครู่ และสถานะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์มีความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งสามารถนำไปใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยรายละเอียดจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแยกทีพ

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง จะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งได้รับการอธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.3.2 ทฤษฎีค่าเจาะจงได้นำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix) $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ดังสมการที่ (3-14) ดังนี้

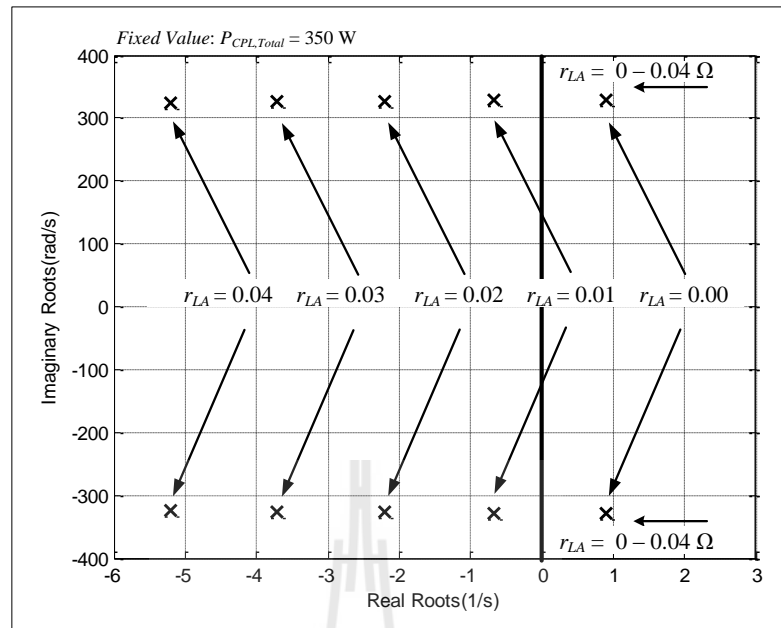
$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (3-14)$$

ถ้าระบบมีเสถียรภาพ ค่าจริงของ λ ที่คำนวณได้จากสมการที่ 3-14 ต้องมีเงื่อนไขดังนี้

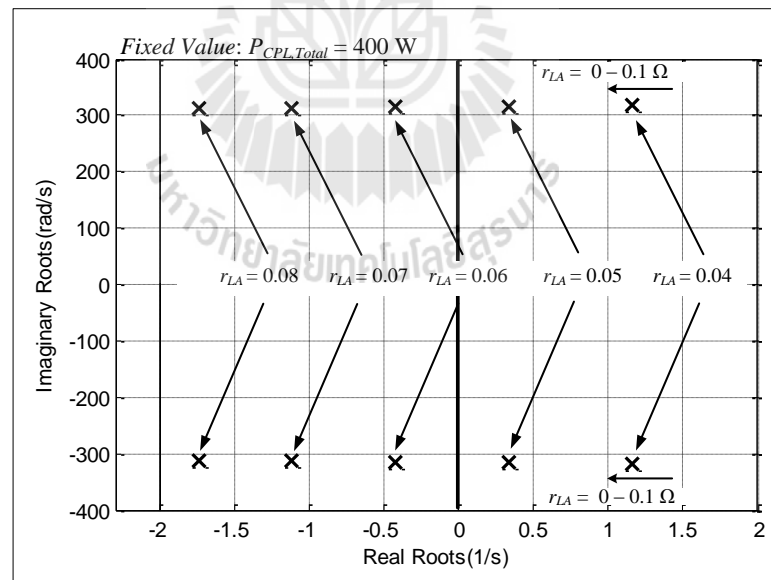
$$\text{real } \lambda_i < 0$$

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

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการห้วงแบบแยกทีพ ในรูปที่ 3.4 สามารถวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} ที่ทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีเสถียรภาพได้ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าเจาะจงที่อาศัยการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยรูปที่ 3.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า r_{LA} จาก 0 ถึง 0.04 โดยที่กำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 1 มีค่า $V_{o1}^* = 70.71$ V (250W) และโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 2 มีค่า $V_{o2}^* = 44.7$ V (100W) และรูปที่ 3.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า r_{LA} จาก 0 ถึง 0.08 โดยที่กำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 1 มีค่า $V_{o1}^* = 70.71$ V (250W) และโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 2 มีค่า $V_{o2}^* = 54.77$ V (150W)

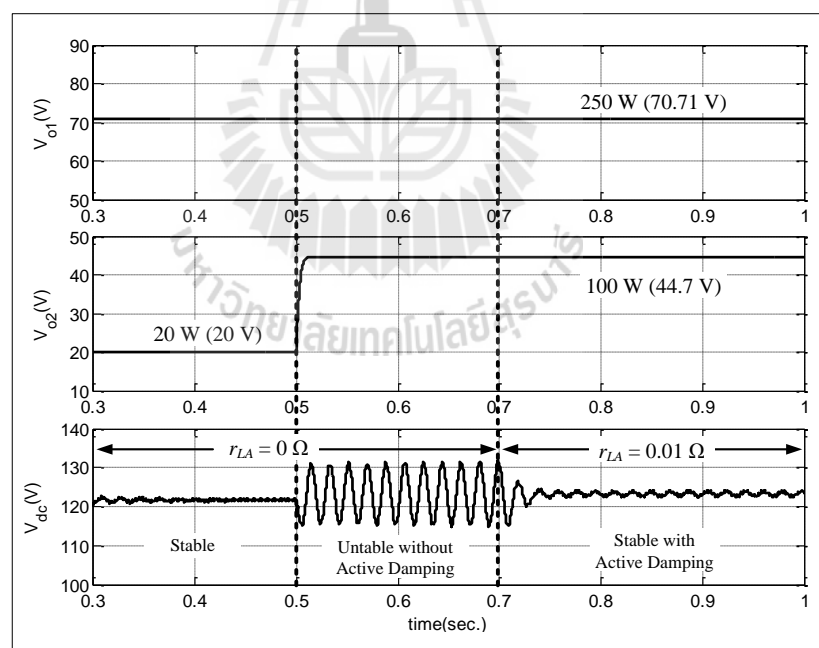


รูปที่ 3.9 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า r_{LA} ที่มีผลต่อเสถียรภาพโดยที่กำหนดให้ผลรวมของวงจรแปลงผันบักกิ้งทั้ง 2 ชุดมีค่า 350 W

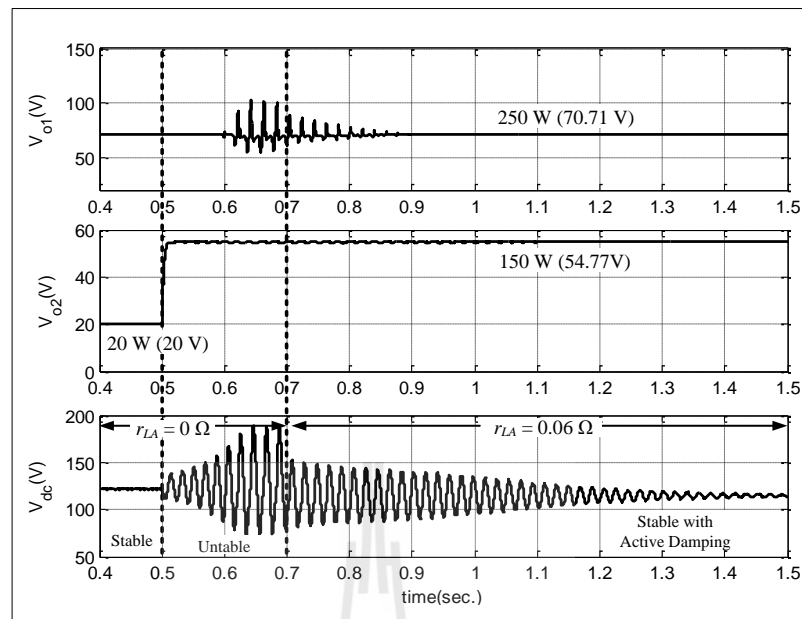


รูปที่ 3.10 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า r_{LA} ที่มีผลต่อเสถียรภาพโดยที่กำหนดให้ผลรวมของวงจรแปลงผันบักกิ้งทั้ง 2 ชุดมีค่า 400 W

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 350 W ที่ค่า r_{LA} มีค่าเท่ากับ 0 Ω (ยังไม่มีภาระชดเชยด้วยการหน่วงแบบแอกทีฟ) ระบบจะขาดเสถียร และเมื่อค่า r_{LA} มีค่าเป็น 0.01 Ω (วงจรการหน่วงแบบแอกทีฟเริ่มทำงาน) ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้แรงดันเอาต์พุตลดลงน้อยที่สุดและทำให้โพลของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมายู่ที่ฝั่งซ้าย ซึ่งหมายถึงระบบที่ขาดเสถียรสามารถกลับมาเสถียรได้อีกครั้ง เพียงแค่การเพิ่มค่าความต้านทานเสมือนจาก 0 Ω มาเป็น 0.01 Ω และรูปที่ 3.10 มีการปรับเพิ่มโพลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 จุดที่มีผลรวมระดับกำลังไฟฟ้าจาก 350 W ไปเป็น 400 W จะเห็นได้ว่า ระบบที่ขาดเสถียรสามารถกลับมาเสถียรได้อีกครั้ง จะต้องเพิ่มค่าความต้านทานเสมือนจาก 0.01 Ω มาเป็น 0.06 Ω ซึ่งการยืนยันผลการวิเคราะห์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยที่มีการปรับตั้งค่าโพลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุดที่ 1 มีค่าคงที่ 250 W และโพลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุดที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 W ไปเป็น 100 W ที่เวลา 0.5 วินาที สำหรับรูปที่ 3.12 ได้ปรับตั้งโพลดวงจรแปลงผันชุดที่ 1 มีค่าคงที่ 250 W และโพลดวงจรแปลงผันชุดที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 W ไปเป็น 150 W ที่เวลา 0.5 วินาที



รูปที่ 3.11 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 350 W



รูปที่ 3.12 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 400 W

จากรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่า เมื่อผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 270 W ไปเป็น 350 W ที่เวลา 0.5 วินาที จะให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งดูได้จากแกว่งของแรงดันบัคค์ซีทีที่มีค่าสูง และภายหลังจากเวลาที่ 0.7 ได้กำหนดให้วงจรการหน่วงแบบแอกทีฟเริ่มทำงาน โดยที่กำหนดให้ค่า r_{LA} มีค่าเท่ากับ 0.01 ซึ่งจะเห็นว่า ระบบจะกลับมามีเสถียรภาพตลอดงานการทำงาน โดยดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัคค์ซีทีที่มีค่าลด และคงที่ในสภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป แต่ถ้าระดับกำลังของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเพิ่มรวมเป็น 400 W ดังแสดงในรูปที่ 3.12 จะต้องทำการเพิ่มค่า r_{LA} มีค่าเท่ากับ 0.06 จึงจะสามารถทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง ซึ่งการวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} ที่เหมาะสมกับระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุด สามารถวิเคราะห์ได้ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-9)

3.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้แนะนำการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบอันเนื่องมาจากโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟพร้อมทั้งแนะนำการวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} ในวงจรควบคุมการหน่วงแบบแอกทีฟผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องสูง ผล

การศึกษาจากทฤษฎี และการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอ ในบทนี้ สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง อย่างไรก็ตาม การยืนยันผล การวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์อาจจะไม่มีความน่าเชื่อถือมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ มีการสร้างชุดทดสอบเพื่อยืนยันวิธีการหนึ่งแบบแยกที่พที่สามารถนำมาใช้สร้างจริงได้สำหรับการ บรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผัน แบบบัคค์ขนานกัน ซึ่งรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 4



บทที่ 4

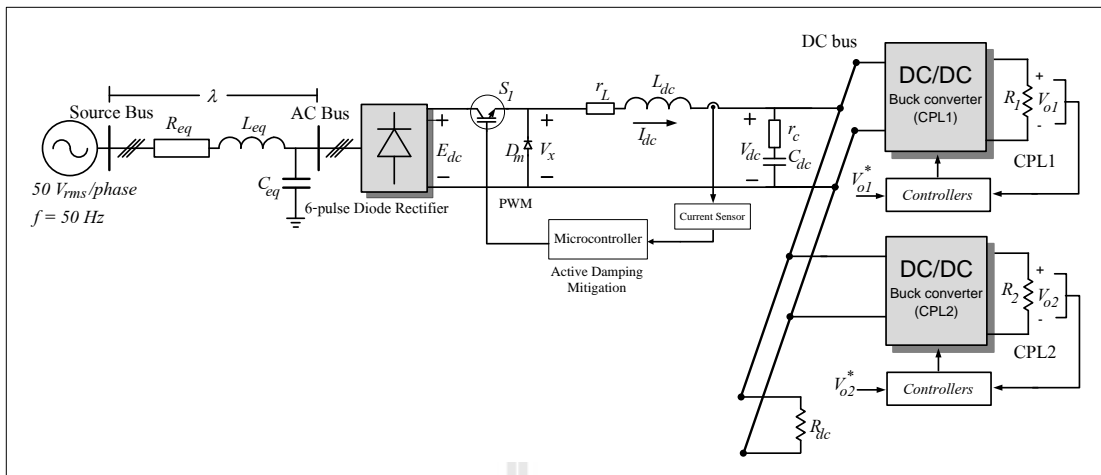
การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ

4.1 บทนำ

การวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} ที่อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง สามารถทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ กลับมามีเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ผลของค่าดังกล่าวที่อาศัยการยืนยันผลด้วยการ โปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ อาจจะไม่เพียงพอต่อความน่าเชื่อถือมากนัก ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ เพื่อให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน โดยที่ไม่ประสบปัญหาจากการขาดเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การสร้างชุดทดสอบที่พิจารณาในบทนี้ประกอบไปด้วย วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองแรงดันบัสดีซี วงจรการหน่วงแบบแอกทีฟ และวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมซึ่งวงจรที่มีการควบคุมจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น EASY-MAGA1280 โดยผลการทดสอบสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟจะอาศัยผลการวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} ที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 3 มาใช้ในการ โปรแกรมบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่จับคู่ปฏิบัติงานเดียวกัน เพื่อให้ผลของชุดทดสอบมีความสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และทำให้เห็นว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

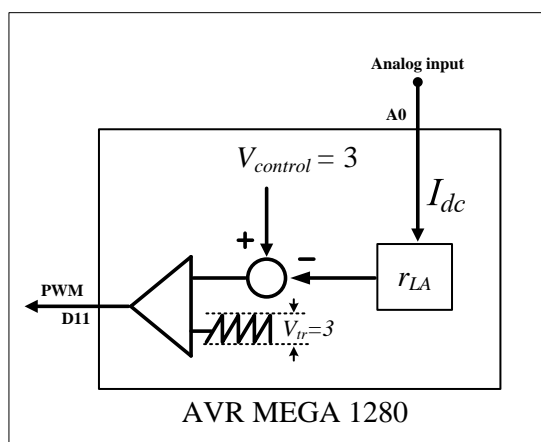
4.2 การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการ หน่วงแบบแอกทีฟ

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟที่พิจารณาการสร้างเป็นชุดทดสอบคือ ระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 3.4 ในบทที่ 3 จากระบบดังกล่าว เมื่อนำมาเขียนแสดงใหม่สำหรับการใช้ในการอธิบายการสร้างชุดทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



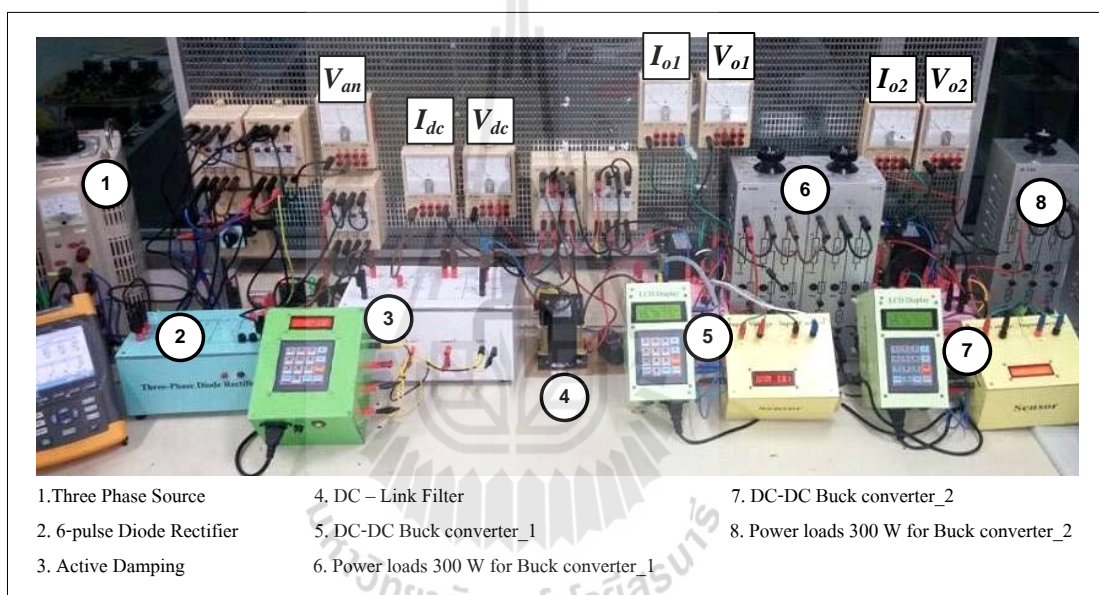
รูปที่ 4.1 ระบบที่พิจารณารบบการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ จะมีกระบวนการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรทางดิจิทัลและวงจรทางแอนะล็อก โดยที่วงจรทางแอนะล็อกคือ วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_{dc}) ทำหน้าที่รับค่าจากกระแสไฟฟ้าจริงให้ออกมาอยู่ในรูปของแรงดันที่มีค่าไม่เกิน 5V ซึ่งเป็นแรงดันที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทนแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด และส่งค่าดังกล่าวไปยังวงจรทางดิจิทัล โดยที่วงจรทางดิจิทัลจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASYMEGA1280 เนื่องจากผู้วิจัยมีความถนัดและเชี่ยวชาญเป็นอย่างดี ซึ่งรายละเอียดการคำนวณภายในบอร์ดดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพการทำงานของวิธีการห้วงแบบแอกทีฟภายในบอร์ด AVR เบอร์ Atmaga1280

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าวงจรทางดิจิทัลจะประกอบไปด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR โดยที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีหน้าที่อ่านค่าจากวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่พิน (A0) จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการของวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ และนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณพื้นเลื้อยของมอดูลสร้างสัญญาณ PWM และส่งค่าสัญญาณดังกล่าวไปยังวงจรการสวิตช์ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งผลการดำเนินการสร้างชุดทดสอบดังในรูปที่ 4.1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 จากรูปดังกล่าวการดำเนินการสร้างชุดทดสอบได้ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 6 ชุดอุปกรณ์หลัก ดังนี้



รูปที่ 4.3 ภาพการต่อวงจรชุดทดสอบ

4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างระบบไฟฟ้าที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ

อุปกรณ์ที่ 1 หม้อแปลงสามเฟส (Three-phase transformer) แบบปรับค่าได้ รุ่น IBC-VR3000-3 ของบริษัทผู้ผลิต Takamura ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต 415 V และด้านเอาต์พุตสามารถปรับใช้งานได้ในช่วง 0 ถึง 450 V โดยหม้อแปลงดังกล่าว จะถูกใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสสำหรับระบบที่พิจารณาที่มีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกับ 50V_{rms} ความถี่มาตรฐานเท่ากับ 50 Hz สำหรับรูปร่างของหม้อแปลงดังกล่าวสามารถดูได้รูปที่ 4.4 ดังนี้



รูปที่ 4.4 หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้ รุ่น IBC-VR3000-3

อุปกรณ์ที่ 2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ไดโอด (Three-phase rectifier) รุ่น VS-36MT160 ของบริษัท Vishay โดยมีพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 35 A และพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1600 V ทำหน้าที่เป็นโหนดวงจรเรียงกระแสของระบบที่พิจารณา โดยรูปร่างของอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ดังนี้



รูปที่ 4.5 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ไดโอดรุ่น VS-26MT160

อุปกรณ์ที่ 3 ชุดวงจรการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ ซึ่งภายในประกอบไปด้วย วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่เชื่อมต่อด้วยจอแสดงผล LCD และคีย์สวิตช์เมตริกซ์ (KEYPAD) แบบ 4X4 วงจรการสวิตช์ใช้เป็น MOSFET เบอร์ IRFP250N และไดโอดกำลังเบอร์ RURG8060 โดยรูปร่างชุดวงจรการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟแสดงได้ดังรูปที่ 4.6

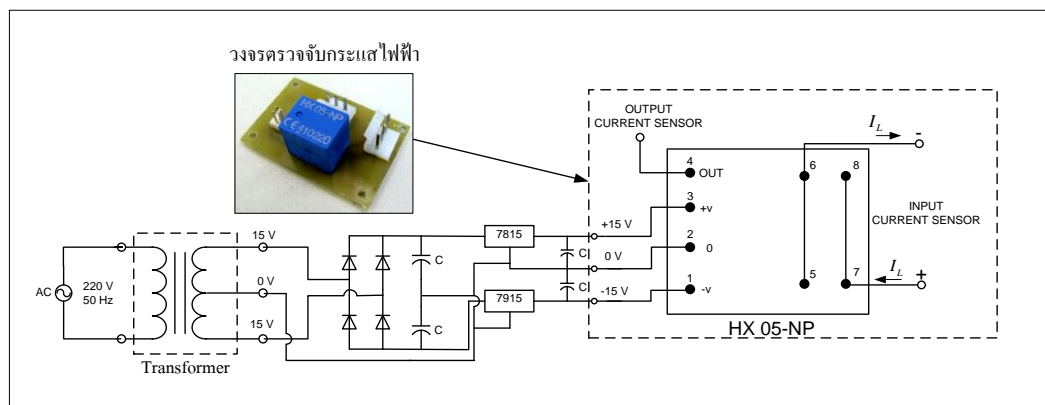


รูปที่ 4.6 วงจรการหน่วงแบบแอกทีฟ

จากรูปที่ 4.6 สังเกตได้ว่า ชุดทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ จะมีการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรทางดิจิทัล และวงจรแอนะล็อก ตามที่ได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ซึ่งรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์สามารถได้รับการอธิบายได้ดังต่อไปนี้

วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP พิกัดกระแส 5 แอมแปร์ ทำหน้าวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ โดยจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดัน -15V , 0V และ $+15\text{V}$ ซึ่งองค์ประกอบการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 4.7 ดังนี้

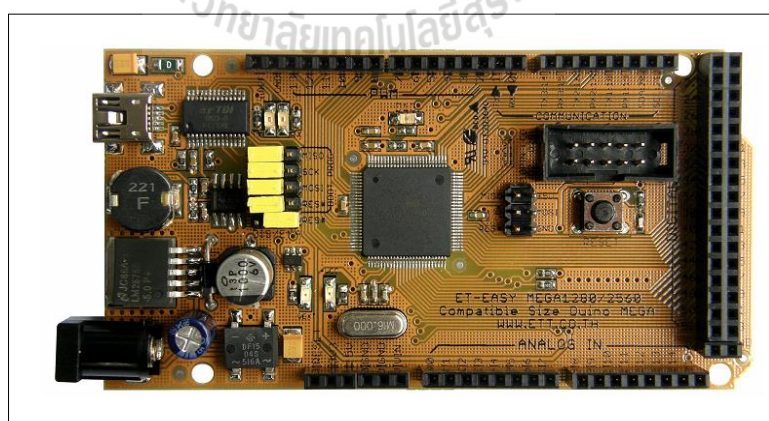


รูปที่ 4.7 ภาพการต่อวงจรชุดทดสอบวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.7 ของวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า จะสังเกตได้ว่า การต่อวงจรของการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ หรือทางด้านปฐมภูมิ มีด้วยกัน 2 แบบ คือ การต่อแบบอนุกรม และการต่อแบบขนาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกการต่อวงจรของการวัดกระแสไฟฟ้าแบบขนาน เพื่อเพิ่มพิกัดของการวัดกระแสไฟฟ้าเป็น 2 เท่า โดยจาก 5 แอมแปร์ ไปเป็น 10 แอมแปร์ และลดความเสี่ยงของการเกิดความเสียหาย เมื่ออุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ามามีค่าเกิน 5 แอมแปร์

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เป็นหนึ่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ผลิตโดยบริษัท ATMEL โดย AVR จัดเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลใหม่จาก ATMEL ที่มีประสิทธิภาพและความสามารถสูง โดยแบ่งออกเป็นหลายรุ่น เพื่อรองรับความต้องการที่แตกต่างของผู้ใช้งาน ในขณะที่ยังคงความมีประสิทธิภาพที่เท่ากัน สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยเลือกใช้บอร์ด ATMEGA 1280 เนื่องจากเป็นชุดบอร์ด AVR ที่พัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C++ ของ Arduino ของทางบริษัท อีทีที เป็นผู้จัดทำ ซึ่งง่ายต่อการเขียนโปรแกรมสำหรับการใช้งาน และสามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย โดยปรับปรุงโปรแกรมให้ใช้กับชิพ AVR ที่ใหญ่ขึ้น เพื่อให้มีจำนวนพอร์ตอินพุต, พอร์ตเอาต์พุต รวมทั้ง พอร์ตดิจิทัล, พอร์ตแอนะล็อก, พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM, พอร์ตการสื่อสารอนุกรม ผ่านมอดูและขนาดหน่วยความจำที่เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม ทางบริษัทอีทีที จึงได้นำ ATMEGA1280 มาพัฒนาเป็นชุดบอร์ด โดยใช้ชื่อว่า ET-EASY MEGA1280 (โครงสร้างของชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280 สามารถดูได้จากภาคผนวก ข ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8 ดังนี้



รูปที่ 4.8 ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280

คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280

- เป็นไมโครคอนโทรเลอร์ขนาด 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
- มีระบบโปรแกรมตัวเองอยู่ในชิพ
- สามารถทำการอ่านขณะเขียนได้จริง โดยสามารถล๊อคการทำงานได้เพื่อความปลอดภัยของซอฟต์แวร์
- 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 ส่งข้อมูล เรียงไปค้
- มีตัวตั้งเวลาแบบวอตช์ด็อกที่สามารถกำหนดการทำงานได้โดยสามารถแยก สัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ
- มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณแอนะล็อกอยู่ในตัว
- มีการรองรับการขัดจังหวะและ เวก-อัฟ (wake-up) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ของขาชิพ
- 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 μA ที่แรงดัน 1.8 V

พอร์ตอินพุตเอาต์พุตสำหรับบอร์ด ET-EASY MEGA1280

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 มีจำนวน 100 พิน โดยมี พอร์ตอินพุตเอาต์พุตที่ใช้งานจำนวน 11 พอร์ต ประกอบไปด้วย พอร์ต A ถึง พอร์ต K แต่ละพอร์ต มีขนาด 8 บิต ซึ่งรายละเอียดของแต่ละพอร์ต สามารถดูได้จากภาคผนวก ก สำหรับพอร์ตที่จำเป็น สำหรับการใช้งานในวิจัยนี้ คือ พอร์ต A บิตที่ 0 ถึงบิตที่ 7 ทำหน้าที่ส่งข้อมูลไปยังมอดูล LCD เพื่อ แสดงผล พอร์ต B บิตที่ 5 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ PWM พอร์ต C บิตที่ 0 ถึง บิตที่ 7 โดยให้ บิตที่ 0 ถึงบิตที่ 3 ทำหน้าที่เป็นอินพุต ส่วนบิตที่ 4 ถึงบิตที่ 7 ทำหน้าที่เป็นเอาต์พุต เพื่ออ่านค่าคีย์สวิตช์

ปุ่มกดทั้ง 16 ตัว โดยใช้หลักการคีย์สวิตช์แบบเมตริกซ์ และ พอร์ต F บิตที่ 0 ทำหน้าที่เป็นอินพุตเพื่อรับสัญญาณแอนะล็อก

การใช้งานมอดูแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR มีมอดูแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลหรือ ADC (analog to digital converter) ความละเอียดขนาด 10 บิต (10-bit resolution) ที่แรงดัน +5V ซึ่งหมายถึงเมื่อแปลงเป็นสัญญาณเป็นดิจิทัลแล้วจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 – 1024 โดยมีมอดู ADC จำนวน 16 ช่องอินพุตสัญญาณ คือ ADC0-ADC15 ซึ่งจะกำหนดไว้ที่พอร์ต F ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ช่องสัญญาณเพียง 2 ช่อง คือ ช่อง ADC0 และช่อง ADC1 โดยผลการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล จำนวนได้จากสมการที่ (4-1)

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{REF}} \quad (4-1)$$

โดยที่ V_{IN} คือ แรงดันด้านขาอินพุต

V_{REF} คือ แรงดันอ้างอิงจะถูกกำหนดไว้ที่ 5 V

การสร้างสัญญาณ PWM กับ ไทมเมอร์/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 ซึ่งเป็นโหมดที่นำไปใช้สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยความถี่ของสัญญาณ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-2) ดังนี้

$$f_{pwm} = \frac{f_{clk}}{2.N.TOP} \quad (4-2)$$

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

TOP คือ ค่าที่กำหนดให้กับรีจิสเตอร์ ICR1 ซึ่งมีขนาด 16 บิต

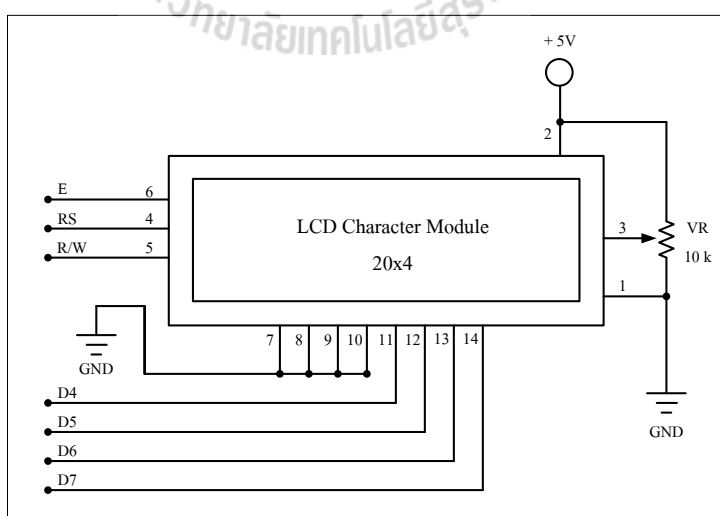
f_{clk} คือ ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ในที่นี้ใช้ 16 MHz

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ความถี่การสวิทช์มีค่าเท่ากับ 10 KHz ดังนั้น จากสมการที่ (4-2) จะสามารถหาค่าที่กำหนดให้กับรีจิสเตอร์ IRC1 แสดงได้ดังนี้

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

การใช้งานมอดูลแสดงผล LCD (LIQUID CRYSTAL DISPLAY MODULE)

หน่วยแสดงผลมอดูล LCD หรือ หน่วยแสดงผลแบบผลึกเหลว โดยมอดูล LCD จะมีอยู่สองชนิดด้วยกัน คือ แบบตัวอักษร และแบบกราฟิก สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้แบบตัวอักษรซึ่งโครงสร้างการต่อใช้งานพื้นฐานของมอดูล LCD แสดงดังรูปที่ 4.9 ดังนี้



รูปที่ 4.9 ภาพการต่อใช้งานมอดูล LCD

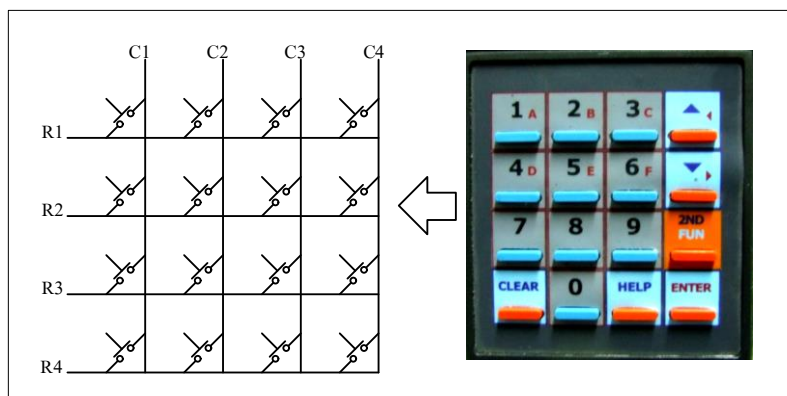
จากรูปที่ 4.9 รายละเอียดขาสัญญาณของมอดูล LCD มีดังนี้

- ขาที่ 1 : GND สำหรับต่อขากราวด์ของวงจร
- ขาที่ 2 : +Vcc ต่อไฟเลี้ยง + 5V
- ขาที่ 3 : +Vo สำหรับปรับความสว่างของหน้าจอ
- ขาที่ 4 : RS (Register Select) ขาเลือกการติดต่อกับปริจิสเตอร์คำสั่งหรือข้อมูล 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 4.9 ของขาข้อมูลที่ 7 ถึง 14 จะสังเกตได้ว่า เป็นการเชื่อมต่อขาข้อมูลของมอดูล LCD ผ่านชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 4 บิต จะทำให้ประหยัดขาสัญญาณอินพุต/เอาต์พุต ที่ต้องใช้ในการเชื่อมต่อกับ LCD ได้กว่าการเชื่อมต่อวงจรแบบ 8 บิต เนื่องจากวิธีนี้จะสูญเสียขาสัญญาณเพื่อใช้ในการควบคุมการแสดงผล LCD เพียง 7 เส้นเท่านั้น ซึ่งตามปกติแล้วการเชื่อมต่อขาสัญญาณเพื่อการควบคุมการแสดงผล LCD แบบ 8 บิต นั้นจะต้องสูญเสียขาสัญญาณถึง 11 เส้น แต่วิธีการนี้ก็ต่อมมาด้วยความซับซ้อนในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการแสดงผลของ LCD ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำไลบรารี (Library) สำหรับใช้การควบคุมการแสดงผลแบบ 4 บิตของบริษัท อีทีที ที่ได้เป็นผู้เขียน นำมาใช้งาน ทำให้สามารถเขียนโปรแกรมสั่งงาน LCD ได้ง่ายมากขึ้นและใช้โค้ด (Code) คำสั่งน้อยลงด้วย

การใช้งานคีย์สวิตช์เมตริกซ์ (KEYPAD)

การอ่านค่าคีย์สวิตช์ปุ่มกด หากใช้ขาพอร์ตต่อเข้ากับปุ่มโดยตรง จำนวนขาพอร์ตจะถูกใช้ไปเท่ากับจำนวนปุ่มกดที่ใช้งาน หากใช้สวิตช์จำนวน 16 ตัว จะต้องเสียขาพอร์ตไปทั้งหมด 16 ขาพอร์ต การต่อใช้งานพอร์ตจำนวนมากๆ จึงนิยมที่จะต่อในรูปแบบที่เรียกว่าคีย์สวิตช์เมตริกซ์ โดยการออกแบบคีย์เมตริกซ์แสดงดังรูปที่ 4.10 ดังนี้

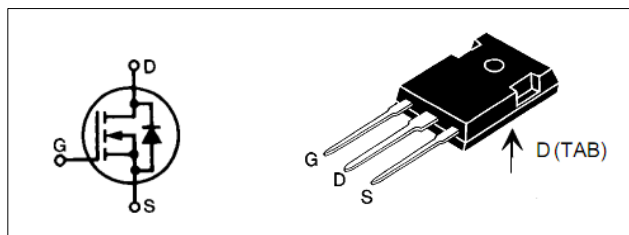


รูปที่ 4.10 การต่อสัญญาณแบบคีย์สวิตช์

จากรูปที่ 4.10 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 เมื่อเขียน โปรแกรมและอ่านค่าจากแถว (row) ทั้งหมด โดยหากแถวใดมีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าแถวนั้นมีการกดคีย์สวิตช์ ทำให้ทราบว่าคีย์สวิตช์ตำแหน่งใดมีการกดเกิดขึ้น ซึ่งการสแกนคีย์บอร์ดจะต้องกำหนดตำแหน่งที่จะสแกนในคอลัมน์และอ่านคีย์จากแถว

วงจรการสวิตช์ของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

วงจรการสวิตช์ในงานวิจัยนี้จะใช้วงจรที่เป็นลักษณะมอดู การออกแบบจะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแสเป็นสำคัญ โดยค่าพิกัดกระแสของโหลดเท่ากับ 10 A ในขณะที่แรงดันมีค่าเท่ากับ 120 V และเมื่อคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25 เปอร์เซ็นต์ มอดูที่ใช้สำหรับวงจรรูปยกเล็กจะมีค่าพิกัดกระแสมากกว่า 10 A และมีค่าพิกัดแรงดันมากกว่า 120 V เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้มอดูที่มีพิกัดแรงดัน 250 V พิกัดกระแส 25 A ซึ่งมอดูดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.11 ดังนี้



รูป 4.11 มอดูลการสวิตช์ของวงจรการนำแบบแอกทีฟ

ไดโอดกำลัง

พิจารณาจากโครงสร้างของวิธีการนำแบบแอกทีฟในรูปที่ 4.1 ไดโอด D_r ต้องมีพิสัยแรงดันมากกว่าค่าแรงดันเอาต์พุตดีซี ซึ่งมีค่าเท่ากับ 116.9 V แต่เมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ ค่าพิสัยแรงดันของไดโอด D_m จะมีค่ามากกว่า 146.13 V เพราะฉะนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไดโอด D_m ที่มีพิสัยแรงดัน 200 V ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.12 ดังนี้



รูปที่ 4.12 ไดโอดของวงจรการนำแบบแอกทีฟ

อุปกรณ์ที่ 4 วงจรกรองแรงดันบัสดีซีที่ประกอบไปด้วย ตัวเหนี่ยวนำ L_{dc} ดังแสดงในรูปที่ 4.13 มีค่าขนาดเท่ากับ 37.7 mH พิกัดกระแสไฟฟ้า 10 A และตัวเก็บประจุ C_{dc} ดังในรูป 4.14 ขนาดความจุไฟฟ้า 237.35 μF (ใช้ตัวเก็บประจุขนาด 470 μF สองตัวมาต่ออนุกรมกัน และเป็นค่าที่ผ่านการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งสามารถดูได้ใน T. Sopapirm and al et.) โดยมีพิสัยแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 800 V



รูปที่ 4.13 ตัวเหนี่ยวนำ L_{dc} ขนาดเท่ากับ 37.7 mH



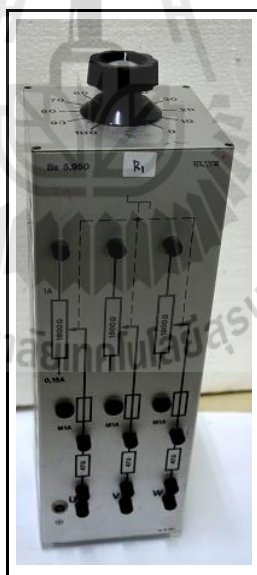
รูปที่ 4.14 ตัวเก็บประจุ C_{dc} ขนาดเท่ากับ 237.35 μ F

อุปกรณ์ที่ 5 ชุดวงจรแปลงผันแปลงผันแบบบัคค์ที่ประกอบไปด้วย 3 วงจรหลักๆ คือ วงจรการสั่งงานผ่านคีย์สวิตช์เมตริกซ์ที่มีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ชุดวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ชุดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีอุปกรณ์การสวิตช์เป็น MOSFET เบอร์ IRFP250N ไอโอดกำลังเบอร์ MUR160 ตัวเหนี่ยวนำขนาดเท่ากับ 15 mH และตัวเก็บประจุขนาดเท่ากับ 125 μ F ซึ่งรายละเอียดการสร้างวงจรสามารถดูได้จากวิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตของเทพพนม (เทพพนม โสภานเพิ่ม, 2554) สำหรับรูปร่างของชุดวงจรแปลงผันแบบบัคค์แสดงได้ดังรูปที่ 4.15 ดังนี้



รูปที่ 4.15 ชุดวงจรแปลงผันแบบบัคค์

อุปกรณ์ที่ 6 โหลดตัวต้านทานสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์มีค่าเท่ากับ 20 Ω พิกัดกำลังไฟฟ้า 300 W โดยรูปร่างตัวต้านทานแสดงได้ดังรูปที่ 4.16

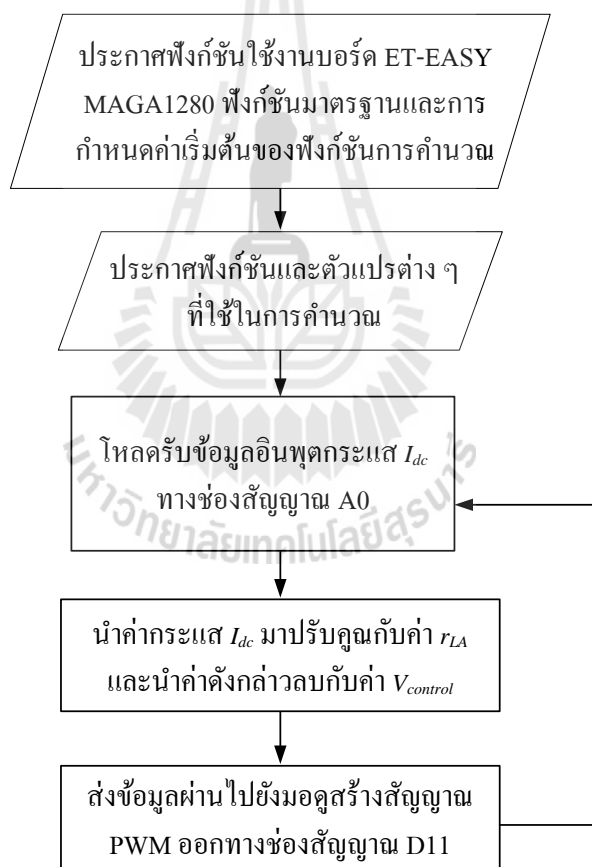


รูปที่ 4.16 ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 20 Ω

จากการอธิบายอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสร้างชุดทดสอบของระบบที่มีการบรรเทา การขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ ลำดับต่อไป คือ การอธิบายการโปรแกรมควบคุม การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟตามรูปที่ 4.2 ภายในบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2.2 การโปรแกรมระบบควบคุมการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบ แอक्तिพ

การโปรแกรมการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอक्तिพ ประกอบไปด้วย การอ่านค่าจากวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_{dc}) การคำนวณหาผลคูณระหว่างค่า r_{LA} และค่า I_{dc} การแปลงข้อมูลของสัญญาณจากวิธีการห้วงแบบแอक्तिพให้มาเป็นสัญญาณ PWM ซึ่งโครงสร้างการทำงานของวิธีห้วงแบบแอक्तिพดังในรูปที่ 6.2 จะถูกโปรแกรมลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR โดยใช้ภาษาซีซึ่งสามารถดูแผนภูมิการโปรแกรมได้ดังรูปที่ 4.17 จากรูปดังกล่าว การโปรแกรมการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอक्तिพ สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 4.17 แผนภูมิการ โปรแกรมของวิธีการห้วงแบบแอक्तिพ

ส่วนที่ 1 คือ การประกาศเรียกฟังก์ชันใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MAGA1280 ฟังก์ชันมาตรฐานของการโปรแกรมด้วยภาษาซี และรวมถึงการ

กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น ฟังก์ชัน ADC(การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล เป็นต้น

ส่วนที่ 2 คือ การกำหนดฟังก์ชันและตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ

ส่วนที่ 3 คือ การโหลดรับข้อมูลอินพุตที่ใช้ในการคำนวณของวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ นั่นคือค่ากระแส I_{dc} ผ่านทางช่องสัญญาณแอนะล็อก A0

ส่วนที่ 4 คือ หาผลคูณระหว่างค่ากระแส I_{dc} และค่า r_{LA} เพื่อนำค่าที่ได้มาลบกับค่า $V_{control}$ ตามแนวทางของวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ

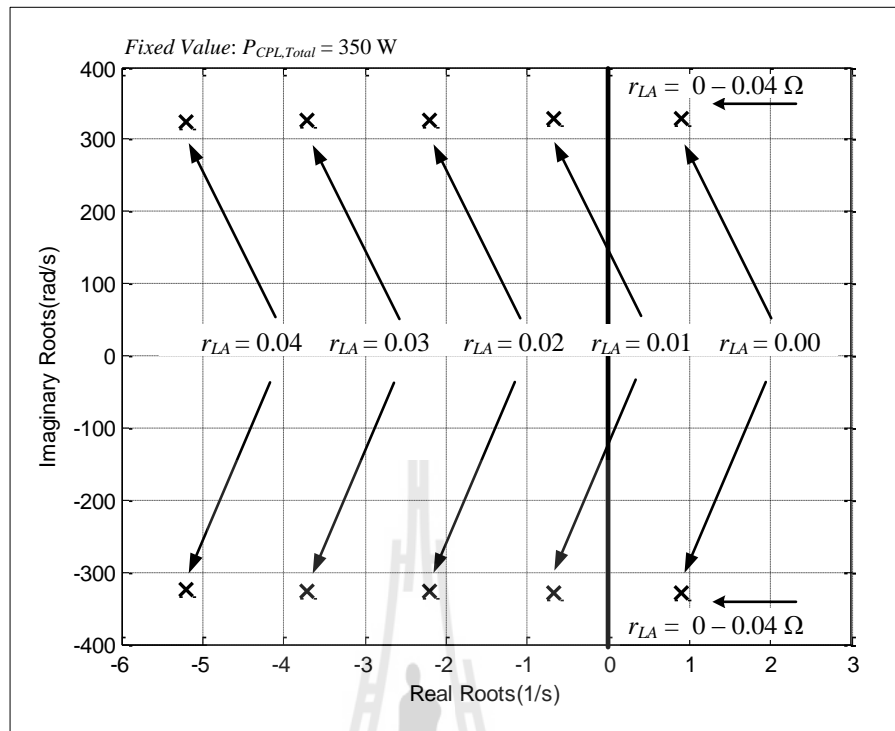
ส่วนที่ 5 คือ แปลงค่าข้อมูลของกระบวนการวิธีห้วงแบบแอกทีฟให้มาเป็นสัญญาณ PWM และส่งค่าดังกล่าวให้กับวงจรการสวิตซ์ทางช่องสัญญาณ D11

การอธิบายแผนภูมิการโปรแกรมข้างต้นคือ การคำนวณของวิธีการห้วงแบบแอกทีฟเพียงรอบแรกเท่านั้น โดยการคำนวณในรอบต่อไป จะเริ่มทำการรับข้อมูลอินพุตค่ากระแสค่าใหม่ (การโปรแกรมในส่วนที่ 3) และหลังจากนั้นจึงดำเนินการคำนวณซ้ำในแต่ละส่วนใหม่ตลอดการทำงานของวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรมทั้งหมดต่อหนึ่งรอบการคำนวณมีค่าโดยประมาณ 0.5 มิลิวินาที

หมายเหตุ: โค้ดโปรแกรมภาษาซีการควบคุมของวิธีการห้วงแบบแอกทีฟสามารถดูได้จากภาคผนวก ง.

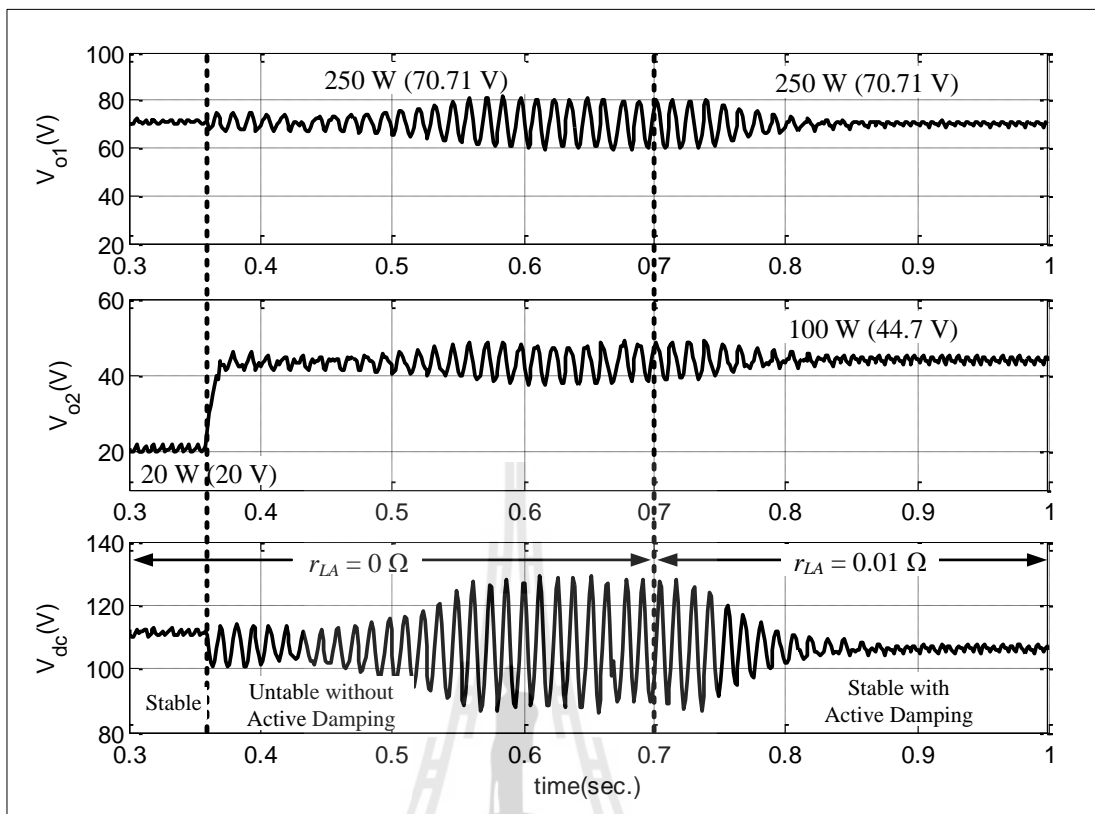
4.3 การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ

การทดสอบในทางปฏิบัติของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ จะทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า r_{LA} โดยอาศัยผลการวิเคราะห์จากทฤษฎีบทค่าเจาะจง ค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองเชิงพลวัตที่ได้รับการพิสูจน์ไว้ในบทที่ 3 ซึ่งหลักการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะพิจารณาการเพิ่ม โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชูดที่ 2 จาก 20 W ไปเป็น 100 W โดยที่กำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชูดที่ 1 มีค่าคงที่เป็น 250 W จากนั้นเริ่มทำการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยทำการเพิ่มค่า r_{LA} ที่ละ 0.01 Ω ไปจนถึง 0.04 Ω ซึ่งผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.18



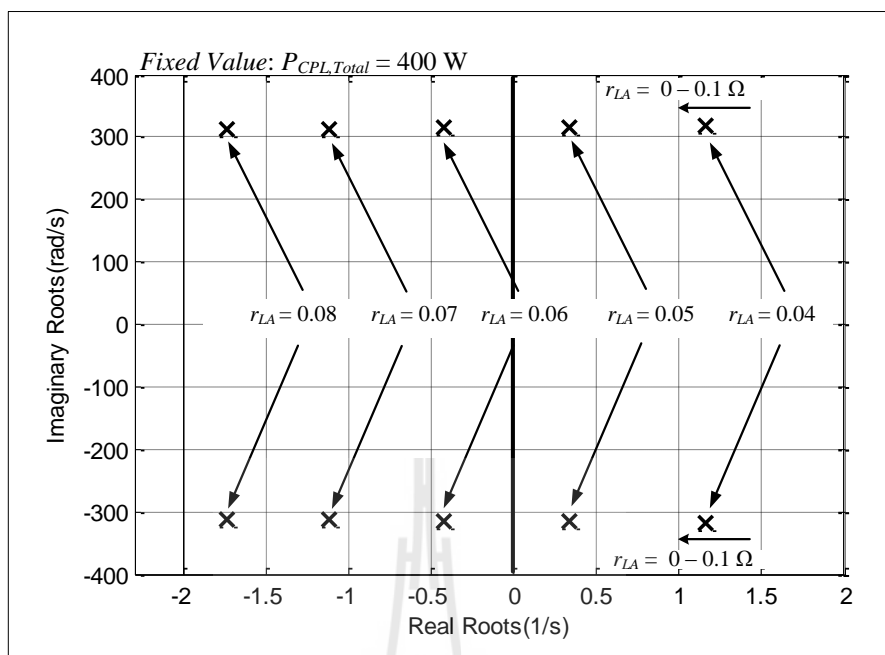
รูปที่ 4.18 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ โดยกำหนดให้ผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 350 W

จากรูปที่ 4.18 จะสังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์มีค่าเท่ากับ 350 W โดยที่ค่า r_{LA} มีค่าเท่ากับ 0 Ω (วงจรการหน่วงแบบแอกทีฟไม่ทำงาน) จะทำให้ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เกิดการขาดเสถียรภาพ แต่ถ้าทำการเพิ่มค่า r_{LA} จาก 0 Ω ไปเป็น 0.01 Ω (วงจรการหน่วงแบบแอกทีฟเริ่มทำงาน) จะทำให้ขั้วของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งขวาไปยังฝั่งซ้ายของระนาบ S ซึ่งหมายถึงระบบที่ขาดเสถียรภาพ จะกลับมามีเสถียรภาพใหม่ได้อีกครั้งโดยที่ค่า r_{LA} มีค่าเป็น 0.01 Ω ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 โดยแสดงการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อกำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุดที่ 1 มีค่า 250 W และ โหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุดที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 20 W ไปเป็น 100 W ที่เวลา 0.35 วินาที โดยที่ผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามี่ค่าเป็น 350 W



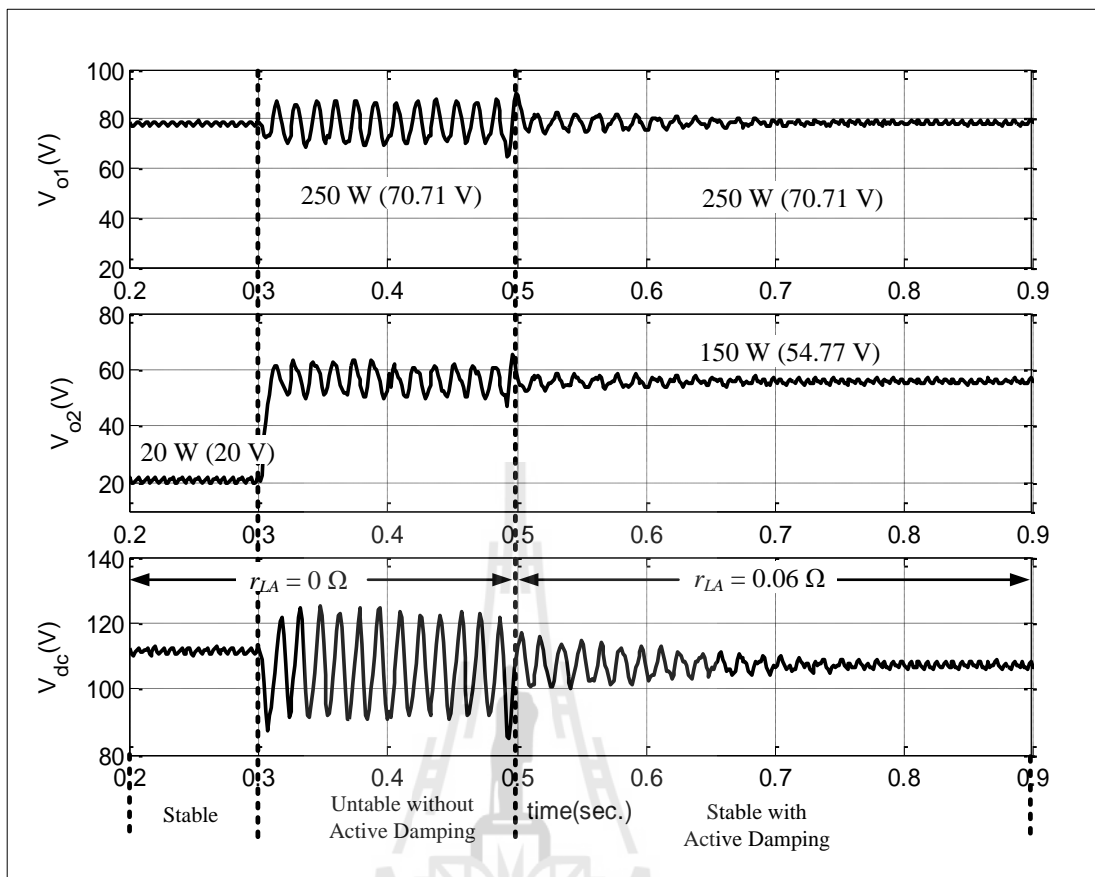
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า r_{LA} มีค่าเท่ากับ 0.01Ω

จากรูปที่ 4.19 สังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดของวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเป็น 350 W จะทำให้ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เกิดการขาดเสถียรภาพ และเมื่อหลังจากวงจรการหน่วงแบบแอกทีฟเริ่มทำงาน โดยที่กำหนดค่า r_{LA} มีค่าเท่ากับ 0.01Ω จะทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเพิ่มโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุดที่ 2 จาก 100 W ไปเป็น 150 W อาจจะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะสำหรับการวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพเมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุดมีค่า 400 W โดยทำการเพิ่มค่า r_{LA} ที่ละ 0.01Ω ไปจนถึง 0.1Ω ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ โดยกำหนดให้ผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 400 W

จากรูปที่ 4.20 จะสังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเป็น 400 W จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพโดยที่ค่า r_{LA} มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 0.05 Ω และระบบจะมีเสถียรภาพอีกครั้งจะต้องทำการเพิ่มค่า r_{LA} ไปเป็น 0.06 Ω ตามผลที่ได้วิเคราะห์ในรูปที่ 4.20 โดยผลการบรรเทาการขาดเสถียรของชุดทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.21 ซึ่งแสดงผลการขาดเสถียรภาพเมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์มีค่าเท่ากับ 400 W และผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอคทีฟ เมื่อค่า r_{LA} มีค่าเท่ากับ 0.06 Ω



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า r_{LA} มีค่าเท่ากับ 0.06

จากรูปที่ 6.16 จะสังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 400 W จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ และภายหลังจากเวลาที่ 0.5 วินาที ได้สั่งให้วงจรหนึ่งแบบแอคทีฟเริ่มทำงาน โดยที่กำหนดให้ค่า r_{LA} มีค่าเท่ากับ 0.06 Ω จะทำให้ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยนี้กลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง ซึ่งดูได้จากผลของการแกว่งของรูปสัญญาณแรงดันบัสดีซีที่มีค่าลดลง และทำให้สมรรถนะการควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัก์ดีขึ้น

4.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 กล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบการสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ด้วยวิธีการหนึ่งแบบแอคทีฟ ซึ่งในเบื้องต้นได้อธิบายถึงโครงสร้างการทำงานของแต่ละวงจร ได้แก่ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองแรงดันบัสดีซี วงจรการหนึ่งแบบแอคทีฟ ที่มีการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรทางดิจิทัลและวงจรแอนะล็อก โดยที่วงจรทางดิจิทัลจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MAGA1280 สำหรับการอ่านค่าอินพุตกระแสที่ไหลภายในตัวเหนี่ยวนำได้จากวงจรทางแอนะล็อก นั่นคือวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า โดยวงจร

ดังกล่าวได้มีการอธิบายการใช้งานและการทำงานแต่ละวงจรไว้พอสังเขป สำหรับโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวความต้านทานทั้ง 2 ชุด จะใช้บอร์ดรุ่นเดียวกันกับวงจรการหน่วงแบบแอกทีฟ ซึ่งได้มีการอธิบายความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้งานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR การใช้งานจอแสดงผล LCD คีย์สวิตช์เมตริกซ์ มอดูการสร้างสัญญาณ PWM การออกแบบวงจรการสวิตซ์ที่ใช้ MOSFET ไดโอดโอดกำลัง รวมถึงการเขียนโปรแกรมควบคุมการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ ภายหลังจากการอธิบายการสร้างวงจรถัดกล่าว ผู้วิจัยจึงเริ่มทำการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยอาศัยการดำเนินวิธีการเช่นเดียวกับผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 3 โดยทำการยืนยันผลจากชุดทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า r_{LA} อยู่ด้วยกัน 2 ค่า เพื่อแสดงถึงสมรรถนะการชดเชยผลของโพลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสำหรับการสร้างชุดทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ และยืนยันผลความถูกต้องของวิธีการดังกล่าวที่ได้รับการพิสูจน์ในบทที่ผ่านมา ให้ความมั่นใจเชื่อถือมากขึ้น จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ จากที่มีสภาวะการขาดเสถียรภาพเนื่องจากโพลดกำลังไฟฟ้าคงตัว แต่กลับทำให้ระบบดังกล่าวกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้งภายหลังที่วงจรการหน่วงแบบแอกทีฟเริ่มทำงาน โดยมีการโปรแกรมค่า r_{LA} ณ จุดปฏิบัติการเดียวกันกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การสร้างชุดทดสอบของวงจรการหน่วงแบบแอกทีฟสามารถชดเชยผลของโพลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ประสบปัญหาจากการขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโพลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแยกทีพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกัน โดยงานวิจัยได้เริ่มจากการศึกษาค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมา คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ และสุดท้ายคืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพรวมถึงงานวิจัยในอดีตที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้ ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้นถือเป็นพื้นฐานและองค์ความรู้ที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัยสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งผลงานดังกล่าวได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 2

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแยกทีพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคขนานกัน ซึ่งเป็นเนื้อหาในบทที่ 3 โดยงานวิจัยนี้ได้เริ่มจากการพิจารณาผลของโหลดกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อเสถียรภาพ นั่นคือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด โหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคขนานกัน ซึ่งระบบดังกล่าวสามารถดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง จากผลการวิเคราะห์และการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าน้อยกว่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบส่งจ่าย นั่นคือ ระบบส่งจ่ายมีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 600 W แต่ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีระดับกำลังไฟฟ้าเป็น 350 W ซึ่งผลการขาดเสถียรภาพจะทำให้แรงดันเอาต์พุตดีซีเกิดการแกว่งที่มีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา และจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบควบคุมให้แย่งได้จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเพื่อทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน โดยที่ไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอ วิธีการหนึ่งแบบแยกทีพสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผัน

แบบบักซ์นานกัน ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มอุปกรณ์การสวิตซ์เข้าไปในระหว่างไดโอดเรียงกระแส และวงจรกรองแรงดันบัสดีซี หลังจากนั้นทำการตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพื่อมาปรับ คุณผ่านค่าอัตราขยายความต้านทานเสมือน (r_{LA}) และส่งค่าดังกล่าวไปลบกับวัฏจักรหน้าที่ (d_{act}) ซึ่ง จะเปรียบเสมือนว่ามีการเพิ่มค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของระบบ และจะ สามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ โดยการวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} จะอาศัยการหาแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อน จากผล การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่ได้รับการ พิสูจน์ด้วยวิธีดังกล่าวสามารถให้ผลการตอบสนองของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลอง สถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์มี ความถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น นั่นคือใช้ ทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ซึ่งการวิเคราะห์ได้นำเสนอการเพิ่มขึ้นของค่า r_{LA} ปรากฏว่า การเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น จากการยืนยันผล ความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็น ว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ สามารถทำให้ระบบไฟฟ้าที่ พิจารณาในบทนี้มีเสถียรภาพที่ผลรวมของวงจรแปลงผันแบบบักซ์มีระดับกำลังไฟฟ้าที่มากกว่า 320 W อย่างไรก็ตาม การยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์อาจจะไม่เพียงพอต่อความน่า เชื่อมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการสร้างชุดทดสอบเพื่อยืนยันวิธีการห้วงแบบแอกทีฟที่ สามารถนำมาใช้สร้างจริงได้สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบบริดจ์ที่มีโพลวงจรแปลงผันแบบบักซ์นานกัน

การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบ แอกทีฟ จะเป็นเนื้อหาในบทที่ 4 ซึ่งในเบื้องต้นได้ดำเนินการอธิบายอุปกรณ์ของแต่ละวงจรที่ใช้ใน งานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูลที่สามารถปรับแรงดัน เอาต์พุตได้ ไดโอดเรียงกระแสสามเฟส วงจรกรองแรงดันบัสดีซีที่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เป็นองค์ประกอบ วงจรแปลงผันแบบบักซ์ที่มีการควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานฟั่งขาออก ซึ่ง ภายในของวงจรมีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MAGA 1280 เป็นตัวควบคุมการทำงาน และอุปกรณ์สุดท้ายที่เป็นจุดเด่นในงานวิจัยนี้คือ วงจรการห้วงแบบ แอกทีฟ ซึ่งภายในของวงจรมีการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรทางแอนะล็อกและวงจรทาง ดิจิตอล โดยที่วงจรทางดิจิตอลจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ซึ่งเป็นบอร์ดชนิด เดียวกันที่ใช้กับวงจรแปลงผันแบบบักซ์ ในการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าจากวงจรแอนะล็อก นั่นคือ วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในตัวเหนี่ยวนำ (I_{dc}) และนำค่าดังกล่าวมาผ่านกระบวนการ

ของวิธีการห้วงแบบแอกทีฟที่ได้รับการนำเสนอในบทที่ผ่านมา ซึ่งโครงสร้างการทำงานของวงจรดังกล่าวได้มีการอธิบายไว้พอสมควร สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบในบทนี้ได้ดำเนินการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า r_{LA} เพื่อแสดงถึงสมรรถนะการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่สามารถทำงานด้วยการ โพรแกรมค่า r_{LA} ที่สอดคล้องกับค่าที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้จากที่มีสถานะการขาดเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว แต่กลับทำให้ระบบดังกล่าวกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้งภายหลังที่วงจรการห้วงแบบแอกทีฟเริ่มทำงาน และทำให้สมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมดีขึ้น

5.2 สรุปจุดเด่นของงานวิจัย

- ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ขนานกัน โดยใช้วิธีดิกิว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการทำแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพได้ง่ายโดยอาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น นั่นคือ การใช้ทฤษฎีบทค่าเจาจงมาพิจารณาเสถียรภาพของระบบ อีกทั้งยังสามารถนำวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้แล้วมาพิสูจน์ใช้กับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ ซึ่งแบบจำลองที่ได้สามารถนำมาใช้การคาดเดาจุดการทำงานของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

- ในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ขนานกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังไม่มีพบเห็นในงานวิจัยในอดีตที่นำวิธีการดังกล่าวมาพิจารณากับวงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี อีกทั้งสามารถนำไปสร้างใช้งานจริงได้ง่าย ไม่ซับซ้อน

- ในงานวิจัยนี้ได้เสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ เพื่อยืนยันผลจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น และเป็นแนวทางของการนำวงจรการห้วงแบบแอกทีฟที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งวิธีการออกแบบของการสร้างวงจรได้มีอธิบายการทำงานของวงจรไว้อย่างละเอียด รวมถึงองค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MAGA 1280

5.3 ข้อเสนอแนะเพื่องานวิจัยในอนาคต

- ควรมีการพิจารณาระบบไฟฟ้าที่สอดคล้องกับโครงสร้างที่มีสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ ดังเช่น ระบบไฟฟ้าแบบไฮบริดจ์ในรถยนต์ ระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน เรือดำน้ำ หรือระบบไฟฟ้าที่มีการนำพลังงานทดแทนมาใช้ในปัจจุบัน เพื่อแสดงถึงการนำองค์ความรู้ที่ได้รับมาใช้ในการประยุกต์

- ควรมีวิธีการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอง (I_{dc}) จากตัวอุปกรณ์เช่น เซอร์ให้มีความแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากผลของการกระเพื่อมของรูปสัญญาณ จะทำให้การอ่านค่าดังกล่าวจากเซนเซอร์เกิดความคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งจะทำให้การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟมีความผิดพลาด หรือไม่สามารทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้

5.4 คำแนะนำสำหรับการนำเทคนิคบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ได้รับการนำเสนอในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบกรณีอื่น ๆ

- การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ สามารถนำไปใช้กับวงจรเรียงกระแสแบบหนึ่งเฟสหรือวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตบัสดิซี (V_{dc}) ได้

- การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟสำหรับระบบที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้กับระบบที่มีโหลดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกระแสสลับในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้

รายการอ้างอิง

- เทพพนม โสภานพรัตน์ (2554). การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. :52-56
- Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M. and Thomas D.W.P. (2008). Stability Analysis and Modelling of AC-DC System with Mixed Load Using DQ-Transformation Method. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)**. :19-24.
- Areerak K-N., Bozhko S.V. Asher G.M. and Thomas D.W.P. (2008). DQ-Transformation Approach for Modelling and Stability Analysis of AC-DC Power System with Controlled PWM Rectifier and Constant Power Loads. **13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008)**. :2049-2054.
- Areerak K-N., Bozhko S., Asher G., Lillo L.de., Watson A., Wu T. and Thomas D.W.P. (2009). The Stability Analysis of AC-DC Systems including Actuator Dynamics for Aircraft Power Systems. **13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2009)**. :1-10.
- Baghrmian A. and Forsyth A.J. (2004). Averaged-Value Models of Twelve-Pulse Rectifiers for Aerospace Applications. **Power Electronics, Machines, and Drives (PEMD 2004)**. 1:220-225.
- Chao K-H. (2009). Dynamic Modeling and Robust Control of Multi-Module Parallel Soft-Switching-Mode Rectifiers. **WSEA Transactions on Systems**. 8:659-672.
- Cespedes M., Xing L. and Sun J. (2011). Constant-Power Loads System Stabilization by Passive Damping. **IEEE Trans. Power Electronics**. 26(7):1832-1836.
- Dong P., Cheng K.W.E., Ho S.L., Yang J.M. and Choi W.F. (2006). Modeling and Examination of Class-E DC-DC Converter using Piezoelectric Transformer for Automotive Applications. **Power Electronics Specialists Conference**. :1-6.

- 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 Multi-converter 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., Ehsani M. and Miller J.M. (2004) "Vehicular Electric Power Systems: Land, Sea, Air, and Space Vehicles," **Marcel Dekker, Inc.**
- 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.
- Glover S.F. (2003). "Modeling and stability analysis of power electronics based systems," Ph.D. dissertation., Purdue University.
- 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. **Power Electronics and Application.** :1-10.
- Jianping Xu; Lee C.Q. (1998). A unified averaging technique for the modelling 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).** :175-179.
- Mahdavi J., Emadi A., Bellar M.D. and Ehsani M. (1997). "Analysis of Power Electronic Converter Using the Generalized State-Space Averaging Approach," **IEEE Trans. on Circuit and System.** 44:767-770.

- Khalil H.K. (1996). "Nonlinear systems", 2nd Ed., Prentice Hall
- Kim S. and Williamson S.S. (2011). Negative impedance instability compensation in more electric aircraft DC power systems using state space pole placement control. **IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)**. :1-6.
- Kazemlou S. and Mehraeen S. (2014). "Decentralized Discrete-Time Adaptive Neural Network Control of Interconnected DC Distribution System," **IEEE Trans. On Smart Grid**. 5(5):2496-2507.
- 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.
- Logue D.L. and Krein P.T. (2001). Preventing Instability in DC Distribution System by Using Power Buffering. **Power Electronics Specialists Conference**. 1:33-37.
- Liu X., Forsyth A.J. and Cross A.M. (2007). Negative input-resistance compensator for a constant power load. **IEEE Trans. Industrial Electronics**. 54(6):3188-3196.
- Liutanakul P., Pierfederici S., Bilal A. and Nahid-Mobarakeh B. (2008). Stability investigation of inverter motor drive system with input filter - Optimization of the DC-link capacitance value. **Power Electronics Specialists Conference**. :3728-3734.
- Liutannakul P., Awan A-B., Pierfederici S., Nahid-Mobarakeh B. and Meibody-Tabor F. (2010). Linear stabilization of a DC bus supplying a constant power load: A general design approach. **IEEE Trans. Power Electronics**. 25(2):475-488.
- 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**.
- Mohamed Y.A-R.I., Radwan A.A.A. and Lee T.K. (2012). Decoupled reference-voltage-based active DC-link stabilization for PMSM drives with tight-speed regulation. **IEEE Trans. Industrial Electronics**. 59(12):4523-4536.

- Puangdownreong D., Areerak K-N., Srikaew A. and Sujitjorn S. (2002). System Identification via Adaptive Tabu Search. **IEEE ICIT'02**. 2:915-920.
- 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 Circuit D-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.
- Rahimi A.M. and Emadi A. (2009). Active Damping in DC/DC Power Electronic Converter: A Novel Method to Overcome the Problems of Constant Power Loads. **IEEE Trans. Industrial Electronics**. 56(5):1428-1439.
- Rahimi A.M., Williamson G.A. and Emadi A. (2010). Loop-Cancellation Technique: A Novel Nonlinear Feed to Overcome the Destabilizing Effect of Constant-Power Loads. **IEEE Trans. On Vehicular Technology**. 59(2):650-661.
- Radwan A.A.A. and Mohamed Y.A-R.I. (2012). Linear Active Stabilization of Converter-Dominated DC Microgrids. **IEEE Trans. On Smart Grid**. 3(1):203-216.
- Slotine J.J. and Li W. (1991). "Applied nonlinear control", London, Prentice Hall, 1991
- 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**. :69-75.

- Sopapirm T., Areerak K-N and Areerak K-L. (2011). Stability Analysis of AC Distribution System with Six-Pulse Diode Rectifier and Multi-Converter Power Electronic Loads. **International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)**. 6(7):2919-2928
- Tsang, K.M., and Chan, W.L. (2005). Cascade controller for DC/DC buck convertor. **IEEE Proceedings Electric Power Applications**. 152(4):827-831.
- Uan-Zo-li A., Burgos R.P., Lacaux F., Wang F. and Boroyevich D. (2004). Assessment of Multi-Pulse Converter Average Models for Stability Studies Using a Quasi-Stationary Small-Signal Technique. **In Power Electronics and Motion Control Conference 2004**. 3:1654-1658.
- Weaver W.W. and Krein P.T. (2006). Implementing Power Buffer Functionality in a DC-DC Converter by Geometric Control. **Conference Record of the 2006 IEEE Industry Application Conference Forty-First IAS Annual Meeting**. 5:2529-2536.
- Wang J. and Howe D. (2008). A Power Shaping Stabilizing Control Strategy for DC Power System With Constant Power Loads. **IEEE Trans. On Power Electronics**. 23(6):2982-2989.
- Weaver W.W. and Krein P.T. (2009). Optimal Geometric Control of Power Buffer. **IEEE Trans. On Power Electronics**. 24(6):1248-1258.
- Zhang X., Vilathgamuwa D.M., Tseng K-J., Bhangu B.S. and Gajanayake C.J. (2013). Power Buffer with Model Predictive Control for Stability of Vehicular Power Systems with Constant Power loads. **IEEE Trans. On Power Electronics**. 28(12):5804-5812.

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the center of the page. It features a stylized figure standing on a base, with a large 'S' and 'R' on either side, all enclosed within a circular border containing the university's name in Thai script.

ภาคผนวก ก

โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราฟสัน

ก. โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – رافสัน สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟส
แบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม โดย นายเทพพนม โสภานเพิ่ม
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2559

%%%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 – กราฟสั้น%%
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;

%%%ค่าที่ได้จากการคำนวณค่าในสถานะคงตัวสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักค์%%%

vo=v1o;

iL=vo/R;

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

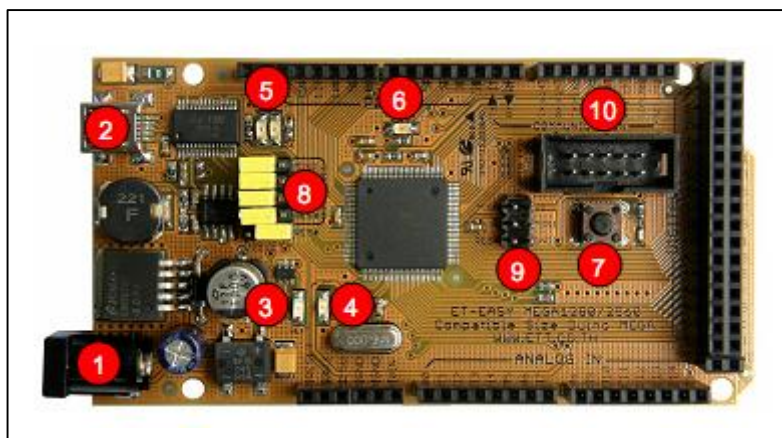
Xi=(vo)/(vdc*Kii);



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. It features a central figure of a person standing on a platform, flanked by two stylized figures. Above the central figure is a large, stylized letter 'H'. The entire emblem is set against a background of radiating lines, suggesting a sun or a starburst. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular path around the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ข

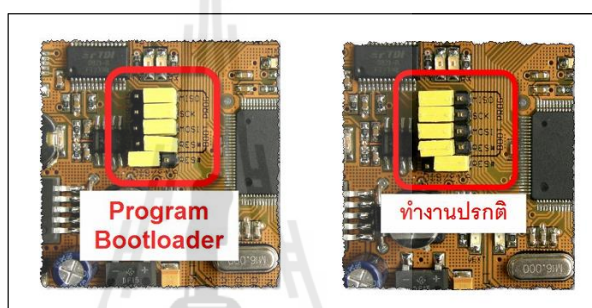
โครงสร้างชุดบอร์ด ET-EASY MAGA1280



รูปที่ ค.1 โครงสร้างบอร์ด ET-EASY MEGA1280

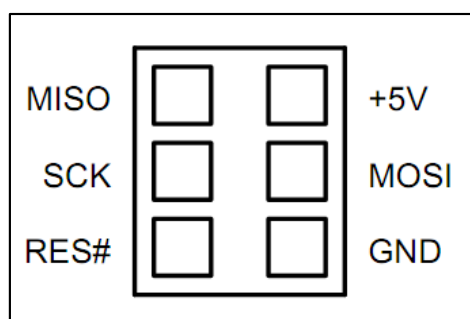
- - หมายเลข 1 คือ ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงจากภายนอก สามารถใช้ได้กับแหล่งจ่ายทั้งแบบ AC และ DC พร้อมวงจร Bridge Rectifier และ Regulate แบบ Switching ช่วยลดความร้อนของ IC Regulate เมื่อมีการดิ่งกระแสมากๆ ได้เป็นอย่างดี สามารถใช้กับแรงดัน Input 7-20V
- - หมายเลข 2 เป็นขั้วต่อ USB สำหรับติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ PC โดยใช้ FT232RL เป็น USB Bridge ในการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ PC และ MCU ในบอร์ด และยังสามารถใช้ไฟจาก พอร์ต USB เป็นแหล่งจ่ายให้กับบอร์ดได้ด้วย โดยจะมี Poly Fuse ขนาด 500 mA สำหรับป้องกันการดิ่งกระแสเกินจากพอร์ต 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



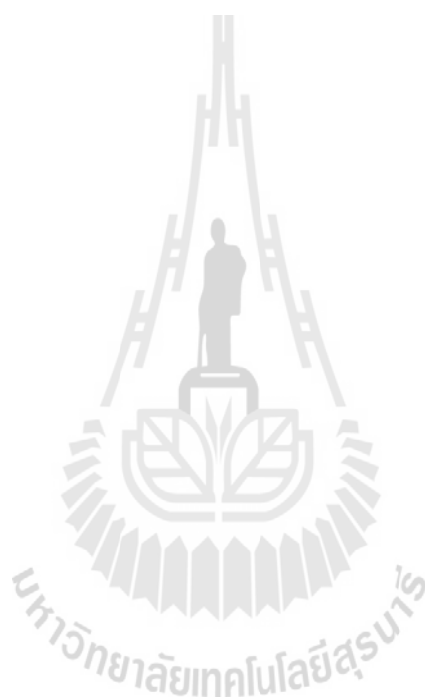
รูปที่ ค.2 Jumper สำหรับเลือก การ Program Bootloader

- 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 ค

พอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280

Port A (PA7...PA0)

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

Port B (PB7...PB0)

พอร์ต B เป็นไอ/โอพอร์ตแบบทำงาน 2 ทิศทาง ขนาด 8 บิต ที่มีวงจรถวลอ์พอยู่ภายใน (เลือกได้เป็นรายบิต) สามารถทำงานเป็นเอาต์พุต ได้ทั้งแบบซิงค์และชอร์ส จุดเด่นของพอร์ตนี้ก็คือ เป็นพอร์ตที่มีความสามารถในการขับกระแสได้ดีกว่าพอร์ตอื่นๆ

Port C (PC7...PC0)

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

Port D (PD7...PD0)

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

Port E (PE7...PE0)

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

Port F (PF7...PF0)

พอร์ต F รองรับการนำเข้าไปทำการแปลงสัญญาณแอนาลอกมาเป็นดิจิตอล

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

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) จึงสามารถทำงานเป็นเอาต์พุต ได้ทั้งแบบซิงค์และชอร์ส

Port H (PH7...PH0)

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

Port J (PJ7...PJ0)

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

Port K (PK7...PK0)

พอร์ต K รองรับการนำเข้าเพื่อทำการแปลงสัญญาณแอนาลอกมาเป็นดิจิตอล

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

Port L (PL7..PL0)

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





ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

โปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino


```

*****
จ. โปรแกรมการควบคุมวงจรการหน่วงแบบแอกทิฟ ด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR
โดยนายเทพพนม โสภานเพิ่ม สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
พ.ศ. 2559
*****

%%%ประกาศฟังก์ชันมาตรฐานการใช้บอร์ด AVR%%%

#include <avr/io.h>
#include <compat/deprecated.h>
#include <LCD_4BIT.h>

%%%ประกาศตัวแปรเริ่มต้น%%%
int current_sensor = 0;  %กำหนดรับอินพุตสัญญาณแอนะล็อกที่พิน A0
int EN = 11;            %กำหนดให้พินที่ D11 สำหรับส่งสัญญาณ PWM
float Vcontrol = 3;
float Vtr = 3;
float RLA = 0.01;
int Read_Current = 0, d=0, d1=0;

void setup()
{
  %%%กำหนดโหมดรับสัญญาณแอนะล็อก%%%
#define FASTADC 1
// defines for setting and clearing register bits
#ifndef cbi
#define cbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit))
#endif
#ifndef sbi
#define sbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))
#endif

```

```

%%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()
{
    %%วิธีการคำนวณของกระบวนการของวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ%%
    Read_Current = analogRead(current_sensor)*2.5;
    Vcontrol =Vcontrol-(RLA* Read_Current);
    d=Vcontrol/Vtr;
    d1=d*100;
    OCR1A=d1*8;
    Vcontrol =3;
}

```