

การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซี
ที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**ADAPTIVE STABILIZATION OF AC-DC POWER
SYSTEMS FEEDING CONSTANT POWER LOADS**



Theppanom Sopapirm

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิจิทัล
ที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.กิติติ อັตถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



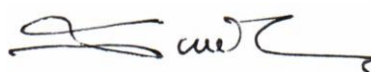
(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ



(รศ. ดร.ก้องพล อารีรักษ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม้นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เทพพนม โสภณเพิ่ม : การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่
จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (ADAPTIVE STABILIZATION OF AC-DC POWER
SYSTEMS FEEDING CONSTANT POWER LOADS) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์, 171 หน้า.

วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือน โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant Power Load : CPL) จากพฤติกรรมของโหลดดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ ซึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้าขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดมีค่ากำลังไฟฟ้าค่าหนึ่ง ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธีการที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยที่สามารถกำจัดผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ วิธีการแรกคือ วิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ วิธีการนี้ทำได้โดยเพิ่มค่าความต้านทานเสมือนเข้าไปเป็นตัวหน่วงของวงจรกรอง แต่อย่างไรก็ตามการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการดังกล่าวจะมีข้อจำกัดตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวค่าหนึ่ง ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงมุ่งเน้นศึกษาวิธีลูปลยขนาดเล็ก เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ณ จุดการทำงานของระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดที่สูงกว่าวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ อย่างไรก็ตาม วิธีลูปลยเล็กได้ถูกนำมาใช้กับวงจรแปลงผันกำลังดิซีเป็นดิซีเพียงอย่างเดียว ซึ่งยังไม่ม้งานวิจัยในอดีตนำวิธีลูปลยเล็กมาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่อยู่บนพื้นฐานของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซี และมีการเพิ่มเติมวงจรช่วยเข้ามาในระบบ ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอการนำวิธีลูปลยเล็กมาบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน อย่างไรก็ตาม จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้คือ การสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวโดยอาศัยการสร้างสมการที่ได้รับการพิสูจน์จากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณสามารถปรับค่าอัตราขยายได้ตามวิธีการของลูปลยเล็ก โดยที่ค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จากผลที่ได้จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน ภายใต้การวิเคราะห์เสถียรภาพของสัญญาณขนาดเล็ก รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ที่ได้รับการอธิบายไว้พอสังเขป อีกทั้งการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์และผลจากชุดทดสอบ แสดงให้เห็นว่าการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปลยเล็กสามารถกำจัดผลกระทบของการขาดเสถียรภาพที่เกิดขึ้นจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้อย่างมีนัยสำคัญ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา เทพพนม โสภณเพิ่ม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ก้องพันธ์ อารีรักษ์

THEPPANOM SOPAPIRM : ADAPTIVE STABILIZATION OF AC-DC POWER SYSTEMS FEEDING CONSTANT POWER LOADS.
THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D.,
171 PP.

CONSTANT POWER LOAD (CPL)/INSTABILITY MITIGATION
LOOP-CANCELLATION TECHNIQUE/ADAPTIVE STABILIZATION

Power converters with their controls normally behave as constant power loads. These loads can significantly degrade the stability of their feeder system. Therefore, this research thesis will study an instability mitigation of AC-DC power system feeder constant power loads. There are two well-known approaches to apply a compensating signal for eliminating the destabilizing effect. The first is the active damping method. In this case, a virtual resistance is used to increase the damping of the filter. However, the power level of the constant power load (P_{CPL}) that can be mitigated is limited. Therefore, a second approach, namely the loop-cancellation technique is developed. This technique can mitigate system instability at higher values of P_{CPL} than those compensated by active damping. However, this technique has only been applied to DC-DC converters. The application of the loop-cancellation technique to uncontrolled rectifier based AC-DC power systems via an auxiliary circuit has not been reported in previous publications. Hence, in the thesis, instability mitigation for three-phase uncontrolled rectifier feeding parallel buck converter loads via the loop-cancellation technique is presented. Moreover, this thesis also presents a novel adaptive stabilization technique based on an equation that can be derived from the average system model. The equation is used to determine the adaptive gain required for loop-cancellation. This gain depends on the power level of the CPL which can be

calculated from voltage and current sensors on the DC bus. As a result of this methodology, the system can automatically ensure stability under all operating condition. The stability study presented in this thesis, using small-signal and large-signal stability analysis, confirms that the mitigation system is always stable. In addition, simulation and experimental results are also presented to verify the proposed adaptive stabilization technique which eliminates the destabilizing effect of the CPL.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature ศุภพพิชญ์ วิเศษพันธ์

Advisor's Signature ดร. อธิชา

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในด้านการดำเนินชีวิตหลายๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของวิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เทพพนม โสภานพม์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	6
1.7 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย.....	6
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ.....	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	10
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและงานวิจัยที่ได้รับการ พัฒนาในงานวิจัยนี้.....	17
2.6 สรุป.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแยกทีพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอชีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน.....	21
3.1	บทนำ.....	21
3.2	ผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน.....	21
3.2.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	21
3.3	การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแยกทีพ.....	24
3.3.1	ระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแยกทีพ.....	24
3.3.2	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป.....	25
3.3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ.....	33
3.3.4	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแยกทีพ.....	35
3.4	ข้อจำกัดวิธีการหนึ่งแบบแยกทีพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ.....	39
3.5	สรุป.....	43
4	การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็กสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอชีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าแบบอุดมคติ.....	45
4.1	บทนำ.....	45
4.2	การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก.....	45
4.2.1	แผนภาพแสดงการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก.....	45
4.2.2	การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก.....	47
4.2.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเล็ก.....	55
4.4	การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเล็ก.....	58
4.5	สรุป.....	64
5	การสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน.....	65
5.1	บทนำ.....	65
5.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเล็ก.....	65
5.2.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ.....	65
5.2.2	การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีดีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป.....	66
5.2.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	67
5.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	75
5.4	การสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวของระบบที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันขนานกัน.....	80
5.5	สรุป.....	83
6	การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวสำหรับชุดทดสอบ.....	84
6.1	บทนำ.....	84
6.2	การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเล็ก.....	84
6.2.1	อุปกรณ์ที่ใช้สร้างระบบไฟฟ้าที่มีการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเล็ก.....	88
6.2.2	การโปรแกรมระบบควบคุมการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเล็ก.....	101
6.3	การทดสอบการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเล็ก.....	103

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3.1	กรณีการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อมีการคงที่ค่า K_{FB} ...	103
6.3.2	กรณีการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB}	108
6.4	สรุป.....	109
7	การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก.....	111
7.1	บทนำ.....	111
7.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสสำหรับที่พิจารณา.....	112
7.2.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	112
7.2.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส.....	113
7.3	สรุป.....	120
8	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	121
8.1	สรุป.....	121
8.2	สรุปจุดเด่นของงานวิจัย.....	126
8.3	ข้อเสนอแนะเพื่องานวิจัยในอนาคต.....	127
	รายการอ้างอิง.....	128
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบของการปรับค่าแรงดันควบคุม ($V_{control}$) ด้วย การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์.....	134
	ภาคผนวก ข. รายละเอียดการพิสูจน์การประมาณค่าของสมการที่ (4-5).....	141
	ภาคผนวก ค. ผลการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} ที่ปรากฏอยู่ในตัวแปรสถานะ $V_{bus,d}$ และ I_{dc}	143
	ภาคผนวก ง. โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราฟสัน.....	147
	ภาคผนวก จ. โครงสร้างชุดบอร์ด ET-EASY MAGA1280.....	150
	ภาคผนวก ฉ. พอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280.....	153
	ภาคผนวก ช. โปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino.....	156
	ภาคผนวก ซ. บทความทางวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่.....	160
	ประวัติผู้เขียน.....	171

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ.....	9
2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	11
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	14
2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	17
3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.4.....	33
4.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.2.....	52
5.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1.....	72



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพสรุปแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....16
2.2	แผนภาพสรุปการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ.....19
3.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ.....21
3.2	ค่าเจาะจงของแบบจำลองวิธีคิวิที่เป็นเชิงเส้น.....22
3.3	ค่าเจาะจงของระบบเมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าของ โหลดจาก 0 – 400 W.....23
3.4	การยืนยันผลการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์.....24
3.5	ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาการหน่วงแบบแอกทีฟ.....25
3.6	วงจรสมมูลที่อยู่บนแกนหมุนคิวิ.....26
3.7	สัญญาณการสวิตช์ของระบบที่พิจารณา.....27
3.8	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB.....33
3.9	ผลการเปลี่ยนแปลง โหลดกำลังไฟฟ้าจาก 30 W เป็น 40 W เมื่อ $r_{LA} = 0 \Omega$34
3.10	ผลการเปลี่ยนแปลง โหลดกำลังไฟฟ้าจาก 30 W เป็น 40 W เมื่อ $r_{LA} = 0.1 \Omega$35
3.11	ผลการคำนวณค่าเจาะจงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ.....36
3.12	ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพโดยกำหนดให้ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 320 W.....37
3.13	ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพโดยกำหนดให้ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 330 W.....37
3.14	การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 320 W..38
3.15	การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 330 W..39
3.16	ผลการเปลี่ยนแปลงค่า r_{LA} ที่มีผลต่อเสถียรภาพ.....40
3.17	ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL} = 390 \text{ W}$ เมื่อกำหนดให้ $r_{LA} = 0.019 \Omega$41
3.18	ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL} = 410 \text{ W}$ เมื่อกำหนดให้ $r_{LA} = 0.038 \Omega$41
3.19	ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL} = 420 \text{ W}$ เมื่อกำหนดให้ $r_{LA} = 0.058 \Omega$42

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

3.20	ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL}=410$ W เมื่อกำหนดให้ $r_{LA}=0.071$ Ω	42
3.21	ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL}=370$ W เมื่อกำหนดให้ $r_{LA}=0.11$ Ω	43
4.1	แผนภาพการสร้างวิธีลูบยกเล็ก.....	46
4.2	ระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก.....	46
4.3	วงจรสมมูลที่อยู่บนแกนคิคว่าง่าย.....	48
4.4	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB.....	53
4.5	ผลการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าจาก 50 W เป็น 60 เมื่อ $K_{FB}=0$	54
4.6	ผลการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าจาก 50 W เป็น 60 เมื่อ $K_{FB}=0.2$	54
4.7	ผลการคำนวณค่าเจาะจงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก.....	55
4.8	ผลการเปลี่ยนแปลงค่าเจาะจงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB}	56
4.9	ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB}	57
4.10	ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า P_{CPL}	58
4.11	ระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็ก.....	59
4.12	สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส.....	60
4.13	การหาค่า $V_{bus,d}$ ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด P_{CPL}	61
4.14	การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า K_{FB}	62
4.15	การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์.....	63
5.1	ระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก.....	66
5.2	วงจรสมมูลอย่างง่ายที่อยู่บนแกนคิคว่าง่าย.....	67
5.3	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB.....	73
5.4	ผลการตอบสนอง V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.2 ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_{o1}^* และ V_{o2}^* โดยที่ $K_{FB}=0.01$	74
5.5	ผลการตอบสนอง V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.2 ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_{o1}^* และ V_{o2}^* โดยที่ $K_{FB}=0.1$	75
5.6	ผลการคำนวณค่าเจาะจงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน.....	76

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

5.7	ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ เมื่อกำหนดให้ $P_{CPL} = 300W$	77
5.8	ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ เมื่อกำหนดให้ $P_{CPL} = 320W$	77
5.9	การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อกำหนดให้ผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามีค่า 300 W.....	78
5.10	การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อกำหนดให้ผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามีค่า 320 W.....	79
5.11	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวที่มีโหลดขนานกัน.....	80
5.12	โครงสร้างการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB.....	81
5.13	การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์..	82
6.1	ระบบที่พิจารณาการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัว.....	84
6.2	แผนภาพการคำนวณหาค่า K_{FB} ภายในบอร์ด AVR เบอร์ 1280.....	85
6.3	การต่อวงจรแบบแอนะล็อก.....	86
6.4	ภาพการต่อวงจรชุดทดสอบ.....	87
6.5	หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้ รุ่น IBC-VR3000-3.....	88
6.6	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ไดโอดรุ่น VS-26MT160.....	88
6.7	วงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเล็ก.....	89
6.8	ภาพการต่อวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....	90
6.9	ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280.....	91
6.10	ภาพการต่อใช้งานมอดู LCD.....	94
6.11	การต่อสัญญาณแบบคีย์สวิตช์.....	96
6.12	ชุดบอร์ด ET- MINI MCP4922 DAC 12 BIT.....	97
6.13	มอดูการสวิตช์ของการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเล็ก.....	98
6.14	ไดโอดของวงจรลูปยกเล็ก.....	98
6.15	ตัวเหนี่ยวนำ L_{dc} ขนาดเท่ากับ 37.7 mH.....	99
6.16	ตัวเก็บประจุ C_{dc} ขนาดเท่ากับ 237.35 μF	99
6.17	ชุดวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	100
6.18	ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 20 Ω	100

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

หน้า

6.19	แผนภูมิการโปรแกรมการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเล็ก.....	102
6.20	ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อผลรวมของโหลด วงจรแปลงผันแบบบัคมีค่าเป็น 330 W.....	104
6.21	ผลการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0.03.....	105
6.22	ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อผลรวมของโหลด วงจรแปลงผันแบบบัคมีค่าเป็น 351.25 W.....	106
6.23	ผลการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0.06.....	107
6.24	ผลการทดสอบการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัว.....	108
7.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคขนานกัน.....	112
7.2	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เมื่อกำหนดให้ $K_{FB} = 0.03$ และผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคมีค่าเท่ากับ 320 W.....	114
7.3	การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อกำหนดให้ผลรวมของ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคมีค่าเท่ากับ 320 W.....	115
7.4	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เมื่อกำหนดให้ $K_{FB} = 0.421$ และผลรวมของ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคมีค่าเท่ากับ 420 W.....	117
7.5	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เมื่อกำหนดให้ $K_{FB} = 0.502$ และผลรวมของ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคมีค่าเท่ากับ 520 W.....	117
7.6	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เมื่อกำหนดให้ $K_{FB} = 0.607$ และผลรวมของ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคมีค่าเท่ากับ 600 W.....	118
7.7	การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์ บนคอมพิวเตอร์.....	119
ก.1	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของ โปรแกรม MATLAB.....	135
ก.2	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.95$ V.....	135
ก.3	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.9$ V.....	136
ก.4	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.85$ V.....	136
ก.5	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.8$ V.....	137
ก.6	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.75$ V.....	137
ก.7	ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.7$ V.....	138

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
ก.8 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.65$ V.....	138
ก.9 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.6$ V.....	139
ก.10 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.55$ V.....	139
ก.11 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.5$ V.....	140
ข.1 ผลการคำนวณค่าในสภาวะอยู่ตัว.....	142
ค.1 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อพิจารณาค่า K_{FB} ปรากฏอยู่ในตัวแปรสถานะ $V_{bus,d}$, I_{dc} และ V_{dc}	145
ค.2 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อพิจารณาค่า K_{FB} ปรากฏอยู่ในตัวแปรสถานะ V_{dc} เพียงอย่างเดียว.....	145
จ.1 โครงสร้างบอร์ด ET-EASY MEGA1280.....	151
จ.2 Jumper สำหรับเลือก การ Program Bootloader.....	152
จ.3 ขั้วต่อ AVRISP.....	153

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน โหลดทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น วงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี และเอซีเป็นเอซี ที่ต่อกับโหลดมอเตอร์ไฟฟ้า หรือโหลดความต้านทาน ที่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ หรือมีการควบคุมแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ตกรวมโหลดตัวต้านทาน 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 ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจึงมีความจำเป็น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) เนื่องจากผลการสวิตช์ในวงจร เมื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ จะมีความยุ่งยากและซับซ้อน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องหาวิธีการในการทำแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time – invariant model) ซึ่งพบว่า วิธีที่นิยมกันมากในปัจจุบันมีด้วยกัน 3 วิธี โดยวิธีที่ 1 เรียกว่าวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging: GSSA) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายสำหรับการหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันของระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสตรง(DC distribution system) (Emadi A., Ehsani M. and Miller J.M., 2004) รวมถึงวงจรเรียงกระแสที่มีการควบคุมและไม่มี การควบคุม ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส (Glover S.F., 2003)และวงจรเรียงกระแสแบบหกและสิบสองพัลส์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส (Baghrmian A. and

Forsyth A.J., 2004) แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวก็นำมาใช้กับระบบสามเฟส แบบจำลองที่ได้ จะมีความซับซ้อน ซึ่งยากต่อการนำไปวิเคราะห์ระบบต่อไป แต่ข้อดีของวิธีการนี้ คือ เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับวงจรแปลงผันดิซีสเป็นดิซีส ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะมีความแม่นยำ และไม่ซับซ้อน วิธีที่ 2 คือ วิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear average-value) วิธีการนี้ใช้สำหรับหาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสแบบหกและสิบสองพัลส์ (Uan-Zo-li A., Burgos R.P., Lacaux F., Wang F. and Boroyevich D., 2004) ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่าย แต่มีข้อเสียคือ ไม่สามารถหาแบบจำลองกับระบบที่มีความซับซ้อนได้ เช่น ระบบที่มีการต่อขนานกันของวงจรแปลงผัน วิธีที่ 3 คือ วิธีดีคว (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 ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือผสมผสานกัน จากทั้ง 3 วิธีข้างต้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ จะนำมาใช้สำหรับการคาดเดาหาจุดขาดเสถียรภาพของระบบ ซึ่งในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นิยมในปัจจุบันสามารถแบ่งเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพอยู่ด้วยกัน 2 แนวทางคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น และการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear stability analysis) โดยแนวทางแรก การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น จะมี 2 วิธีการที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน คือ 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 แต่ในขณะแนวทางที่ 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) โดยวิธีแรกเป็นวิธีการทางกราฟฟิก ซึ่งจะสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ (state variables) 2 ตัว เป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และได้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำ แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ สามารถใช้กับระบบที่มีอันดับไม่เกิน 2 ถ้าอันดับของระบบเกิน 2

อาจทำการแปลงรูปแบบให้เป็นกลุ่มของระบบอันดับ 2 ได้ แต่จะมีความยุ่งยากซับซ้อนในการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบ ซึ่งจะทำให้ผลการวิเคราะห์เกิดความผิดพลาดได้ สำหรับวิธีที่ 2 เป็นวิธีการที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมนับเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพราะนอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถที่จะประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ต้องคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณา จากนั้นนำฟังก์ชันที่คำนวณได้ไปตรวจสอบเสถียรภาพตามทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ซึ่งข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ และในทางปฏิบัติการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความยุ่งยากอีกทั้งมีข้อจำกัดสำหรับระบบที่มีโครงสร้างซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการที่ง่ายสุดนั่นคือ วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง และวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งแต่ละวิธีจะได้รับการนำเสนอไว้ในส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการที่ได้รับการอธิบายไว้ข้างต้น สามารถนำมาใช้ในการคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่ยังไม่สามารถทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น โดยที่ไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ เพื่อให้ระบบที่ขาดเสถียรกลับมา มีเสถียรภาพได้ตลอดย่านการทำงาน ซึ่งวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการคือ วิธีแบบพาสซีฟ และ วิธีแบบแอกทีฟ โดยวิธีแบบพาสซีฟ (Cespedes M., Xing L., Sun J., 2011) เป็นการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ หรือลดค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพในการจ่ายโหลดได้สูงขึ้น รวมถึงการเพิ่มความต้านในระบบ ซึ่งง่ายต่อการออกแบบและการนำไปใช้งานจริง แต่วิธีการดังกล่าว จะก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียในวงจรกรอง ราคแพง และทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลง ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือก วิธีการแบบแอกทีฟ ซึ่งมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ แบ่งได้เป็น 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) สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะพิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยเลือกการควบคุมด้านแหล่งจ่าย เนื่องจากมีความต้องการทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ ซึ่งมีวิธีการต่างๆ ส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้กับวงจรแปลงผันกำลังคือเป็นดีซี(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) และมีวิธีการบางส่วนนำมาใช้กับวงจรแปลงผันกำลังเอซีเป็น

ดีซี (Logue D.L. and Krein P.T., 2011) ที่มีโครงสร้างลักษณะเฉพาะของการทำวิจัย หรือไม่สามารถนำมาพัฒนากับระบบแบบทั่วไปได้ แต่จะมี 2 วิธีการที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ วิธีการห้วงแบบแอกทีฟ และวิธีลูบยกเล็ก ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ได้กับระบบทั่วไป และยังไม่มีงานวิจัยในอดีตที่นำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงนำเสนอ 2 วิธีการนี้มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งขนานกัน ซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบ จะดำเนินการด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ของโปรแกรม MATLAB และดำเนินการสร้างชุดทดสอบเพื่อทำให้วิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ได้นำเสนอในงานวิทยานิพนธ์นี้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น และเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับนำไปพัฒนากับระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.2.2 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งขนานกัน

1.2.3 เพื่อศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งขนานกัน

1.2.4 เพื่อศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ใหม่ในการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของวิธีลูบยกเล็กด้วยการสร้างสมการอย่างง่ายสำหรับการปรับค่า K_{FB} ที่แปรเปลี่ยนไปตามระดับของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

1.2.5 เพื่อศึกษาและดำเนินการสร้างชุดทดสอบสำหรับการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัว

1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น

1.3.1 การจำลองสถานการณ์ใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blocksets) ร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

1.3.2 ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งขนานกัน

1.3.3 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พิสูจน์จากวิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวกและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

1.3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพจะใช้ทฤษฎีบทค่าจางเงาะ และวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสมาพิจารณาระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

1.3.5 ตัวควบคุมที่ใช้สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์เป็นตัวควบคุมพีไอ

1.3.6 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ได้ใช้วิธีการแบบดั้งเดิมที่อาศัยพื้นฐานความรู้จากทฤษฎีระบบควบคุม

1.3.7 การสร้างชุดทดสอบของวงจรลูปยกเล็กและวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตฝั่งขาออกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MAGA 1280

1.3.8 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยการจำลองสถานการณ์ในคอมพิวเตอร์

1.3.9 การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวจะทดสอบภายใต้พิกัดของระบบเท่านั้น นั่นคือ พิกัดของระบบส่งจ่ายเอซีเป็นดีซีมีค่าเป็น 600 W

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกันเท่านั้น

1.4.2 การทำงานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสและวงจรแปลงผันแบบบัคค์จะพิจารณาการทำงานในย่านโหมดการนำกระแสต่อเนื่องเท่านั้น (continuous conduction mode)

1.4.3 การยืนยันการขาดเสถียรภาพของระบบ จะใช้การจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SimPowerSystem (SPS™) ใน SIMULINK และการสร้างชุดทดสอบจริง

1.4.4 การบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวจะพิจารณาในส่วนของระบบส่งจ่ายเอซีเป็นดีซี

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุมจะส่งผลต่อเสถียรภาพ

1.5.2 ได้องค์ความรู้ด้านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพที่อาศัยวิธีการเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น

1.5.3 ได้องค์ความรู้ด้านการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน ด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทิฟ และวิธีลูปยกเล็ก

1.5.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างสมการอย่างง่ายของการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กด้วยการอาศัยการประมาณค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.5.5 ได้องค์ความรู้การออกแบบตัวควบคุมพีไอ สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์

1.5.6 ได้องค์ความรู้การสร้างชุดทดสอบที่มีการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

1.5.7 ได้บทความวิจัยได้เผยแพร่ระดับชาติ หรือนานาชาติ

1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.6.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

1.6.2 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างวงจรใหม่สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟและวิธีลูบยกเล็กพร้อมทั้งแสดงการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่ทั้งระบบ

1.6.3 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็ก โดยแสดงพิสูจน์การสร้างสมการอย่างง่ายผ่านการประมาณค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้การนำไปใช้งานง่ายขึ้น

1.6.4 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นำเสนอการยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยการสร้างชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 8 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย และประโยชน์คาดว่าจะได้รับของการวิจัย

บทที่ 2 นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อเสถียรภาพ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพ และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

บทที่ 3 นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

บทที่ 4 นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็กของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

บทที่ 5 นำเสนอการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคคั่นกัน

บทที่ 6 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับการสร้างเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคคั่นกัน

บทที่ 7 นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก

บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 5 ส่วน ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบของการปรับค่าแรงดันควบคุม ($V_{control}$) ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ภาคผนวก ข. รายละเอียดการพิสูจน์การประมาณค่าของสมการที่ (4-5) ภาคผนวก ค. ผลการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} ที่ปรากฏอยู่ในตัวแปรสถานะ $V_{bus,d}$ และ I_{dc} ภาคผนวก ง. โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิเวศน์ - ราฟสัน ภาคผนวก จ. โครงสร้างชุดบอร์ด ET-EASY MAGA1280 ภาคผนวก ฉ. พอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 ภาคผนวก ช. แสดงรายละเอียดโปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino ภาคผนวก ซ. แสดงรายการบทความทางวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการทำวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอชไอเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัลค์ขนานกัน ซึ่งในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้มีผู้ทำการวิจัยค้นคว้าและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนมาถึงปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้ในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ และงานวิจัยที่เกี่ยวกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพรวมถึงงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในงานวิทยานิพนธ์นี้ โดยแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ซึ่งในแต่ละหัวข้อผู้วิจัยจึงนำเสนอเรียงตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงการอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป รวมถึงสรุปองค์ความรู้ที่ได้รับการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ

ปัจจุบัน วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้รับความนิยมน้อยกว่าหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมการทำงาน แต่เมื่อนำวงจรดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรอง จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยจึงเริ่มศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ โดยปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ ตามที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ

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.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบของการขาดเสถียรภาพที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวรวมถึงทฤษฎีการออกแบบวงจรรองและการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า
2005	Rivetta, C.H., Williamson, G.A., and Emadi, A.	บทความนี้เสนอวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังและวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีการควบคุมที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ รวมถึงการขาดเสถียรภาพเนื่องจากอิมพีแดนซ์เชิงลบในระบบกำลังไฟฟ้าของเรือดำน้ำ
2006	Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A.	บทความนี้เสนอโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและการขาดเสถียรภาพเนื่องจากอิมพีแดนซ์เชิงลบในระบบยานยนต์
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas D.W.P.	บทความนี้เสนอการขาดเสถียรภาพของอิมพีแดนซ์เชิงลบ ด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีเพิ่มมากขึ้นในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ดังตารางที่ 2.1 พบว่า โหลดของระบบไฟฟ้ากำลังที่เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน ในสถานะคงตัวโหลดดังกล่าวจะมีค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับจุดสมดุลของระบบ ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมเปรียบเสมือน โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบต่อระบบโดยรวม และโดยทั่วไป โหลดที่เป็นวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมจะต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบของโหลดชนิดนี้ จะไปลดค่าความต้านทานของวงจรกรอง (damping) ซึ่งปกติค่าความต้านทานของวงจรกรองชนิดนี้จะมีค่าบวก การลดลงของค่าความต้านทานของวงจรกรองจะทำให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณขึ้น ถ้าระบบมีค่าอิมพีแดนซ์ติดลบมากพอ นั่นคือปริมาณ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากพอ จะทำให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณเป็นอย่างมาก หรือทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดเป็นแบบกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก เพราะถ้าระบบไฟฟ้ากำลังขาดเสถียรภาพอาจจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ และนอกจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบที่กล่าวไปในข้างต้นแล้ว ยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้น นั่นคือทำให้ระบบเป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วย

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์การหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ เมื่อพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรแปลงผัน ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากขึ้น โดยสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1990	Rim, C.T., Hu, D.Y., and Cho, G.H.	บทความนี้นำเสนอการแปลงวงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรเรียงกระแส และวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ ให้อยู่บนแกนคิกว ในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ ขึ้นอยู่กับเวลา
1990	Sanders, S. R., Noworolski, J. M., Liu, X. Z., and Vergliese, G.C.	บทความนี้เสนอวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะสำหรับ วงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบใช้พีดับเบิล ยูเอ็ม สำหรับการสวิตช์ รวมถึงการนำไป ประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบเรโซแนนซ์ ประเภทต่างๆ
1993	Sudhoff, S.D., and Wasynczuk, O.	บทความนี้เสนอการวิเคราะห์หาแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันที่มีโหลดเป็น เครื่องจักรกลเชิงโรตารี
1993	Baghrmian, A., and Forsyth, A.J.	บทความนี้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับวงจรเรียงกระแสแบบ 12 พัลส์ ที่มีโหลด กำลังไฟฟ้าคงตัว โดยใช้วิธีการค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็น เชิงเส้น
1994	Rim, C.T., Choi, N.S., Cho, G.C., and Cho, G.H.	บทความนี้เสนอการแปลงวงจรไปอยู่บนแกนคิก วสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ใช้เทคนิคการ ควบคุมการจ่ายกระแสด้วยพีดับเบิลยูเอ็ม
1997	Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D., and Ehsano, M.	บทความนี้เสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดิซีสเป็นดิซีส ด้วยวิธี ค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
1998	Han, S.B., Choi, N.S., Rim, C.T., and Cho, G.H.	บทความนี้เสนอการแปลงวงจรให้อยู่บนแกนคิก วของวงจรเรียงกระแสสามเฟส โดยใช้เทคนิคพี ดับเบิลยูเอ็มแบบบัทท์ รวมถึงการพิสูจน์สมการหา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลบน แกนคิกว

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (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.	บทความนี้แนะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ระบบวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังหลายชนิด โดยใช้วิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2004	Mahdavi, J., Emadi, A., And Williamson, G.A.	บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองสถานการณ์ของระบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากำลังต่างๆ บนเรือโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2006	Sun, J., and Colon, J.	นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการอินพุตอิมพีแดนซ์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี
2006	Dong, P., Cheng, K. W. E., Ho, S. L., Yang, J. M., and Choi, W. F.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีแบบคลาสสิกโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยมาประยุกต์กับระบบยานยนต์
2007	Chen, M., Sun, J.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้อินพุตอิมพีแดนซ์แบบความถี่ต่ำสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟารวมถึงเกณฑ์เสถียรภาพในควิสต์
2007	Han, L., Wang, J., and Howe, D.	บทความนี้แนะนำเสนอการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ 6 พัลส์ และ 12 พัลส์

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

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

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังดังตารางที่ 2.2 พบว่า การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี นิยมใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้จะมีความถูกต้องแม่นยำ และไม่ซับซ้อน ในขณะที่การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ทั้งแบบที่มีการควบคุมแรงดันบัสดิซีหรือที่ไม่มีการควบคุมแรงดันบัสดิซี นิยมใช้วิธีคิว ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้จะมีความยืดหยุ่นสูง และไม่ซับซ้อนมากนัก ดังนั้นสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซ์นานกัน ซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ สามารถพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ปัจจุบัน ได้มีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นแบบจำลองไม่ขึ้นอยู่กับเวลามาทำการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ทั้งนี้เพื่อคาดเดาจุดการทำงานของโหลดดังกล่าวที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และหลีกเลี่ยงผลเสียต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

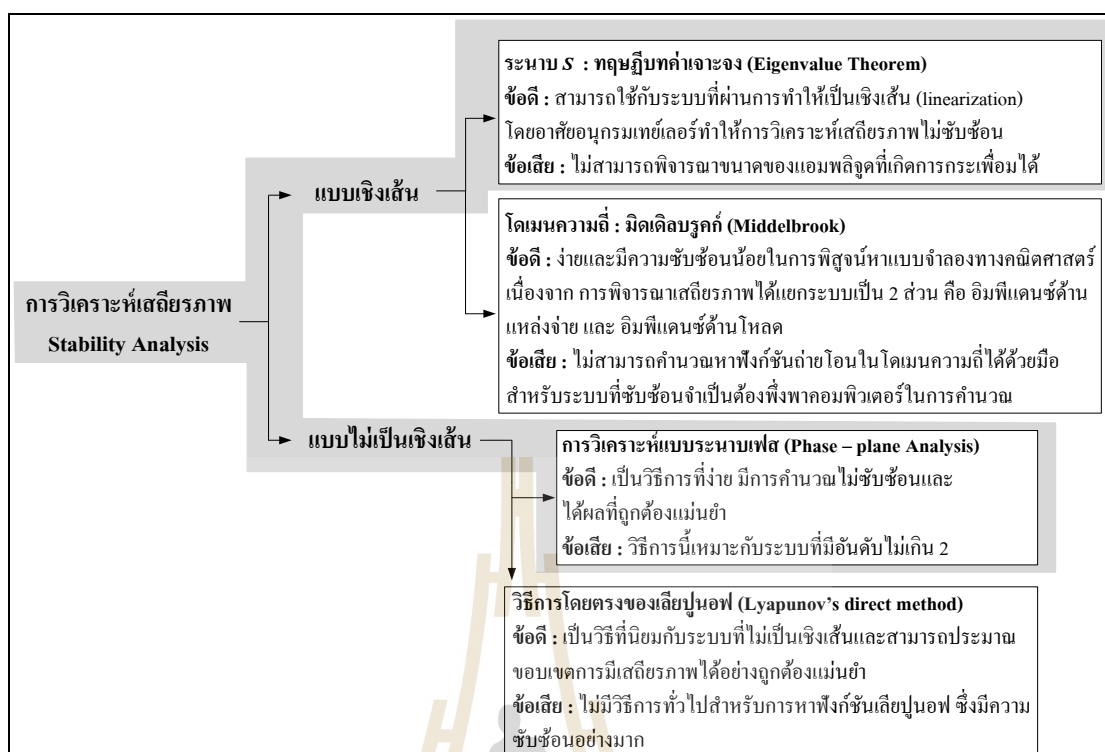
ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1969	Lipo, T. A., and Krause, P. C.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยจากแผนภาพในควิสต์ของวงจรรีงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
2003	Wang, X., Yao, R., and Rao, F.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กโดยพิจารณาจากอินพุต-เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี
2006	Ying-xi, L., Xin-hua, M., Hong-juan, G., and Hua, J.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพและการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินที่ประกอบไปด้วยวงจรรีงกระแสสามเฟสต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้าและพิจารณาโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ
2008	Griffio, A., Wang, J., and Howe, D.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ด้วยวิธีการระนาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเลียปุนอฟ พร้อมทั้งประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปุนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีเบรย์ทันและมอเซอร์
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 วิธีการโดยตรงของเลียปุนอฟและเกณฑ์ของโพพอฟ 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 รวมถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีดีคิว เพื่อนำไปคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพและได้แสดงการยืนยันผลจากชุดทดสอบ
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.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินและศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและพลวัตการขับเคลื่อนที่มีพฤติกรรมเป็นโพลด์กำลังไฟฟ้าคงตัว

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 มิดเดิลบรูค ซึ่งทั้ง 2 วิธีการนี้ เป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถพิจารณาขนาดของแอมพลิจูดที่เกิดการกระเพื่อมได้เมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และการวิเคราะห์เสถียรภาพจะต้องทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นไปเป็นเป็นจำลองที่เป็นเชิงเส้นเพื่อสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับแนวทางที่ 1 ได้ แต่ในขณะแนวทางที่ 2 เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยตรง ซึ่งมี 2 วิธีการคือ วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ โดยวิธีแรกเป็นวิธีการทางกราฟฟิก ซึ่งจะสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบบนระนาบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ (state variables) 2 ตัว เป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และได้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำ แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ สามารถใช้กับระบบที่มีอันดับไม่เกิน 2 ถ้าอันดับของระบบเกิน 2 อาจทำการแปลงรูปแบบให้เป็นกลุ่มของระบบอันดับ 2 ได้ แต่จะมีความยุ่งยากซับซ้อนในการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบ ซึ่งจะทำให้ผลการ

วิเคราะห์เกิดความผิดพลาดได้ สำหรับวิธีที่ 2 เป็นวิธีการที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมนั้นเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพราะนอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถที่จะประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ต้องคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณา จากนั้นนำฟังก์ชันที่คำนวณได้ไปตรวจสอบเสถียรภาพตามทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ และในทางปฏิบัติการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความยุ่งยากอีกทั้งมีข้อจำกัดสำหรับระบบที่มีโครงสร้างซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการที่ง่ายที่สุดนั่นคือ วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเฉลี่ย ซึ่งส่วนที่สำคัญในการนำมาใช้พิจารณาเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ และได้มีการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสไว้พอสังเขป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

การวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง สามารถคาดเดาจุดการทำงานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ แต่ไม่สามารถทำให้ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดที่มีระดับกำลังที่สูงขึ้นได้ โดยที่ไม่ประสบปัญหาจากการขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ซึ่งเป็นงานวิจัยที่สำคัญสำหรับนำไปพัฒนาต่อยอดการประยุกต์ใช้กับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัลค์ขนานกัน ซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จากศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

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

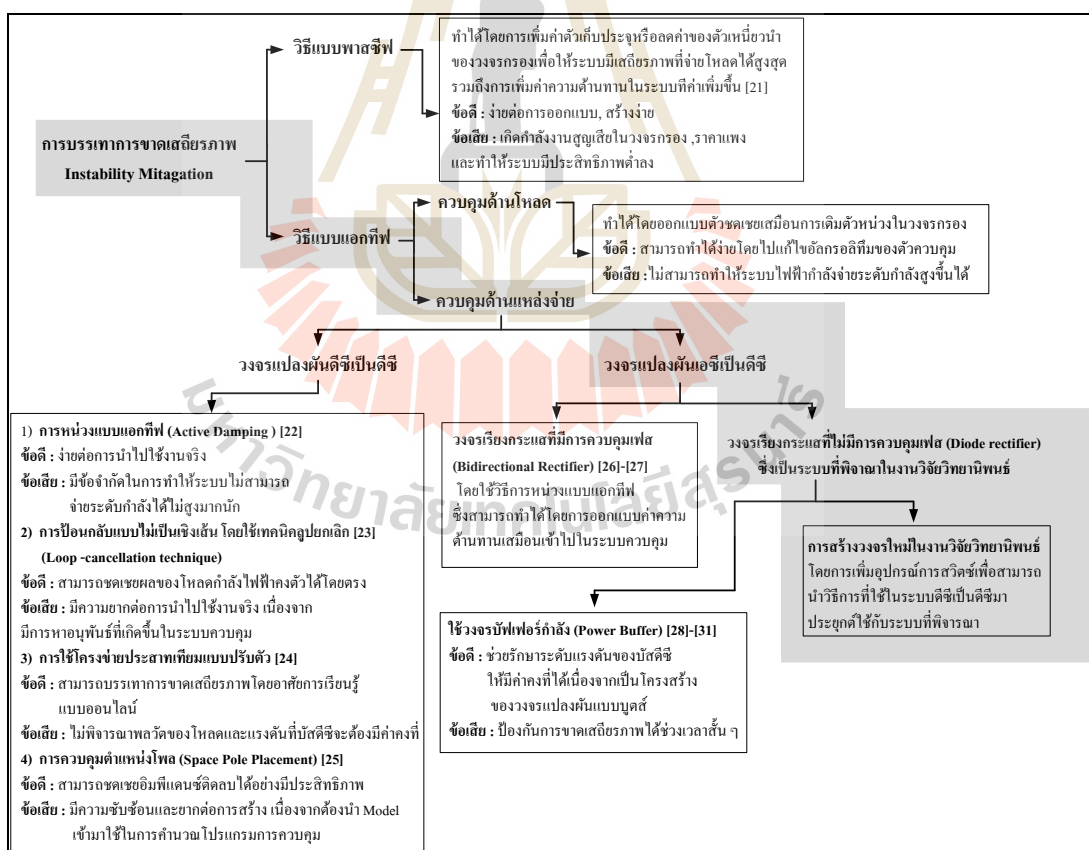
ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Weaver, W.W. and Krein, P.T.	บทความนี้แนะนำเสนอวิธีการควบคุมวงจรบัฟเฟอร์กำลังให้เหมาะสมที่สุดสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
2010	Rahimi, A.M., Williamson, G.A. and Emadi, A.	บทความนี้ได้แนะนำเสนอวิธีลูบยกเลิกในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพที่สุด ในการกำจัดค่าอิมพีแดนซ์ดัดลบ
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.	บทความนี้แนะนำเสนอการควบคุมตำแหน่งขั้วเด่นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายเพื่อทำการชดเชยค่าอิมพีแดนซ์ดัดลบ
2012	Mohamed, Y.A-R.I., Radwan, A.A.A., and Lee, T.K.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟได้ในการควบคุมความเร็วของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส
2012	Radwan, A.A.A. and Mohamed, Y.A-R.I.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟสำหรับระบบสถานีไฟฟ้ากระแสตรงขนาดย่อย
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.	บทความนี้แนะนำให้ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมที่มี การปรับตัวมาใช้สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียร เสถียรภาพสำหรับวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังตารางที่ 2.4 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการบรรเทาการ เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังรวมถึงการนำวิธีการได้นำเสนอไว้ในอดีตมาประยุกต์กับ งานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 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 ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือก วิธีการแบบแอกทีฟ ซึ่งมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ แบ่งได้เป็น 2 แนวทางคือ แนวทางที่ 1 การควบคุมด้านแหล่งจ่าย และแนวทางที่ 2 เป็นการควบคุมด้านโหลด สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยเลือกการควบคุมด้านแหล่งจ่าย เนื่องจากมีความต้องการทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ ซึ่งมีวิธีการต่างๆ ส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้กับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี และมีวิธีการบางส่วนนำมาใช้กับวงจรแปลงผันกำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโครงสร้างลักษณะเฉพาะของการทำวิจัย หรือไม่สามารรถนำมาพัฒนากับระบบแบบทั่วไปได้ แต่จะมี 2 วิธีการที่ได้แสดงไว้ในส่วนการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีในรูปที่ 2.2 คือ วิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ และวิธีลูปยกเล็ก ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ได้กับระบบทั่วไป และยังไม่มีการวิจัยในอดีตที่นำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะได้นำเอา 2 วิธีการมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งชานกัน ซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยรายละเอียดต่างๆ จะได้รับการนำเสนอในบทถัดไป

2.6 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งชานกัน ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้น ถือเป็นพื้นฐานและองค์ความรู้ที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัยสำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ คิดค้น และการพัฒนาด้านการบรรเทาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

บทที่ 3

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟสำหรับระบบ ไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

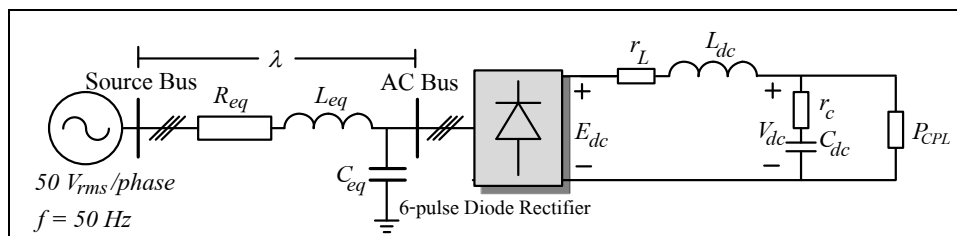
3.1 บทนำ

การเพิ่มค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรอง เมื่อถึงสภาวะการทำงานจุด ๆ หนึ่ง จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้น เนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอ ผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าแบบอุดมคติ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟเพื่อทำให้ระบบที่ขาดเสถียรกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง เพียงสร้างวงจรควบคุมอย่างง่ายเข้าไปในระบบ นอกจากนี้ยังแสดงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การหน่วงแบบแอกทีฟ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อนำแบบจำลองที่ได้นำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ซึ่งผลการยืนยันความถูกต้องของวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ รวมถึงนำเสนอข้อจำกัดของวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ

3.2 ผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อเสถียรภาพของระบบ

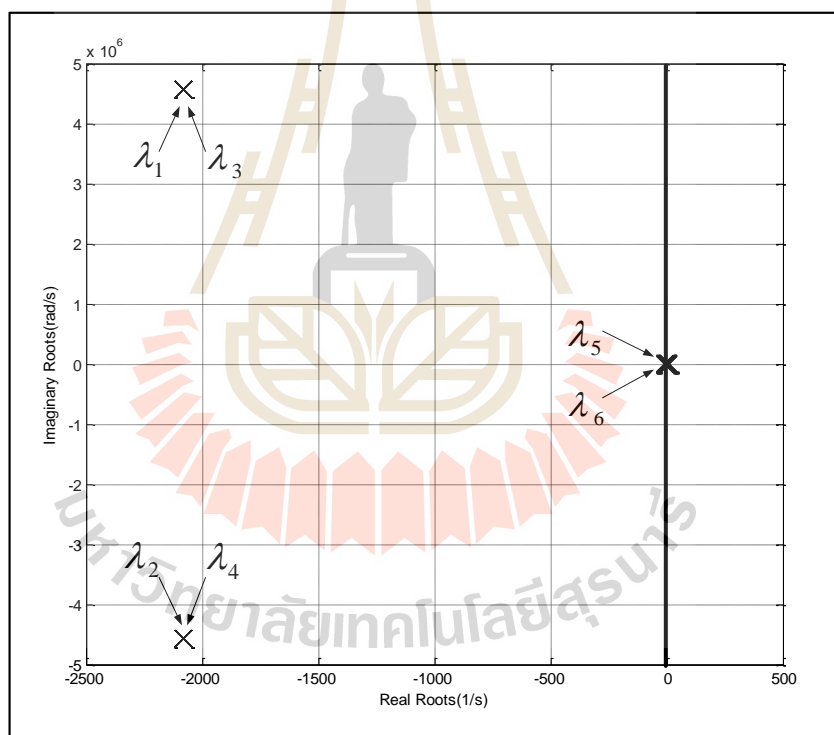
3.2.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองดีซี และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

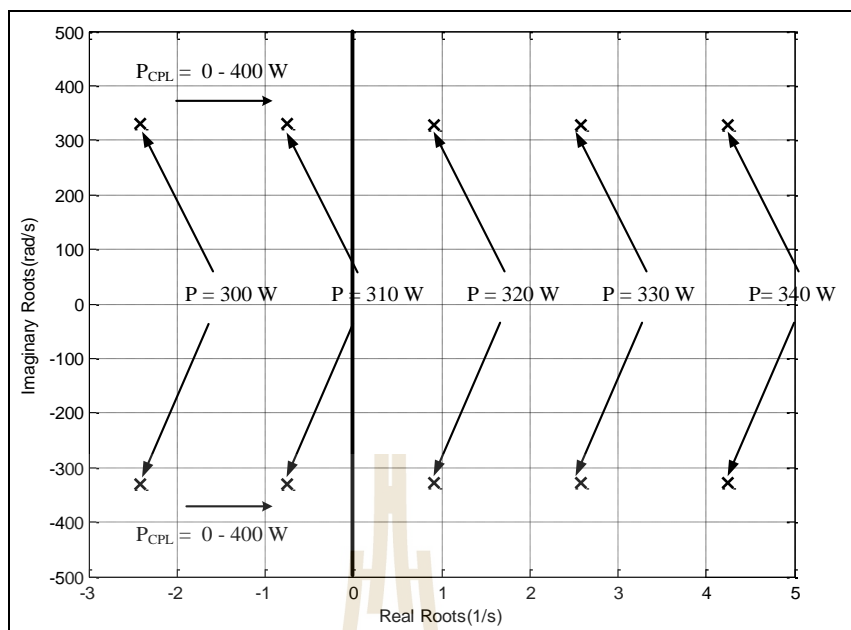


รูปที่ 3.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

จากรูปที่ 3.1 โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะลดทอนเสถียรภาพของระบบได้ เมื่อระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดดังกล่าวถูกเพิ่มขึ้นในทันที ก็คือ (P_{CPL}) เมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ จะทำให้แรงดันของวงจรตรงดิสซี (V_{dc}) เกิดการแกว่งที่มีค่ามากจนทำให้ระบบเกิดความเสียหายหรือส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ ดังนั้นการคาดเดาจุดการทำงานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบ ทำได้โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง ซึ่งได้รับการพิสูจน์บนพื้นฐานของวิธีการใน (Sopapirm T., Areerak K-N. and Areerak K-L., 2011) และนำแบบจำลองที่ได้มาผ่านวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 3.2 ประกอบไปด้วย $\lambda_1 - \lambda_6$ โดยค่าเจาะจงที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบคือ λ_5 และ λ_6 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยที่กำหนดค่าให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าจาก 0 W ไปจนถึง 400 W

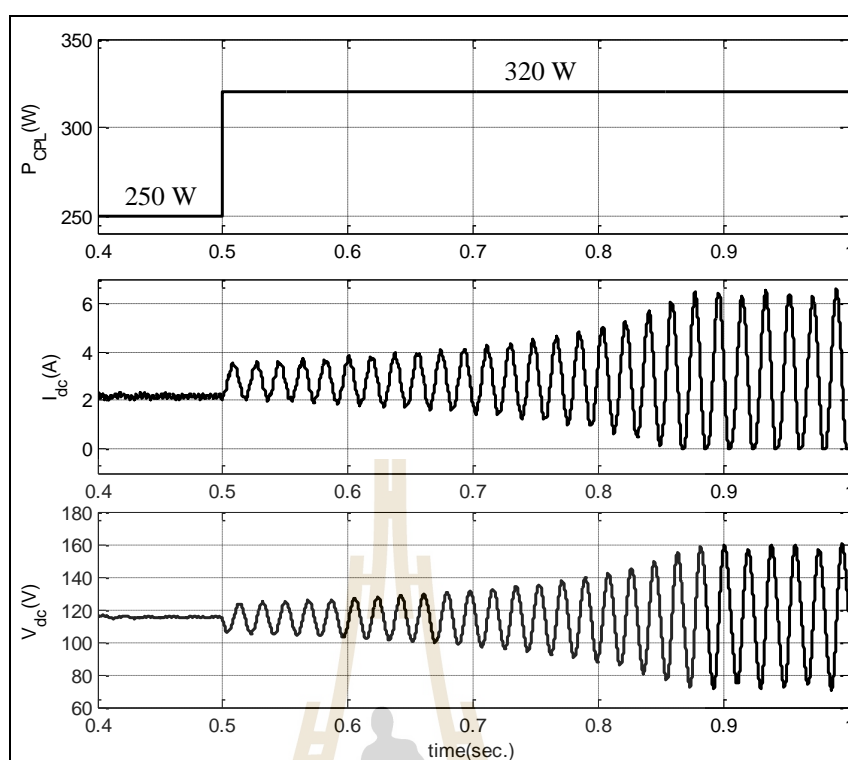


รูปที่ 3.2 ค่าเจาะจงของแบบจำลองวิธีคิควที่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 3.3 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังของโหลดจาก 0 - 400 W

จากรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 310 W ไปเป็น 320 W จะทำให้ขั้วเด่นของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งซ้ายของระนาบเอสมายู่ฝั่งขวา ซึ่งหมายถึงระบบที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 เริ่มเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 3.3 จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยกำหนดให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับกำลังไฟฟ้าจาก 250 W ไปเป็น 320 W ที่เวลา 0.5 วินาที



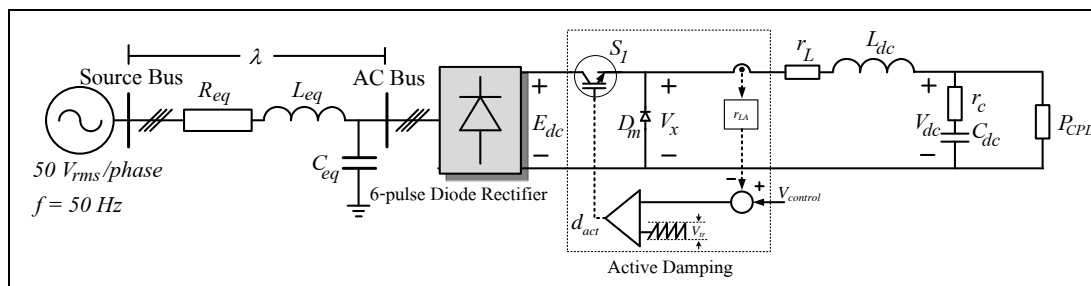
รูปที่ 3.4 การขึ้นขึ้นผลการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์

จากรูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับกำลังไฟฟ้าจาก 250 W ไปเป็น 320 W ที่เวลา 0.5 วินาที จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งดูได้จากผลการแกว่งของแรงดันบัสดีซีที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และทำให้สมรรถนะของระบบแยกลง ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้ จะนำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแยกทีฟมาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย และยังไม่มีการวิจัยในอดีตที่นำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี ซึ่งรายละเอียดการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแยกทีฟจะได้รับนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.3

3.3 การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแยกทีฟ

3.3.1 ระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแยกทีฟ

ระบบที่พิจารณาวิธีการหนึ่งแบบแยกทีฟแสดงดังรูปที่ 3.5 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส สายส่งกำลังไฟฟ้า ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ อุปกรณ์การสวิตช์สำหรับวิธีการหนึ่งแบบแยกทีฟ วงจรกรองสัญญาณดีซี และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ



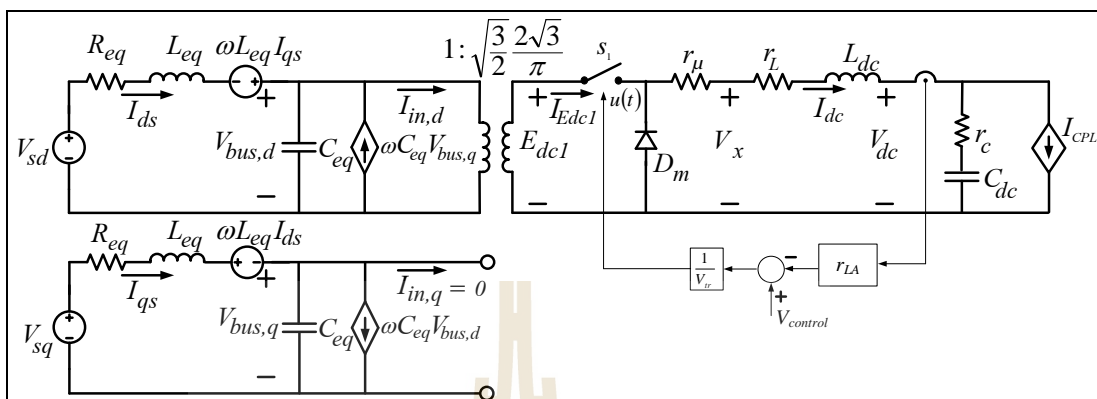
รูปที่ 3.5 ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาการหน่วงแบบแอคทีฟ

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า มีอุปกรณ์สวิตช์ (S_I) ที่ถูกเพิ่มขึ้นถัดจากไดโอดเรียงกระแสสามเฟส ซึ่งอุปกรณ์การสวิตช์นี้ สามารถถูกควบคุมการเปิดและปิดผ่านด้วยค่าวัฏจักรหน้าที่ (d_{act}) ซึ่งจะเป็นส่วนในการควบคุมแรงดันเอาต์พุต ในที่นี้ก็คือ V_x และจะสามารถปรับค่าได้ โดยที่ V_x จะมีค่าลดลงเมื่อปรับ d_{act} ให้มีค่าน้อยกว่า 1 และส่งผลให้ V_{dc} มีค่าลดลงด้วย ซึ่งเสมือนว่ามีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองคี่ซี โดยการลดลงของแรงดันเอาต์พุตด้วยตัวต้านทานเสมือน (r_{LA}) จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น จากรูปที่ 3.5 เมื่อทำการปรับ $V_{control}$ และ V_r มีค่าเท่ากับ 3 V โดยที่ค่าความต้านทานเสมือน (r_{LA}) มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ d_{act} มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์การสวิตช์นี้ ทำงานปิดวงตลอดหรือ อีกนัยหนึ่งก็คือ วงจรการหน่วงแบบแอคทีฟยังไม่ทำงาน แต่ถ้า r_{LA} มีค่าไม่เท่ากับ 0 จะทำให้ d_{act} มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งจะส่งผลทำให้แรงดันเอาต์พุต (V_{dc}) มีค่าลดลงตามหลักการของวิธีการหน่วงแบบแอคทีฟ เปรียบเสมือนกับการมีตัวต้านทานเสมือนเข้าไปในระบบจึงสามารถบรรเทาปัญหาการขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} ที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้ จะอาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งรายละเอียดการพิสูจน์จะได้รับนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

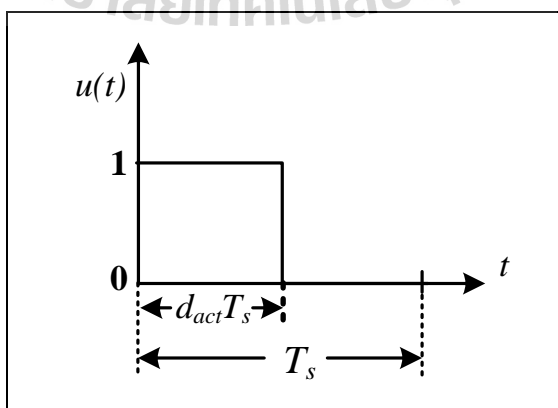
การวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} มีความจำเป็นในการอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบเมื่อค่า r_{LA} มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.4 สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสสมดุล และไดโอดเรียงกระแสสามเฟส สามารถแปลงให้อยู่ในรูปบนแกนหมุนดีคิวอย่างง่าย เมื่อกำหนดมุมเฟสการหมุนของแกนดีคิวเท่ากับมุมเฟสที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ($\phi = \phi_1$)

(Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G. and Thomos D.W.P., 2008) ดังนั้นจะได้วงจรสมมูลที่อยู่บนแกนดีคิวแสดงดังรูปที่ 3.6 ดังนี้



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาซึ่งถูกแทนด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว ยังเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับการสวิตช์ของวงจรหน่วงแบบแอกทีฟ การกำจัดผลการสวิตช์ของวงจรดังกล่าวจะอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Emadi A., Ehsani M. and Miller J.M., 2004) เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการสวิตช์ ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 3.6 ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จะเริ่มพิจารณาจากสัญญาณการสวิตช์แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรหน่วงแบบแอกทีฟแสดงได้สมการที่ (3-1)



รูปที่ 3.7 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 3.6 พิจารณาฝั่งดีซีของวงจร เมื่อสวิตช์ S_1 ปิด จะทำให้ $I_{dc} = I_{Edc1}$ และ $V_x = E_{dc1}$ และ เมื่อ สวิตช์ 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

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

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีดีคิว สามารถวิเคราะห์ด้วยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ ร่วมกับสมการที่ (3-2) ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลในรูปที่ 3.6 ที่ไม่พิจารณาวงจรการหน่วงแบบแอกทีฟเข้ามาในระบบ แสดงได้ดังสมการที่ (3-3) ดังนี้

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

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.6 การวิเคราะห์สมการเชิงอนุพันธ์ในส่วนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ผลของสัญญาณการสวิตช์ของวงจрдังกล่าวได้ถูกกำจัดทิ้งโดย

วิธีคิด อย่างไรก็ตาม แบบจำลองที่ได้ในสมการที่ (3-3) ยังเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจากผลการสวิตช์ของวงจรการหน่วงแบบแอกทิฟ ซึ่งในที่นี้คือ $u(t)$ ดังนั้นจึงได้นำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาใช้ในการกำจัดผลการสวิตช์ของวงจรดังกล่าว เพื่อให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งตัวแปรสถานะของแบบจำลองในสมการที่ (3-3) สามารถเขียนเป็นสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของ I_{ds} , I_{qs} , $V_{bus,d}$, $V_{bus,q}$, I_{dc} และ V_{dc} , โดยเลือกใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ หรือไม่คิดผลของการสั้นไกวของสัญญาณ ซึ่งสามารถกำหนดตัวแปรสถานะทั้ง 6 ตัวแปร แสดงดังสมการที่ (3-4) ดังนี้

$$\begin{cases} \langle I_{ds} \rangle_0 = I_{ds} \\ \langle I_{qs} \rangle_0 = I_{qs} \\ \langle V_{bus,d} \rangle_0 = V_{bus,d} \\ \langle V_{bus,q} \rangle_0 = V_{bus,q} \\ \langle I_{dc} \rangle_0 = I_{dc} \\ \langle V_{dc} \rangle_0 = V_{dc} \end{cases} \quad (3-4)$$

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

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

โดยที่ d_{act} คือ วัฏจักรหน้าที่ของวงจรสวิตช์ฝั่งดีซี

การกำจัดผลการสวิตช์ของวงจรการหน่วงแบบแอกทีฟ จะอาศัยสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนมาประยุกต์กับสมการเชิงอนุพันธ์ที่ (3-3) และแทนค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ที่มีการประมาณค่าอันดับศูนย์ด้วยสมการที่ (3-4) ซึ่งจะได้แบบจำลองเชิงพลวัตของวงจรสมมูลในรูปที่ 3.6 แสดงได้ดังสมการที่ (3-6)

$$\begin{cases} \dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\ \dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq} \cdot d_{act}} I_{dc} \\ \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \cdot d_{act} V_{bus,d} - \frac{(r_{\mu} + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc}} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{C_{dc}} \cdot \frac{P_{CPL}}{V_{dc}} \end{cases} \quad (3-6)$$

พิจารณาโครงสร้างระบบควบคุมด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟในรูปที่ 3.5 สามารถเขียนสมการ d_{act}^* แสดงได้ดังสมการที่ (3-7)

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

ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาการควบคุมด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ สามารถดำเนินการได้โดยการแทนค่า d_{act}^* ของสมการที่ (3-7) ไปยังสมการที่ (3-6) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของระบบในรูปที่ 3.5 ที่ได้จากการพิสูจน์ด้วยวิธีดีคิมและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ (3-8) ดังนี้

$$\begin{cases}
\dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}}V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}}V_{sd} \\
\dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}}I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}}V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}}V_{sq} \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}}I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}}\frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}}\frac{V_{tr}I_{dc}}{(V_{control}-r_{LA}I_{dc})} \\
\dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}}I_{qs} \\
\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}}\frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}}\left(\frac{V_{control}}{V_{tr}}\right)V_{bus,d} - \sqrt{\frac{3}{2}}\frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}}\left(\frac{r_{LA}}{V_{tr}}\right)V_{bus,d}I_{dc} - \left(\frac{r_{\mu}+r_L+r_c}{L_{dc}}\right)I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}}V_{dc} - \frac{r_c P_{CPL}}{L_{dc}V_{dc}} \\
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}}I_{dc} - \frac{P_{CPL}}{C_{dc}V_{dc}}
\end{cases} \quad (3-8)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟดังสมการที่ (3-8) จะสังเกตได้ว่า เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นปรากฏอยู่ในสมการคือ $\dot{V}_{bus,d}$, \dot{I}_{dc} , \dot{V}_{dc} , \dot{I}_{L1} และ \dot{I}_{L2} ซึ่งการวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} จะอาศัยแบบจำลองที่ทำให้เป็นเชิงเส้น (linearized model) ภายใต้อายุคค่าเฉพาะ (eigenvalue theorem) ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้อาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์ อันดับ 1 ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (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 $\delta \mathbf{x} = [\delta I_{ds} \quad \delta I_{qs} \quad \delta V_{bus,d} \quad \delta V_{bus,q} \quad \delta I_{dc} \quad \delta V_{dc}]^T$
 $\delta \mathbf{u} = [\delta V_m \quad \delta P_{CPL}]^T$ $\delta \mathbf{y} = [\delta V_{dc}]$

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

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} \frac{(V_{control} - r_{LA} I_{dc,o}) V_{tr} + r_{LA} V_{tr} I_{dc,o}}{(V_{control} - r_{LA} I_{dc})^2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \left(\frac{V_{control} - R_{LA} I_{dc,o}}{V_{tr}} \right) & 0 & -\frac{(r_{\mu} + r_L + r_c)}{L_{dc}} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \left(\frac{R_{LA} V_{bus,d,o}}{V_{tr}} \right) & -\left(\frac{1}{L_{dc}} + \frac{r_c P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc,o}^2} \right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc,o}^2} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\cos(\lambda_o)}{L_{eq}} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sin(\lambda_o)}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_c}{L_{dc} V_{dc,o}} \\ 0 & -\frac{1}{C_{dc} V_{dc,o}} \end{bmatrix}_{6 \times 2}$$

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

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

จากสมการที่ (3-9) จะสังเกตได้ว่า แบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นจะมีค่ามุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้า (λ) ประกอบอยู่ในสมการ \dot{I}_{ds} และ \dot{I}_{qs} จึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาค่า λ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะคำนวณหาค่า λ โดยอาศัยทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้ามาวิเคราะห์ระบบทางค่านไฟฟ้ากระแสสลับในรูปแบบที่ 3.5 ซึ่งสามารถแสดงสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3-10) ดังนี้

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

โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าจริง และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เมื่อพิจารณาที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-11) ดังนี้

$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{1}{3}(P_{CPL} + P_{loss}) \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-11)$$

โดยที่ P_{CPL} คือ ค่าระดับกำลังของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

P_{loss} คือ กำลังงานสูญเสียเนื่องจาก r_μ และ r_L

จากสมการที่ (3-10) และ (3-11) สามารถเขียนโปรแกรมสำหรับการคำนวณหาค่า λ โดยอาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและกราฟเส้นด้วย M-file บนโปรแกรม MATLAB ได้ โดยรายละเอียดสามารถดูได้จากวิทยานิพนธ์ปริญญาโทของเทพพนม (เทพพนม โสภานพรม, 2554) ซึ่งการทำงานของโปรแกรมจะดำเนินการคำนวณหาค่า V_{bus} และ λ ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งความคลาดเคลื่อนของคำตอบที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 1×10^{-6} เมื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรม จะได้ค่า V_{bus} และ λ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับค่าระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า V_{bus} และ λ ที่คำนวณได้เป็นค่าในสถานะคงตัว หรือเป็นค่า ณ จุดปฏิบัติงานของระบบ ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดโปรแกรมจะได้ค่า $V_{bus,o}$ และ λ_o

จากค่า $V_{bus,o}$ และ λ_o ที่คำนวณได้ สามารถนำไปใช้สำหรับคำนวณหาค่าในสถานะคงตัวของค่า $V_{dc,o}$ แสดงได้ดังสมการที่ (3-12) ดังนี้

$$V_{dc,o} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi}(\sqrt{2}V_{bus,o}) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi}I_{dc,o} - r_L I_{dc,o} \quad (3-12)$$

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

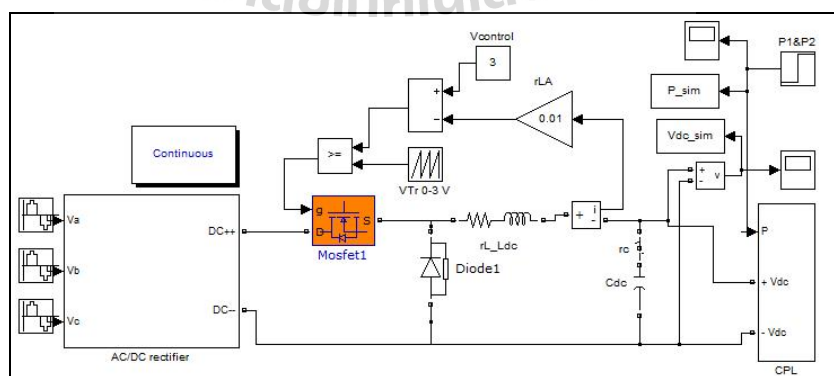
$$Z = \sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}, \quad \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \right)$$

3.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3-9) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ของสัญญาณขนาดเล็กแบบชั่วคราว เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปแบบที่ 3.5 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB คูได้จากรูปที่ 3.8 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 3.1

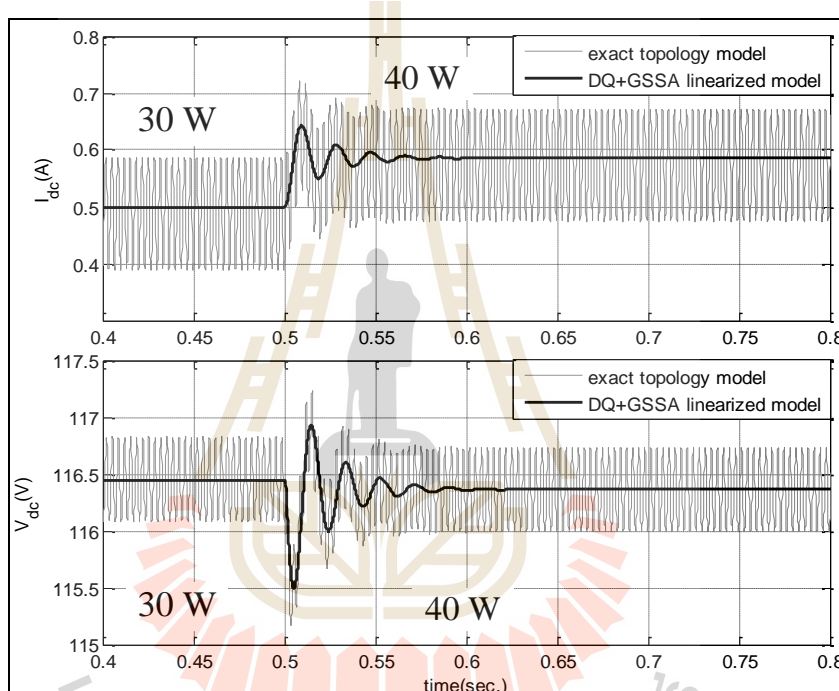
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 3.5

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}	0.21mH	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
r_L	0.57 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
L_{dc} ($\Delta I_{dc} \leq 0.5$ A)	37.7mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
C_{dc} ($\Delta V_{dc} \leq 5$ V)	237.35 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
r_c	2.97 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ
$V_{control}$	3 V	แรงดันควบคุม
V_{tr}	3 V	แรงดันเปรียบเทียบรูปสัญญาณสามเหลี่ยม

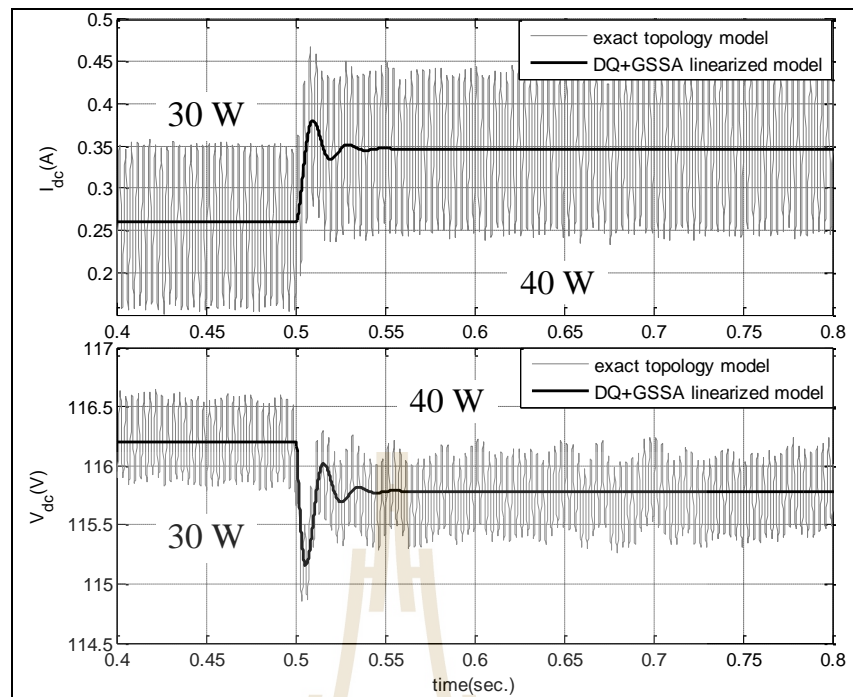


รูปที่ 3.8 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

จากรูปที่ 3.8 แสดงการต่อวงจรสำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหนึ่งแบบแยกที่ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB เพื่อให้มีความสอดคล้องกับระบบที่พิจารณาในรูปที่ 3.5 ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 โดยที่กำหนดให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับกำลังไฟฟ้าจาก 30 W ไปเป็น 40 W ที่เวลา 0.5 วินาที เมื่อค่า r_{LA} มีค่าคงที่เท่ากับ 0Ω และรูปที่ 3.10 กำหนดให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับกำลังไฟฟ้าจาก 30 W ไปเป็น 40 W ที่เวลา 0.5 วินาที เมื่อค่า r_{LA} มีค่าคงที่เท่ากับ 0.1Ω



รูปที่ 3.9 ผลการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าจาก 30 W เป็น 40 W เมื่อ $r_{LA} = 0 \Omega$



รูปที่ 3.10 ผลการเปลี่ยนแปลง โหลดกำลังไฟฟ้าจาก 30 W เป็น 40 W เมื่อ $r_{LA} = 0.1 \Omega$

จากรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_{dc}) และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{dc}) ที่อาศัยการพิสูจน์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้เป็นเชิงเส้น มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์มีความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งสามารถนำไปใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยรายละเอียดจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ

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

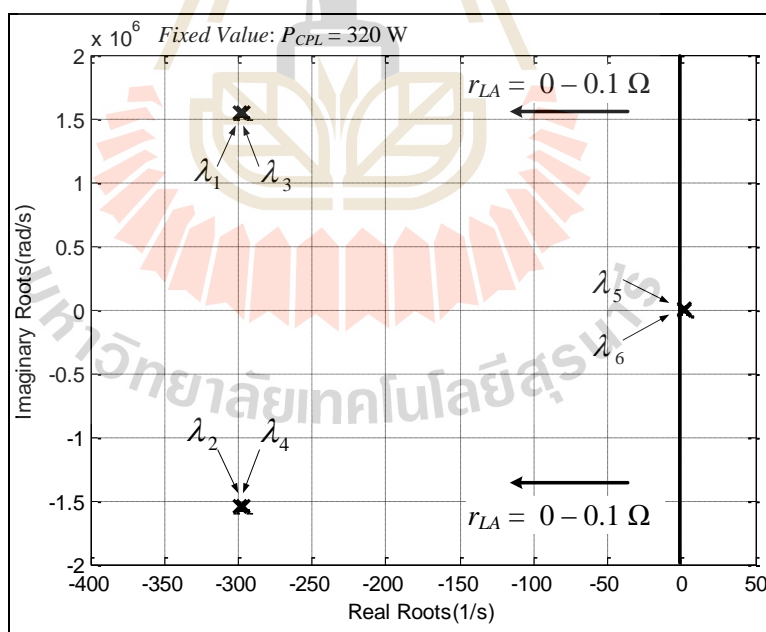
$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (3-14)$$

ถ้าระบบมีเสถียรภาพ ค่าจริงของ λ ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3-14) ต้องมีเงื่อนไขดังนี้

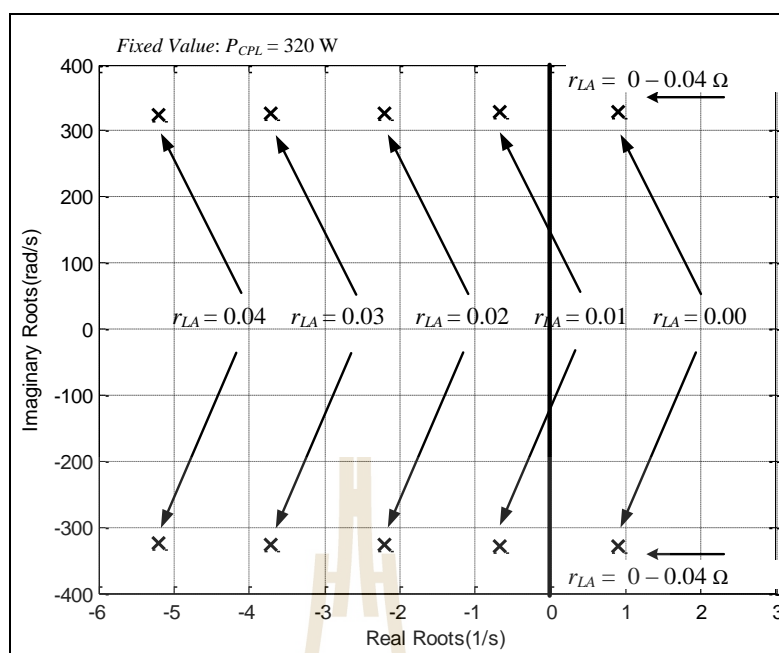
$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (3-15)$$

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

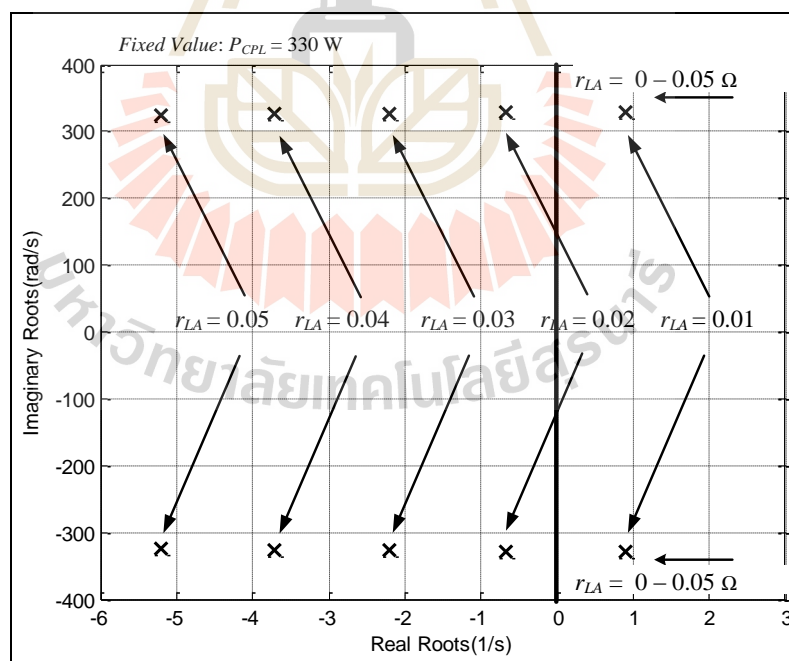
การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟในรูปที่ 3.5 สามารถวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้ โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าเจาะจงที่อาศัยการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งรูปที่ 3.11 ประกอบไปด้วย $\lambda_1 - \lambda_6$ โดยค่าเจาะจงที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบคือ λ_5 และ λ_6 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.12 ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า r_{LA} จาก 0 Ω ถึง 0.04 Ω โดยที่กำหนดให้ค่าระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าคงที่เท่ากับ 320 W และรูปที่ 3.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า r_{LA} จาก 0 Ω ถึง 0.05 Ω โดยที่กำหนดให้ค่าระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าคงที่เท่ากับ 330 W



รูปที่ 3.11 ผลการคำนวณค่าเจาะจงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ

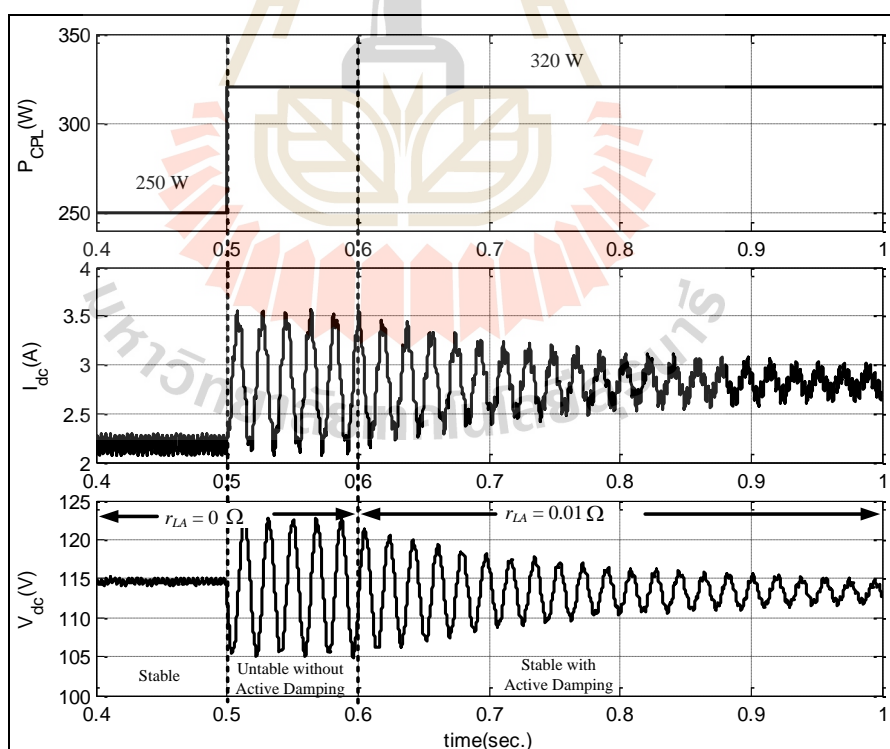


รูปที่ 3.12 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพโดยกำหนดให้ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 320 W

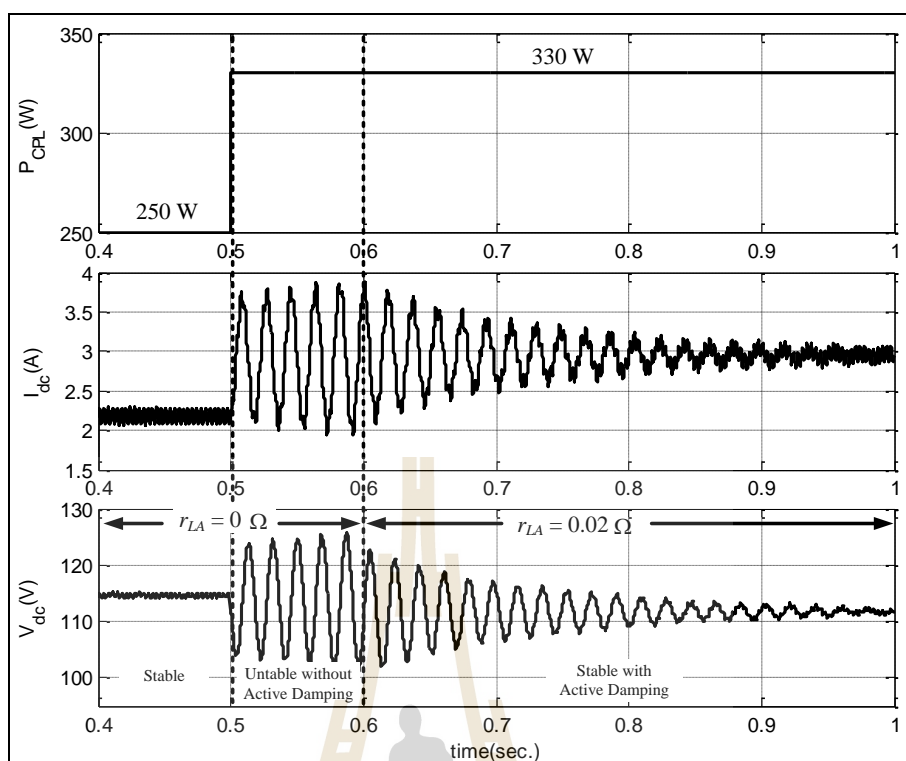


รูปที่ 3.13 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ โดยกำหนดให้ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 330 W

จากรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่า ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่มีการเพิ่มขึ้นของค่า r_{LA} จะทำให้ค่าเจาะจงที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบคือ λ_5 และ λ_6 ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ได้โดยแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 โดยที่กำหนดให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 320 W ที่ค่า r_{LA} มีค่าเท่ากับ 0 Ω (ยังไม่มี การชดเชยด้วยการห่วงแบบแอกทีฟ) ระบบจะขาดเสถียร และเมื่อ r_{LA} มีค่าเป็น 0.01 Ω (วงจรการห่วงแบบแอกทีฟเริ่มทำงาน) ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้แรงดันเอาต์พุตบัสดีซีลดลงน้อยที่สุด และทำให้โพลของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมาอยู่ที่ฝั่งซ้าย ซึ่งหมายถึงระบบที่ขาดเสถียรสามารถกลับมาเสถียรได้อีกครั้ง เพียงแค่การเพิ่มค่าความต้านทานเสมือนจาก 0 Ω มาเป็น 0.01 Ω และรูปที่ 3.13 มีการปรับเพิ่มโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 320 W ไปเป็น 330 W จะเห็นได้ว่า ระบบที่ขาดเสถียรสามารถกลับมาเสถียรได้อีกครั้ง จะต้องเพิ่มค่าความต้านทานเสมือนจาก 0.01 Ω มาเป็น 0.02 Ω ซึ่งการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบจะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วย โปรแกรม MATLAB แสดงดังรูปที่ 3.14 โดยที่กำหนดโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับกำลังไฟฟ้าจาก 250 W ไปเป็น 320 W ที่เวลา 0.5 วินาที และรูปที่ 3.15 กำหนดโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับกำลังไฟฟ้าจาก 250 W ไปเป็น 330 W ที่เวลา 0.5 วินาที



รูปที่ 3.14 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 320 W



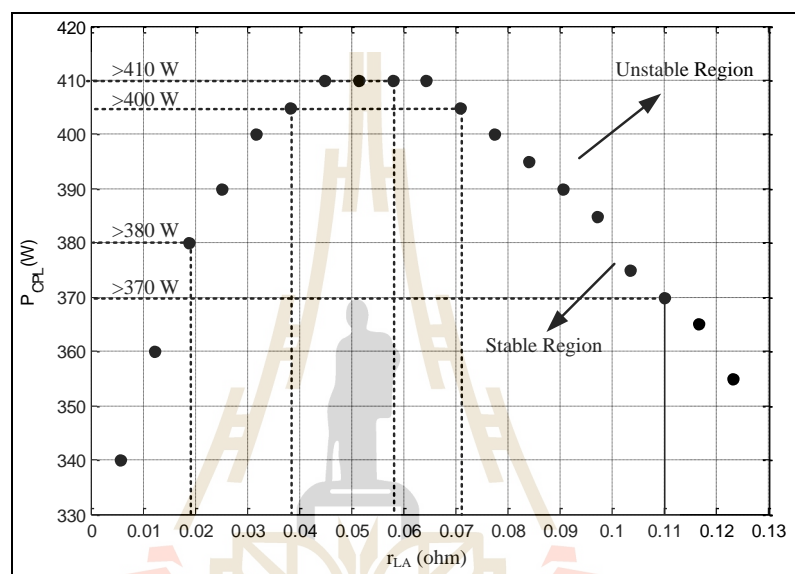
รูปที่ 3.15 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 330 W

จากรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่า 320 W การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห่วงแบบแอกทีฟเมื่อ r_{LA} เท่ากับ 0.01 Ω จะทำให้ระบบที่พิจารณา กลับมามีเสถียรภาพได้ แต่ถ้าระดับของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 330 W ดังในรูปที่ 3.15 ค่าความต้านทานเสมือน r_{LA} จะต้องมีค่ามากกว่า 0.01 Ω ในที่นี้ก็คือ 0.02 เพื่อทำให้ระบบสามารถกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง การคำนวณหา r_{LA} ที่เหมาะสมสำหรับค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวค่าต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3.19) ดังที่ได้นำเสนอไว้แล้ว อย่างไรก็ตาม การเพิ่มค่า r_{LA} ที่สูงขึ้น จะทำให้แรงดันบัสดีซีมีค่าลดลงด้วย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพได้ ดังนั้นวิธีดังกล่าวจึงมีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาก่อนนำไปใช้งานจริง ซึ่งรายละเอียดจะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.4 ข้อจำกัดวิธีการห่วงแบบแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

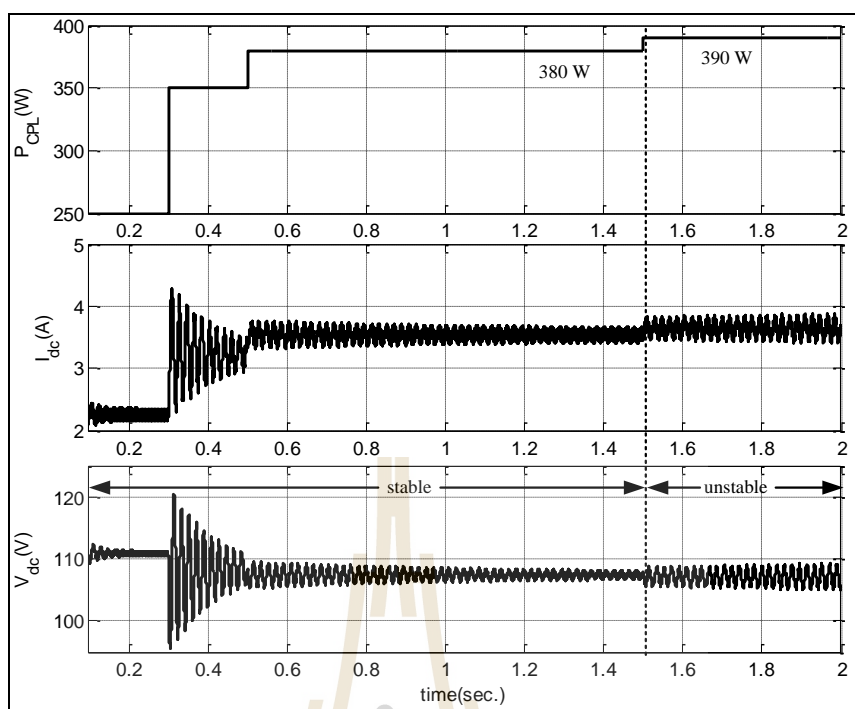
การบรรเทาการขาดเสถียรภาพจากหัวข้อที่ 3.3 จะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของวิธีการห่วงแบบแอกทีฟเพียงค่าเดียว เพื่อให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพ แต่ถ้าจุดการทำงานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะ

พิจารณาผลการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ของวิธีการดังกล่าวด้วยการคำนวณค่าเจาะจง โดยเริ่มจากการเพิ่มค่า r_{LA} ที่ละ 0.01 หลังจากนั้นทำการเพิ่มโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 0 W ไปจนกระทั่งถึงจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งหมายถึง ขั้วเด่นของระบบเคลื่อนจากฝั่งซ้ายมายังฝั่งขวาของระนาบเอส ซึ่งผลการวิเคราะห์จะสามารถแสดงแนวโน้มการแบ่งขอบเขตการมีเสถียรภาพและขาดเสถียรของระบบได้ดังรูปที่ 3.16 โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า r_{LA} ของระบบตั้งแต่ 0 – 0.13 Ω ซึ่งค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ กำหนดให้มีค่าตามตารางที่ 3.1

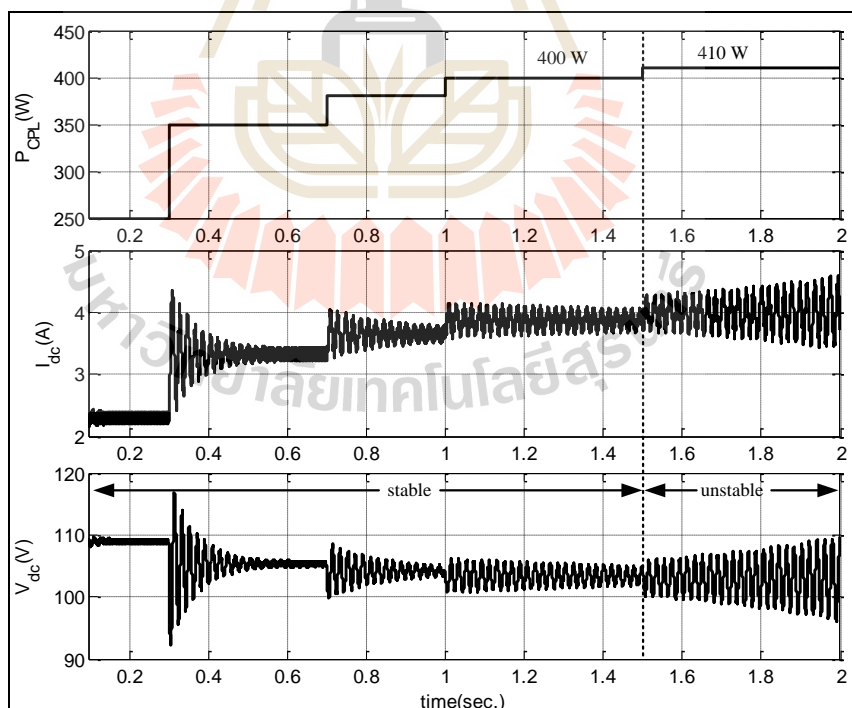


รูปที่ 3.16 ผลการเปลี่ยนแปลง r_{LA} ที่มีผลต่อเสถียรภาพ

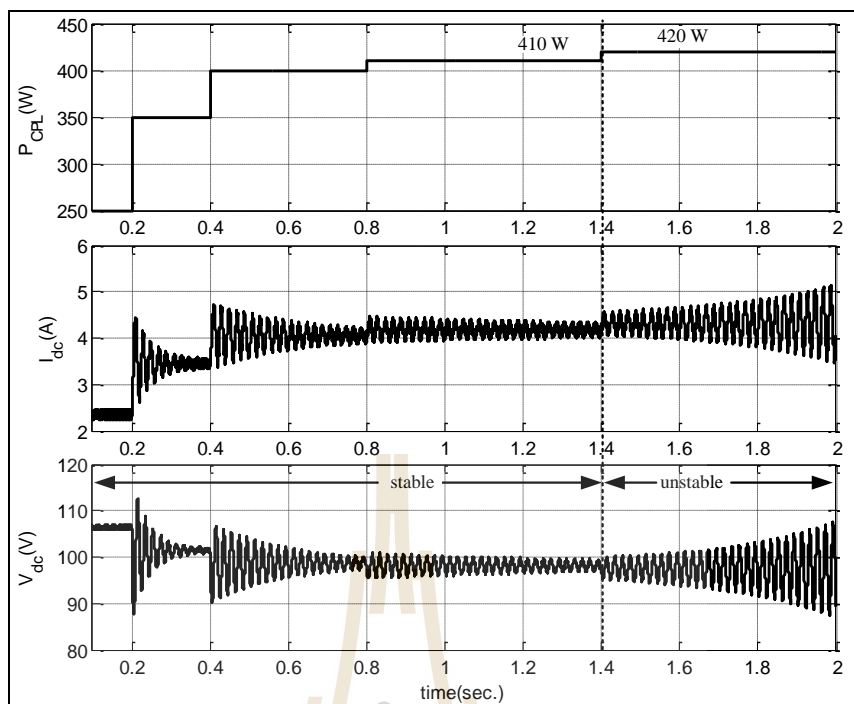
จากรูปที่ 3.16 สังเกตได้ว่าเมื่อพารามิเตอร์ r_{LA} มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 Ω ไปจนถึง 0.065 Ω จะทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพสูงสุดที่ 410 W และเมื่อพารามิเตอร์ r_{LA} มีค่ามากกว่า 0.065 Ω ทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพน้อยลง เนื่องจากผลของแรงดันเอาต์พุตที่ลดลงมีผลกระทบต่อเสถียรภาพมากกว่าการเพิ่มค่า r_{LA} สำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากรูปที่ 3.16 จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ r_{LA} มีค่า 0.019, 0.038, 0.058, 0.071, 0.11 Ω แสดงดังรูปที่ 3.17, 3.18, 3.19, 3.20 และ 3.21 ตามลำดับ



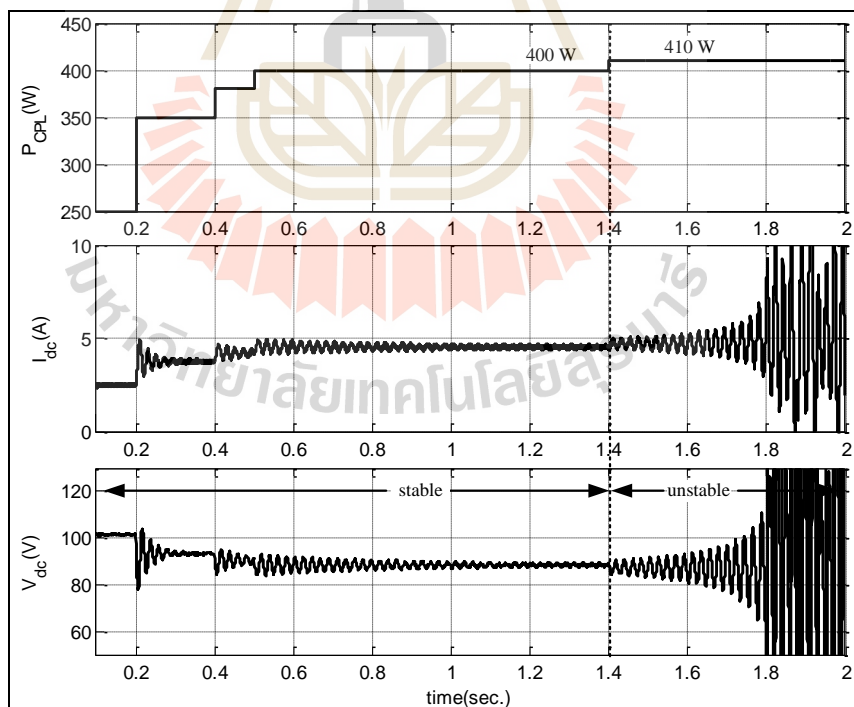
รูปที่ 3.17 ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL} = 390$ W เมื่อกำหนดให้ $r_{LA} = 0.019 \Omega$



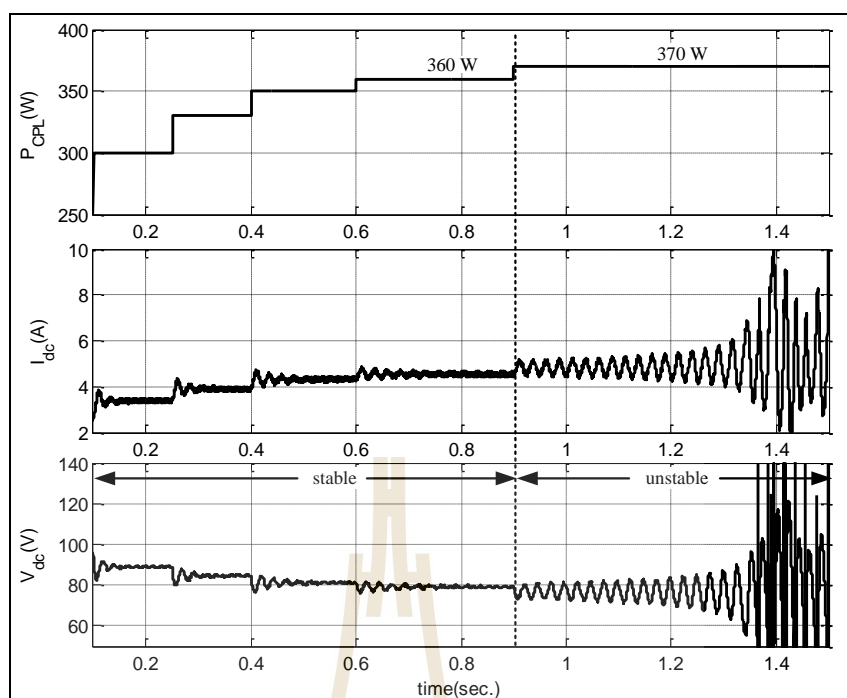
รูปที่ 3.18 ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL} = 410$ W เมื่อกำหนดให้ $r_{LA} = 0.038 \Omega$



รูปที่ 3.19 ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL} = 420$ W เมื่อกำหนดให้ $r_{LA} = 0.058$ Ω



รูปที่ 3.20 ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL} = 410$ W เมื่อกำหนดให้ $r_{LA} = 0.071$ Ω



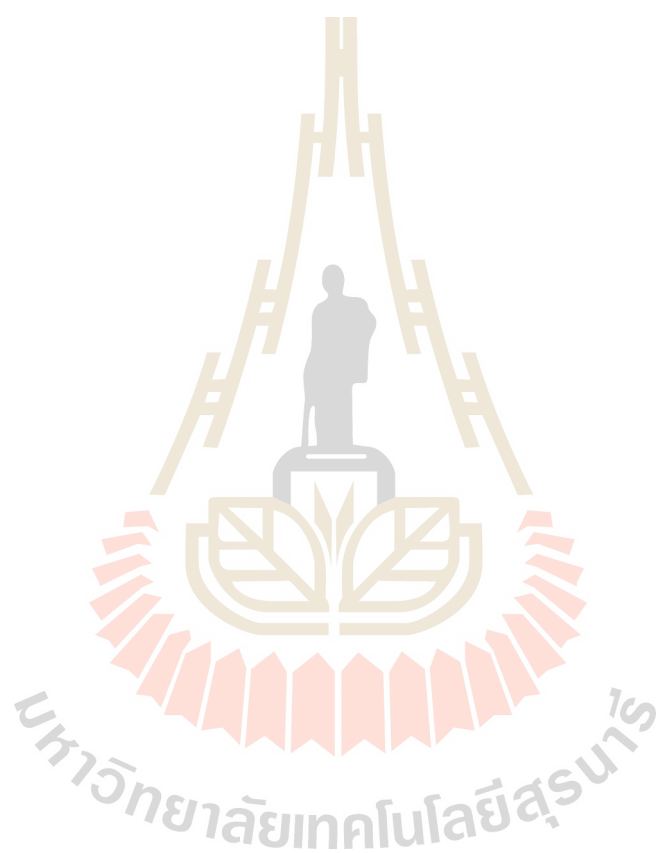
รูปที่ 3.21 ผลการขาดเสถียรภาพที่ $P_{CPL} = 370 \text{ W}$ เมื่อกำหนดให้ $r_{LA} = 0.11 \Omega$

จากรูปที่ 3.17 - 3.21 แสดงให้เห็นว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบ แอ็กทีฟ จะสามารถทำให้ระบบที่พิจารณาในรูปที่ 3.5 มีเสถียรภาพได้สูงสุดที่ 410 W ด้วยการเพิ่ม ค่า $r_{LA} = 0.058 \Omega$ และรูปที่ 3.20 - 3.21 ระบบดังกล่าวจะเริ่มมีเสถียรภาพลดลงด้วยการเพิ่มค่า r_{LA} มากกว่า 0.065Ω และจะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่รุนแรง ซึ่งดูได้จากผลของการแกว่ง แรงดันบัสดีซีที่เกิดการกระเพื่อมสูง ดังนั้นการเพิ่มค่า r_{LA} ที่สูงขึ้นสำหรับการบรรเทาการขาด เสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอ็กทีฟ แสดงให้เห็นว่ามีข้อจำกัดซึ่งอาจจะไม่เหมาะสำหรับการ นำไปใช้งานจริง จากผลการยืนยันการจำลองสถานการณ์ และผลการวิเคราะห์สอดคล้องตามรูปที่ 3.16

3.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้แนะนำการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบอันเนื่องมาจากโหลด กำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยวิธีการห้วงแบบแอ็กทีฟพร้อมทั้งแนะนำการคำนวณหาค่าความต้านทาน เสมือน r_{LA} ในวงจรควบคุมการห้วงแบบแอ็กทีฟผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความ ถูกต้องสูง ผลการศึกษาจากทฤษฎี และการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอในบทนี้ สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง อย่งไรก็ตาม ด้วยวิธีการดังกล่าวสำหรับผลการเปลี่ยนแปลงค่า r_{LA} ยังถูกจำกัดการบรรเทาผลการขาด

เสถียรภาพในกรณีจุดการทำงานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดด้วยวิธีการหนึ่งแบบแอกทีฟ สำหรับงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในอนาคต จะเป็นการนำเสนอวิธีรูปยกเล็กซึ่งเป็นวิธีที่สามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้เช่นเดียวกัน โดยรายละเอียดจะได้รับนำเสนอในบทถัดไป



บทที่ 4

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีผูกเหล็กสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง เอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

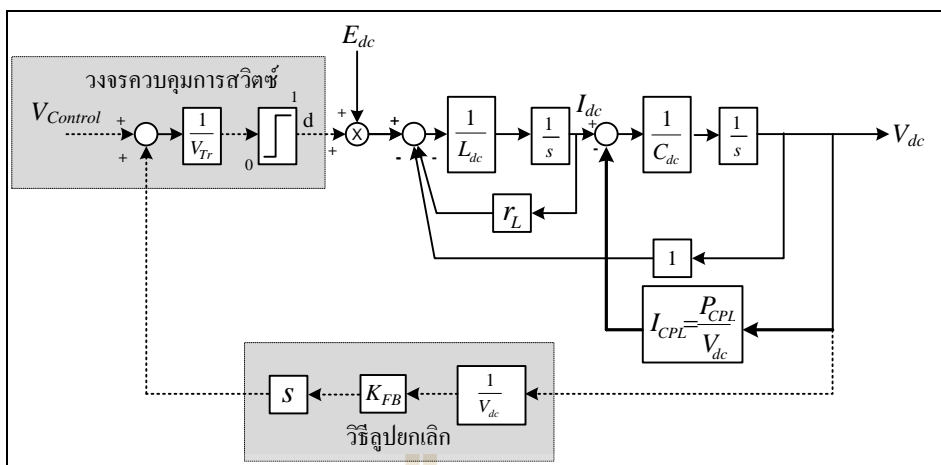
4.1 บทนำ

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ ตามที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มค่าความต้านทานเสมือน (r_{LA}) มีข้อจำกัด ซึ่งอาจทำให้ระบบไม่สามารถจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าไปถึงจุดที่พิกัดของแหล่งจ่ายได้ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีผูกเหล็กสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งวิธีการดังกล่าว สามารถกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้โดยตรง และสามารถทำให้ระบบดังกล่าวมีเสถียรภาพในย่านการทำงานที่กว้างขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟ นอกจากนี้ยังแสดงแผนภาพของโครงสร้างวิธีผูกเหล็ก การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราขยาย (K_{FB}) สำหรับการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การวิเคราะห์เสถียรภาพ การสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัว และการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

4.2 การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีผูกเหล็ก

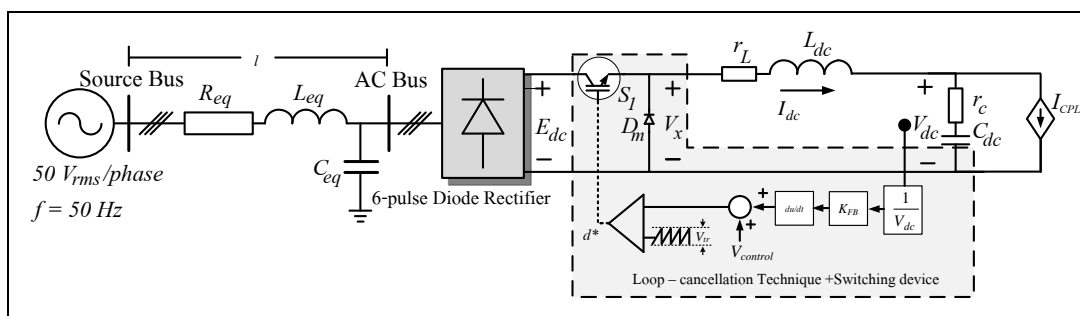
4.2.1 แผนภาพแสดงการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีผูกเหล็ก

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีผูกเหล็ก จะอาศัยการอธิบายผ่านแผนภาพบล็อกไดอะแกรมในวงจรกรองบัสดีซีของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดยแสดงดังรูปที่ 4.1 ดังนี้



รูปที่ 4.1 แผนภาพการสร้างวิธีลูปยกเลิก

จากแผนภาพรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ในที่นี้คือ $(I_{CPL}=P_{CPL}/V_{dc})$ สามารถไปลดทอนเสถียรภาพของระบบ ซึ่งจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นการกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สามารถทำได้โดยการตรวจจับแรงดันเอาต์พุตที่บัสดีซีให้อยู่ในรูปแบบผกผัน จากนั้นนำมาปรับคูณกับค่าสัมประสิทธิ์ (K_{FB}) เพื่อทำหน้าที่ปรับอัตราขยายการชดเชยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และผ่านการหาอนุพันธ์ของขนาดสัญญาณที่ได้ ส่งผ่านไปยังวงจรควบคุมการสวิตช์ ซึ่งในที่นี้ จะต้องสร้างวงจรดังกล่าวเพิ่มเข้าไปในระบบ ซึ่งจะอยู่ระหว่างไดโอดเรียงกระแส และวงจรกรองบัสดีซี เพื่อสามารถทำให้ระบบมีการควบคุมแรงดันบัสดีซี และสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ จากแผนภาพในรูปที่ 4.1 วิธีการในอดีตจะเรียกว่า วิธีลูปยกเลิก แต่ยังไม่มีการนำมาใช้กับระบบวงจรแปลงผันแบบเอชบีเป็นดีซี ดังนั้นการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเลิก สามารถนำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งแสดงดังได้รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรด้วยวิธีลูปยกเลิก

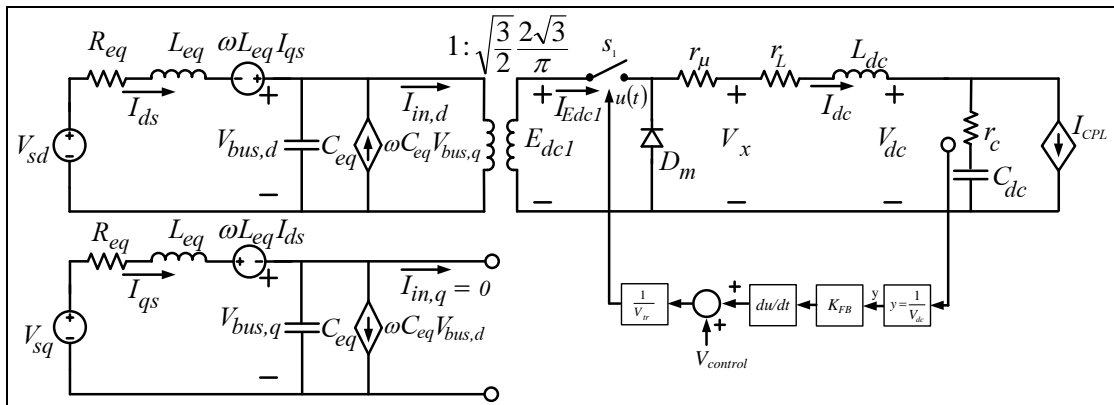
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า มีอุปกรณ์สวิตช์ (S_1) ที่ถูกเพิ่มเข้ามาในวงจรถัดจากไดโอดเรียงกระแสสามเฟส ซึ่งอุปกรณ์สวิตช์นี้ สามารถถูกควบคุมการเปิดและปิดผ่านด้วยวัฏจักรหน้าที่ (d^*) ซึ่งจะเป็นส่วนในการควบคุมแรงดันเอาต์พุต ในที่นี้ก็คือ V_x และจะสามารถปรับค่าได้แสดงดังสมการที่ (4-1) โดยที่ V_{tr} กำหนดให้มีความเท่ากับ 3 V และ $V_{control}$ มีค่า 2.9 V ซึ่งค่าดังกล่าวจะทำให้มีวัฏจักรหน้าที่เพียงพอต่อการทำงานของการทำงานของระบบการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก และส่งผลต่อเสถียรภาพน้อยที่สุด ซึ่งรายละเอียดการทดสอบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

$$d^* = \frac{1}{V_{tr}} \left(V_{control} + K_{FB} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{dc}} \right) \right) \quad (4-1)$$

จากสมการที่ (4-1) จะเห็นได้ว่า เมื่อค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ d^* มีค่าคงที่ 0.967 ซึ่งจะทำให้แรงดันเอาต์พุตบัสดีซีมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุปกรณ์สวิตช์ (S_1) เข้ามาในระบบ แต่ถ้า K_{FB} ค่ามากกว่า 0 จะทำให้ d^* มีอัตราการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันเอาต์พุตบัสดีซี ซึ่งจะสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} ที่ทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพ กลับมามีเสถียรภาพได้ จึงมีความจำเป็นต่อการคำนวณค่าอัตราขยายดังกล่าว จะอาศัยการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความถูกต้องแม่นยำ โดยรายละเอียดจะแสดงในหัวข้อที่ 4.2.2

4.2.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวิธีลูบยกเล็ก จะอาศัยการวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} ผ่านการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นวิธีการที่ถูกต้องแม่นยำ และสามารถถูกนำไปคำนวณด้วยทฤษฎีค่าเจาะจง เพื่อสามารถคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้จากระบบที่พิจารณาในรูปที่ 4.2 สามารถพิจารณาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสด้วยวิธีดีคิว ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลที่อยู่บนแกนดีคิว โดยกำหนดมุมเฟสการหมุนของสัญญาณการสวิตช์ ($\phi = \phi_1$) เช่นเดียวกันที่ได้รับนำเสนอไว้ในบทที่ 3 ดังนั้น จะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนดีคิวแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลที่อยู่บนแกนหมุนดีคิวอย่างง่าย

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าการหาแบบจำลองของวงจรสมมูลดังกล่าว ยังเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาเนื่องจากผลการสวิตช์ การกำจัดผลการสวิตช์จะอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Emadi A., Ehsani M. and Miller J.M., 2004) โดยอาศัยการพิสูจน์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกับสมการที่ได้รับนำเสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงการหาสมการเชิงอนุพันธ์ของวงจรสมมูลที่พิจารณาโครงสร้างระบบควบคุมด้วยวิธีลูปลักษณ์ในรูปที่ 4.3 แสดงได้ดังสมการที่ (4-2)

$$\begin{cases}
 \dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
 \dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} \left(V_{control} - K_{FB} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{dc}} \right) \right) I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\
 \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3} V_{control}}{\pi L_{dc} V_{tr}} V_{bus,d} - \frac{(r_{\mu} + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_c P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3} K_{FB} V_{bus,d}}{\pi L_{dc} V_{tr}} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{dc}} \right) \\
 \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc}}
 \end{cases} \quad (4-2)$$

จากสมการที่ (4-2) จะเห็นได้ว่า ภายในสมการ $\dot{V}_{bus,d}$ และ \dot{I}_{dc} ยังมีตัวแปรสถานะที่ติดอยู่ในรูปของพจน์อนุพันธ์ $\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{dc}} \right)$ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความยุ่งยาก และซับซ้อน ดังนั้นการกำจัดผลของพจน์อนุพันธ์ใน สมการ

$\dot{V}_{bus,d}$ และ \dot{I}_{dc} สามารถจัดรูปสมการใหม่ โดยกำหนดให้ \dot{I}_{dc} แสดงได้ดังสมการที่ (4-3) โดยที่ \dot{I}_{dcl} แสดงได้ดังสมการที่ (4-4)

$$\begin{cases} \dot{I}_{dc} = \dot{I}_{dcl} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \frac{K_{FB} V_{bus,d}}{V_{tr}} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{dc}} \right) \\ \dot{I}_{dc} = \dot{I}_{dcl} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \frac{K_{FB} V_{bus,d}}{V_{tr}} \left(\frac{1}{V_{dc}} \right) \end{cases} \quad (4-3)$$

$$\text{โดยที่ } \dot{I}_{dcl} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3} V_{control}}{\pi L_{dc} V_{tr}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_c P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc}} \quad (4-4)$$

ดำเนินการแทน I_{dc} ในสมการเชิงอนุพันธ์ $\dot{V}_{bus,d}$ ของสมการที่ (4-2) ซึ่งรายละเอียดซึ่งสามารถแสดงการพิสูจน์ได้ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3} V_{tr}}{\pi C_{eq} \left(V_{control} - \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{dc}} \right) \right)} \left(I_{dcl} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{dc} V_{tr}} \right) V_{bus,d} \right) \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3} V_{tr}}{\pi C_{eq} \left(V_{control} - K_{FB} \left(\frac{\dot{V}_{dc}}{V_{dc}^2} \right) \right)} \left(I_{dcl} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{dc} V_{tr}} \right) V_{bus,d} \right) \end{cases}$$

ดังนั้น จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ $\dot{V}_{bus,d}$ แสดงดังสมการที่ (4-5)

$$\begin{aligned} \dot{V}_{bus,d} = & \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3} V_{tr}}{\pi C_{eq} \left(V_{control} - K_{FB} \left(\frac{\dot{V}_{dc}}{V_{dc}^2} \right) \right)} I_{dcl} \\ & + \frac{18 K_{FB}}{\pi^2 C_{eq} L_{dc}} \frac{1}{\left(V_{control} - K_{FB} \left(\frac{\dot{V}_{dc}}{V_{dc}^2} \right) \right)} \frac{V_{bus,d}}{V_{dc}} \end{aligned} \quad (4-5)$$

จากสมการที่ (4-5) สามารถกำหนดให้ $K_{FB} \left(\frac{\dot{V}_{dc}}{V_{dc}^2} \right) = 0$ เนื่องจาก มีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับ $V_{control}$ โดยรายละเอียดการพิสูจน์แสดงไว้ในภาคผนวก ข. ดังนั้น จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ $\dot{V}_{bus,d}$ แสดงได้ดังสมการที่ (4-6)

$$\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}V_{tr}}{\pi C_{eq} V_{control}} I_{dcl} + \frac{18K_{FB}}{\pi^2 C_{eq} L_{dc} V_{control}} \frac{V_{bus,d}}{V_{dc}} \quad (4-6)$$

จากสมการที่ (4-3) ดำเนินการแทน I_{dc} ในสมการเชิงอนุพันธ์ \dot{V}_{dc} ของสมการที่ (4-2) ซึ่งรายละเอียดสามารถแสดงการพิสูจน์ได้ดังสมการที่ (4-7) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \left(I_{dcl} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{dc} V_{tr}} \right) V_{bus,d} \right) - \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc}} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dcl} - \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc} C_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{dc} V_{tr}} \right) V_{bus,d} \end{cases} \quad (4-7)$$

จากการกำหนดตัวแปรสถานะใหม่ของ \dot{I}_{dcl} ในสมการที่ (4-4) จะเห็นได้ว่ายังมีตัวแปร I_{dc} ปรากฏอยู่ในสมการ ดังนั้นการกำจัด I_{dc} ทำได้โดยแทน I_{dc} จากสมการที่ (4-3) ไปยังสมการที่ (4-4) จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ \dot{I}_{dcl} ดังสมการที่ (4-8)

$$\begin{cases} \dot{I}_{dcl} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \frac{V_{control}}{V_{tr}} V_{bus,d} - \frac{(r_{\mu} + r_L + r_c)}{L_{dc}} \left(I_{dcl} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{dc} V_{tr}} \right) V_{bus,d} \right) - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc}} \\ \dot{I}_{dcl} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \frac{V_{control}}{V_{tr}} V_{bus,d} - \frac{(r_{\mu} + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dcl} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}(r_{\mu} + r_L + r_c) K_{FB}}{\pi L_{dc}^2 V_{tr}} \cdot \frac{V_{bus,d}}{V_{dc}} \\ - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc}} \end{cases} \quad (4-8)$$

จากการกำจัดผลการหาอนุพันธ์ ในสมการที่ (4-2) จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพ แสดงได้ดังสมการที่ (4-9)

$$\begin{cases}
\dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
\dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}V_{tr}}{\pi C_{eq} V_{control}} I_{dcl} + \frac{18K_{FB}}{\pi^2 C_{eq} L_{dc} V_{control}} \frac{V_{bus,d}}{V_{dc}} \\
\dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\
\dot{I}_{dcl} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}V_{control}}{\pi L_{dc} V_{tr}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dcl} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}(r_\mu + r_L + r_c)K_{FB}}{\pi L_{dc}^2 V_{tr}} \frac{V_{bus,d}}{V_{dc}} \\
\quad + \frac{r_c P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc}} \\
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dcl} - \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc} C_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{dc} V_{tr}} \right) V_{bus,d}
\end{cases} \quad (4-9)$$

จากสมการที่ (4-9) จะเห็นได้ว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก มีค่าสัมประสิทธิ์ (K_{FB}) ปรากฏอยู่ในสมการ ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} ที่ทำให้ระบบที่ขาดเสถียรกลับมามีเสถียรภาพสามารถทำได้โดยอาศัยการทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นภายใต้ทฤษฎีค่าเจาะจง ดังนั้น สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับ 1 ได้ดังสมการที่ (4-10) ซึ่งค่าต่างๆ ในเมตริกซ์ A B C และ D จะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบ

$$\begin{cases}
\dot{\delta \mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\
\delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u}
\end{cases} \quad (4-10)$$

เมื่อ

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

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

รายละเอียดของ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ แสดงดังสมการที่ (4-11)

ดังนี้

$$a(5,3) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \frac{V_{control}}{V_{tr}} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{(r_\mu + r_L + r_c)K_{FB}}{L_{dc} V_{tr} V_{dc,o}}$$

$$a(5,6) = \left(\frac{1}{L_{dc}} + \frac{r_c P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc,o}^2} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{(r_\mu + r_L + r_c)K_{FB} V_{bus,d,o}}{L_{dc}^2 V_{tr} V_{dc,o}^2} \right)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & \frac{18K_{FB}}{\pi^2 C_{eq} L_{dc} V_{control} V_{dc,o}} & \frac{1}{V_{dc,o}} & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq} V_{control}} \frac{V_{tr}}{V_{dc,o}} \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a(5,3) & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} & a(5,6) \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc} C_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{tr} V_{dc,o}} \right) & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc,o}^2} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc} C_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{dc,o}^2 V_{tr}} \right) V_{bus,d,o} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

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

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

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = [0 \ 0]_{1 \times 2}$$
(4-11)

4.2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

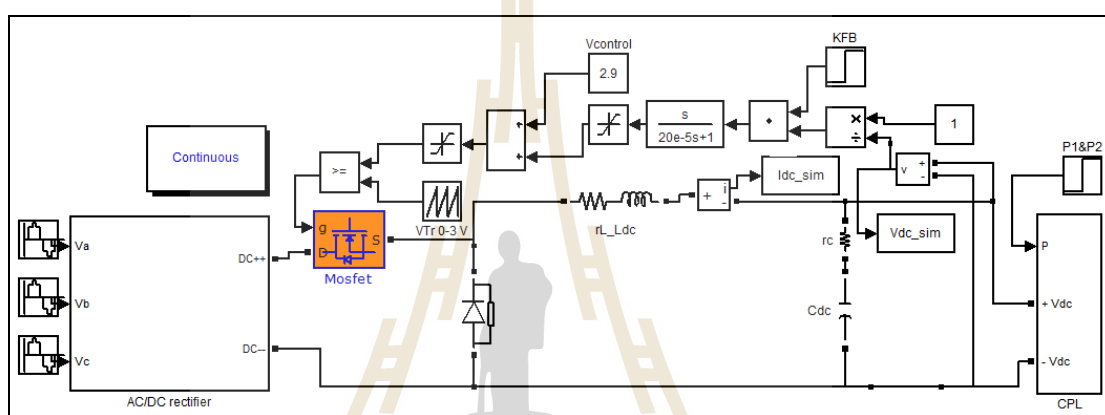
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4-10) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ของสัญญาณขนาดเล็กแบบชั่วคราวเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปที่ 4.2 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ที่ได้จากรูปที่ 4.4 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.2

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	50 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	2πx50 rad/s	ความถี่ของระบบ
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	0.21mH	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
r_L	0.57Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ

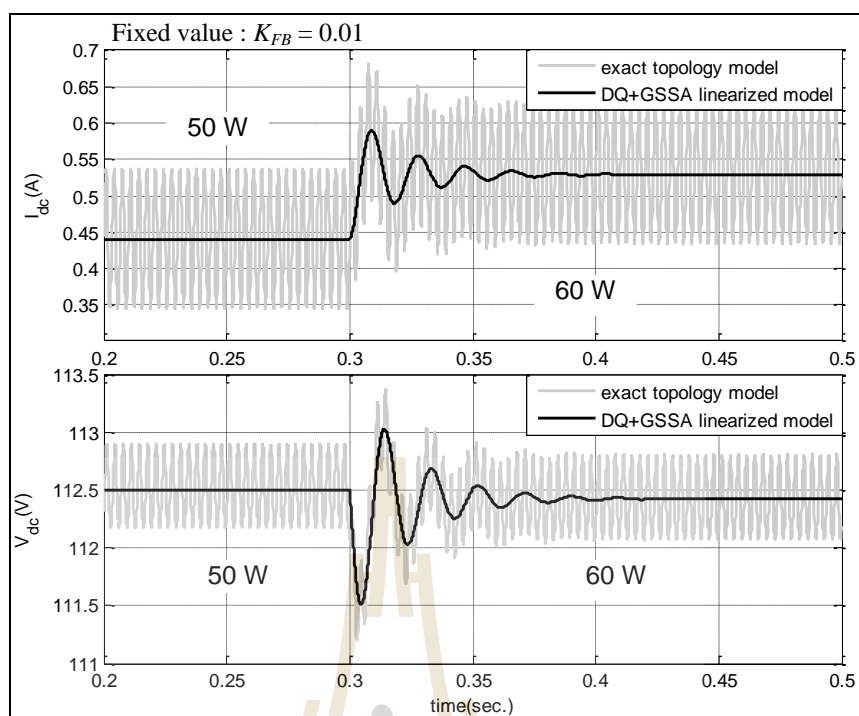
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.2 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
L_{dc} ($\Delta I_{dc} \leq 0.5$ A)	37.7mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
C_{dc} ($\Delta V_{dc} \leq 5$ V)	237.35 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
r_c	2.97 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ
$V_{control}$	2.9 V	แรงดันควบคุม
V_{tr}	3 V	แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม

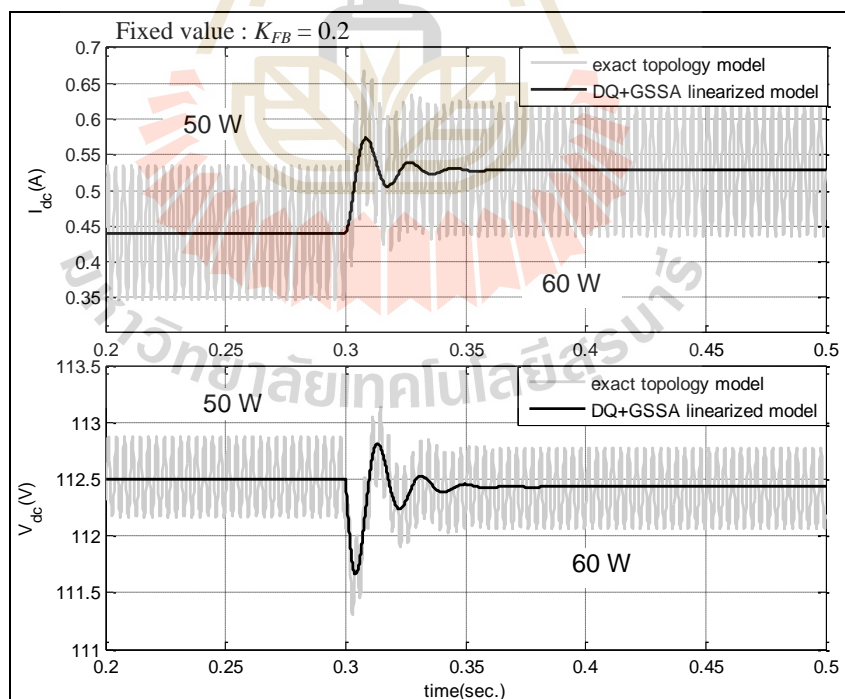


รูปที่ 4.4 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

จากรูปที่ 4.4 แสดงการต่อวงจรสำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วย ลูปยกเล็ก ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB เพื่อให้มีความ สอดคล้องกับระบบที่พิจารณาในรูปที่ 4.2 โดยผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.5 แสดงผลการ ตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) ที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุม คติจาก 50 W ไปเป็น 60 W ที่เวลา 0.3 วินาทีโดยกำหนดให้ $K_{FB} = 0$ และ รูปที่ 4.6 แสดงผลการ ตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) ที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุม คติจาก 50 W ไปเป็น 60 W ที่เวลา 0.3 วินาที โดยกำหนดให้ $K_{FB} = 0.2$



รูปที่ 4.5 ผลการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าจาก 50 W เป็น 60 W เมื่อ $K_{FB} = 0$

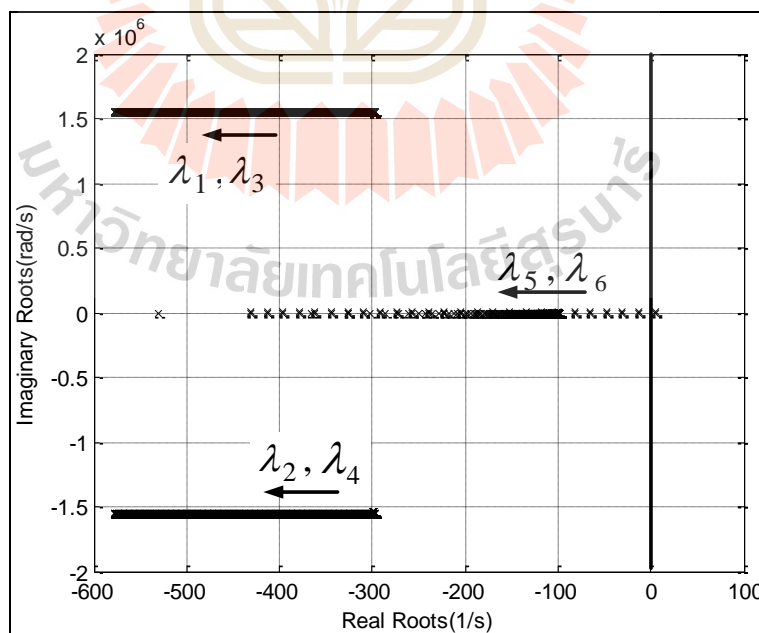


รูปที่ 4.6 ผลการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าจาก 50 W เป็น 60 W เมื่อ $K_{FB} = 0.2$

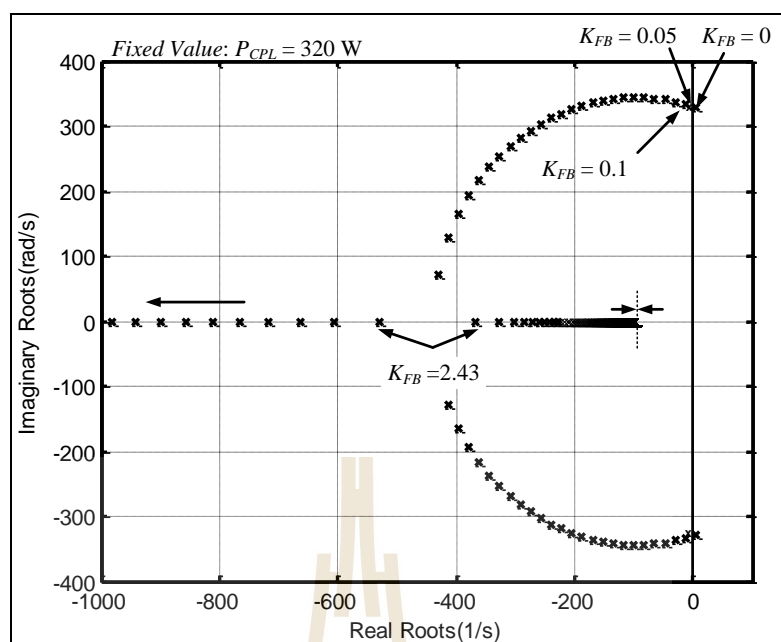
จากผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะคงตัว ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า การวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีคิ่ว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ถือเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำ จึงสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวไปวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยทฤษฎีค่าเจาะจง ซึ่งรายละเอียดจะได้รับนำเสนอในหัวข้อที่ 4.3

4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีลูยกเล็ก

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 4.2 สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูยกเล็ก จะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งได้รับการอธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.2 โดยการวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} ที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ จะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงนำมาใช้ในการพิจารณา ค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix) $A(x_0, u_0)$ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 ประกอบไปด้วย $\lambda_1 - \lambda_6$ โดยค่าเจาะจงที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบคือ λ_5 และ λ_6 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.8 โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} จาก 0 ไปจนถึง 50

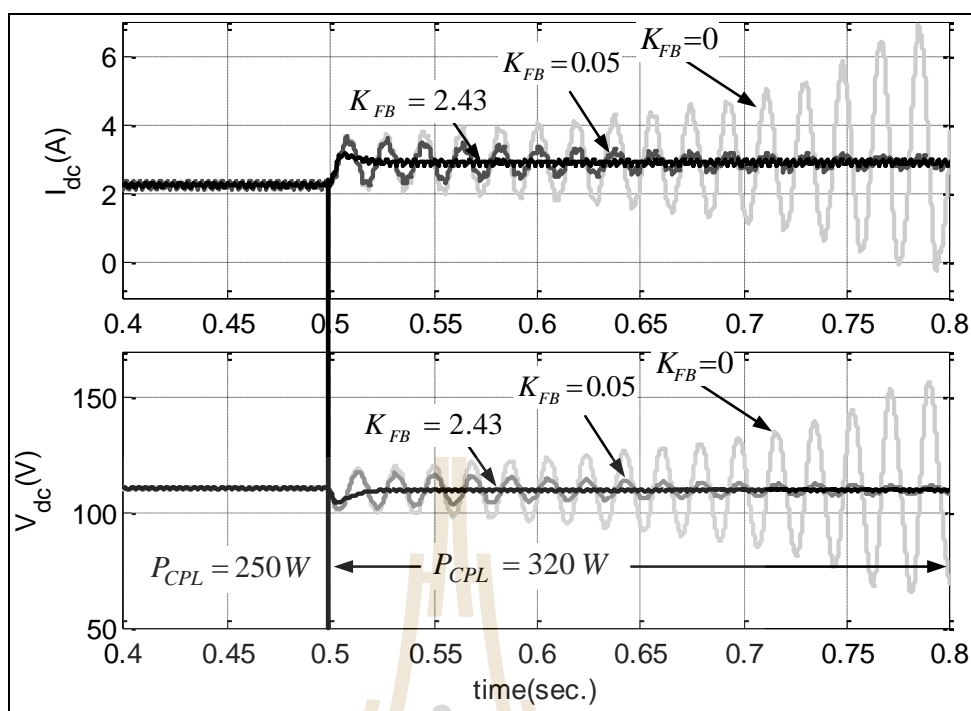


รูปที่ 4.7 ผลการคำนวณค่าเจาะจงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูยกเล็ก



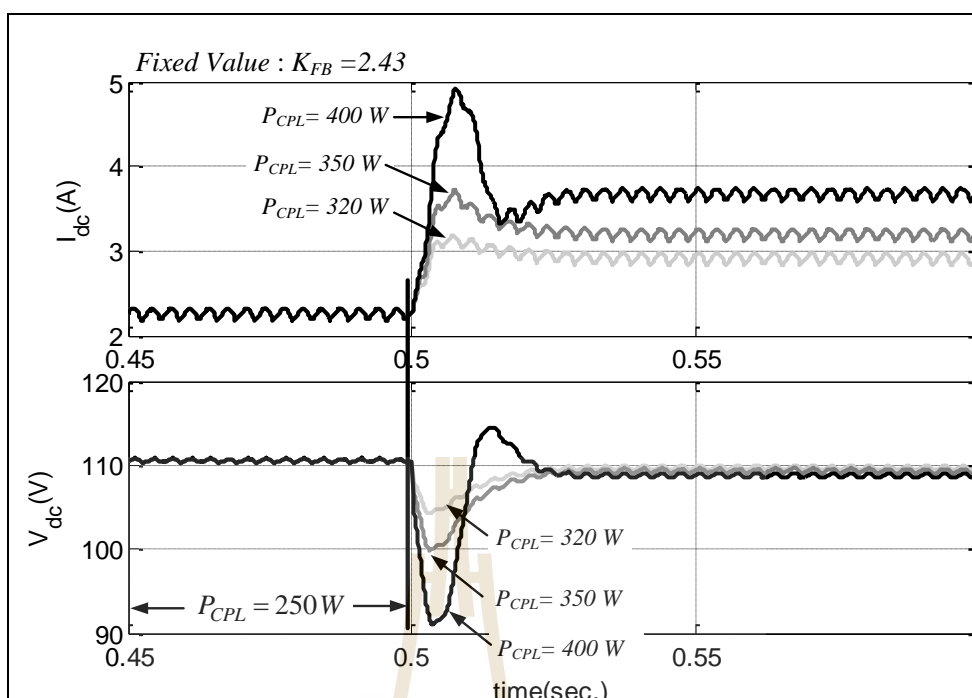
รูปที่ 4.8 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB}

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า เมื่อกำหนดโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 320 W และแรงดันควบคุมมีค่าเท่ากับ 2.9 ที่ค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0 (ยังไม่มี การชดเชยวิธีลูบยกเล็ก) ระบบจะขาดเสถียรภาพ และเมื่อ K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0.05 ค่าเจาะจงที่คำนวณได้จะเคลื่อนที่จากทางด้านขวาของระนาบเอสมาอยู่ทางด้านซ้าย ซึ่งหมายถึงระบบที่ขาดเสถียรภาพจะกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง เพียงแค่การเพิ่มค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0 มาเป็น 0.05 และผลของการเพิ่มค่า K_{FB} ที่สูงขึ้นจนมีค่าเท่ากับ 2.43 จะทำให้ขั้วเด่นของระบบเป็นค่าจริง 2 ค่า ซึ่งจะทำให้การสั่นไหวของรูปสัญญาณมีค่าน้อยมาก รวมถึงค่า K_{FB} ที่มีค่ามากกว่า 2.43 จะเห็นได้ว่าขั้วเด่นถูกแยกไปคนละทิศทาง โดยขั้วเด่นที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ไปยังทางฝั่งขวาของระนาบ s จะเริ่มมีค่าคงที่ค่าหนึ่งแต่ยังคงอยู่ในฝั่งซ้ายของระนาบ s ในขณะที่ขั้วเด่นอีกค่าหนึ่งจะมีการเคลื่อนที่ไปยังฝั่งขวาอย่างไร้ขอบเขตเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่า K_{FB} อย่างไรก็ตาม งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณาผลของการเพิ่มค่า K_{FB} ที่ทำให้ระบบเริ่มกลับมามีเสถียรภาพ โดยผลยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพภาพของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 4.2 จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 250 W ไปเป็น 320 W ที่เวลา 0.5 วินาที และกำหนดให้ K_{FB} มีค่า 0, 0.05 และ 2.43 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB}

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 250 W ไปเป็น 320 W โดยที่ค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) และผลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_{dc}) มีค่าที่สูงขึ้น แต่เมื่อค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0.05 จะทำให้การแกว่งของแรงดันและกระแสบัสดีซีมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพ และเมื่อเพิ่มค่า K_{FB} ไปเป็น 2.43 จะส่งผลทำให้ระบบมีการแกว่งของแรงดันและกระแสบัสดีซีที่น้อยมาก ซึ่งจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นและมีสมรรถนะที่ดีกว่า เมื่อ K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0.05 โดยผลการจำลองสถานการณ์นี้ สอดคล้องกับตำแหน่งค่าเจาะจงในรูปที่ 4.8 สำหรับรูปที่ 4.9 จะแสดงการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ K_{FB} มีค่าคงที่เท่ากับ 2.43 โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 250 W ไปเป็น 320 W, 350 W และ 400 W ที่เวลา 0.5 วินาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า P_{CPL}

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็กที่มีการคงที่ค่า K_{FB} ยังสามารถชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดย่านการทำงาน ในขณะที่โหลดมีระดับกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 320 W ไปเป็น 350 W และ 400 W ตามลำดับ เพียงแต่ยังมีผลของการสั่นไหวที่เพิ่มขึ้นไม่มากนัก ซึ่งก็คือ ขั้วเด่นของระบบมีการเคลื่อนไปทางด้านขวาของระนาบเอสเพียงเล็กน้อย แต่ถ้ามีการเพิ่มโหลดมากยิ่งขึ้น โดยที่ค่า K_{FB} มีค่าคงที่เท่ากับ 2.43 อาจจะทำให้ระบบมีโอกาสเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นถ้าต้องการทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานที่พิกัด จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} ประผันตามโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งเรียกว่า การสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัว โดยรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 4.4

4.4 การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็ก

การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จะอาศัยการประมาณค่าการคำนวณค่าอัตราขยาย K_{FB} ผ่านทางสมการที่ (4-9) เพื่อสามารถทำให้ค่าที่คำนวณได้ดังกล่าวแปรเปลี่ยนตามค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เนื่องจากการคำนวณค่าดังกล่าวที่ได้จากแบบจำลอง ถ้าไปโปรแกรมใช้งานจริงจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน จากสมการที่ (4-9) สมการเชิงอนุพันธ์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} คือ ตัวแปรสถานะ

$V_{bus,d}$, I_{dc1} และ V_{dc} โดยที่ $V_{bus,d}$ และ I_{dc1} จะไม่ถูกนำมาคำนวณ เนื่องจาก ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} ไม่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบ โดยรายละเอียดสามารถดูได้จากภาคผนวก ค. ดังนั้น จะได้สมการการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} ที่มีผลต่อเสถียรภาพ แสดงได้ดังสมการที่ (4-12)

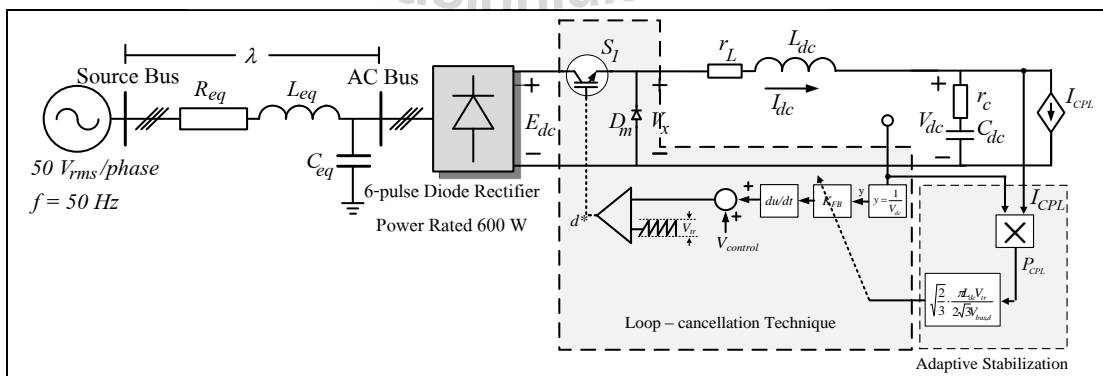
$$\begin{cases} \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc1} - \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc} C_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{dc} V_{tr}} \right) V_{bus,d} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc1} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3} V_{bus,d}}{\pi L_{dc} C_{dc} V_{tr}} \left(K_{FB} - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\pi L_{dc} V_{tr} P_{CPL}}{2\sqrt{3} V_{bus,d}} \right) \cdot \frac{1}{V_{dc}} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc1} + \frac{P_1}{V_{dc}} \end{cases} \quad (4-12)$$

$$\text{เมื่อกำหนดให้ } P_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3} V_{bus,d}}{\pi L_{dc} C_{dc} V_{tr}} \left(K_{FB} - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\pi L_{dc} V_{tr} P_{CPL}}{2\sqrt{3} V_{bus,d}} \right)$$

จากสมการที่ (4-12) จะเห็นได้ว่า การกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวออกไปจากระบบ ซึ่งก็คือ การทำให้ $P_1 = 0$ สามารถทำได้โดยกำหนดให้ K_{FB} มีค่าแสดงได้ดังสมการที่ (4-13)

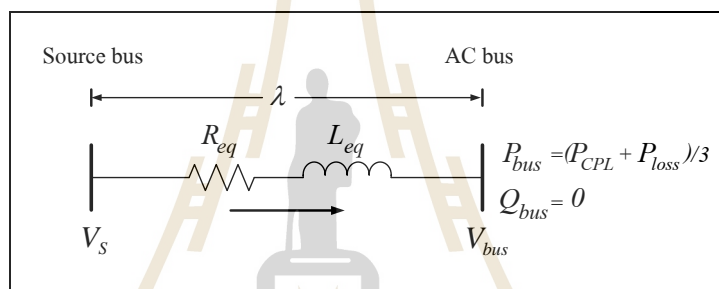
$$K_{FB} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\pi L_{dc} V_{tr} P_{CPL}}{2\sqrt{3} V_{bus,d}} \quad (4-13)$$

ดังนั้น การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กที่พิจารณาการปรับค่า K_{FB} จากสมการที่ (4-13) แสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็ก

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ จะประกอบไปด้วย โครงสร้างวิธีลูปลยกลีค และ โครงสร้างการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัว ที่ทำหน้าที่ปรับค่า K_{FB} ที่แปรเปลี่ยนไปตามโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ตามสมการที่ (4-13) โดยค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่า K_{FB} คือค่า P_{CPL} ซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลการคูณของกระแสทางด้านโหลด (I_{CPL}) และแรงดันบัลติดีซี (V_{dc}) ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถระบุได้จากการติดตั้งวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า ส่วนค่าพารามิเตอร์ L_{dc} , V_{tr} กำหนดให้มีค่าคงที่ตามตารางที่ (4.1) และการหาค่า $V_{bus,d}$ จะอาศัยการคำนวณโดยวิธีทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้าวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าด้านกระแสสลับ โดยจะพิจารณาวงจรสายส่งเพียงเฟสเดียวของระบบในรูปที่ 4.2 แผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งไม่พิจารณาตัวเก็บประจุของสายส่ง เนื่องจากมีค่าความจุน้อยมากจึงไม่นำมาวิเคราะห์



รูปที่ 4.12 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 4.12 สามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (4-14)

$$\begin{cases} \frac{V_s V_{bus}}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = P_{bus} \\ \frac{V_s V_{bus}}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (4-14)$$

เมื่อ V_{bus} คือ แรงดันเฟส (rms) ที่บัลติดีซี λ คือ มุมเฟสการเลื่อนระหว่าง V_s และ V_{bus} และ $Z \angle \gamma$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยที่กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ พิจารณาที่บัลติดีซีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะได้ดังสมการที่ (4-15)

$$\begin{cases} P_{bus} = (P_{CPL} + P_{loss})/3 \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (4-15)$$

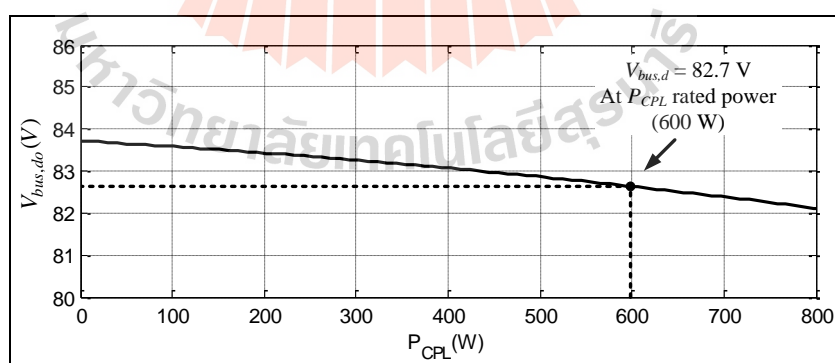
จากสมการที่ (4-14) และ (4-15) สามารถเขียนโปรแกรมการคำนวณค่า $V_{bus,o}$ และ λ_o ด้วยวิธีทางคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน-ราฟสัน ดูได้จากภาคผนวก ง. ซึ่งผลที่ได้จะนำมาคำนวณหา $E_{dc1,o}$ ของรูปวงจรสมมูลบนแกนคิกวในรูปแบบที่ 4.3 แสดงได้ดังสมการที่ (4-16)

$$E_{dc1,o} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{bus,o}) \quad (4-16)$$

พิจารณาจากรูปที่ 4.3 สามารถแสดงการคำนวณหา $V_{bus,do}$ ผ่าน $E_{dc1,o}$ แสดงได้ดังสมการที่ (4-17)

$$\begin{cases} V_{bus,do} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\pi}{2\sqrt{3}} E_{dc1,o} \\ V_{bus,do} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{bus,o}) \\ V_{bus,do} = \sqrt{3}V_{bus,o} \end{cases} \quad (4-17)$$

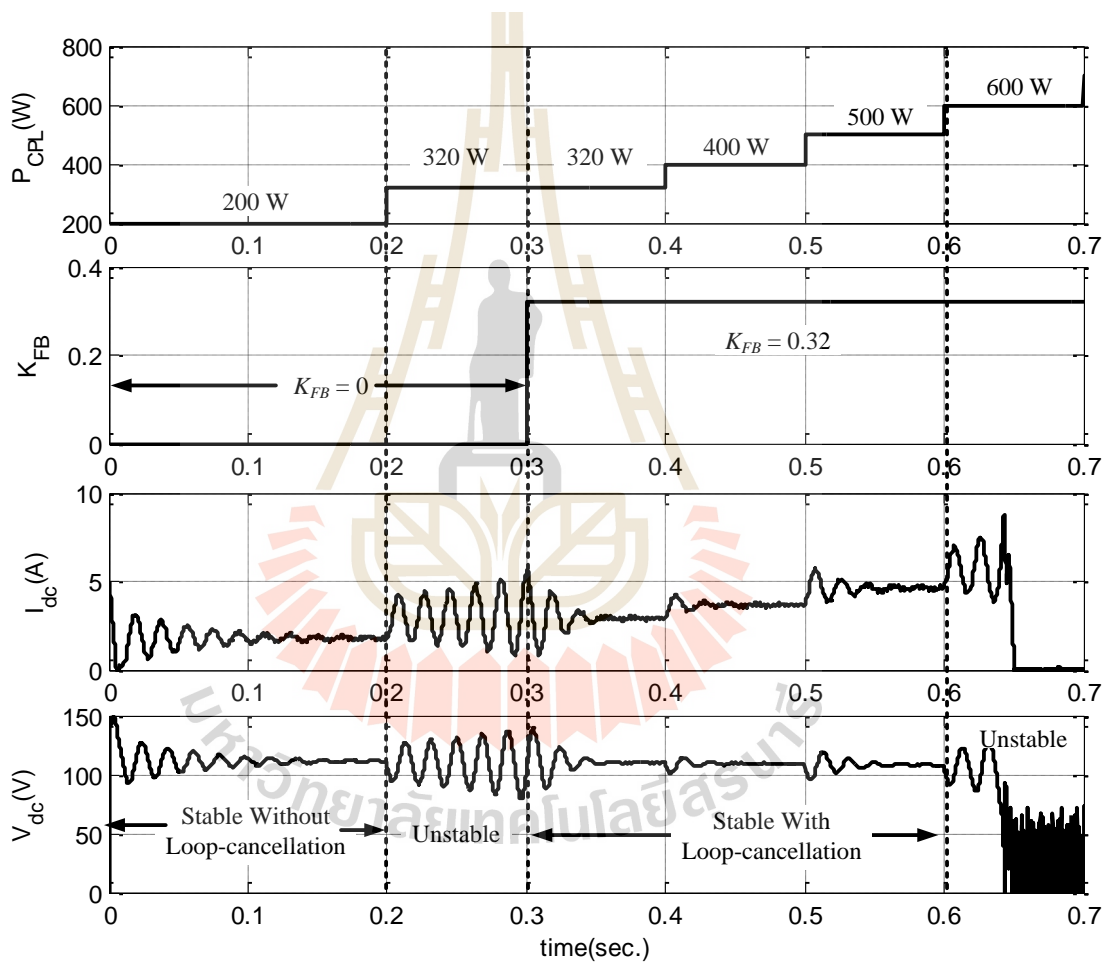
จากสมการที่ (4-17) สามารถคำนวณหา $V_{bus,do}$ เมื่อจุดการทำงานของระบบ (operating point) เปลี่ยนไป ซึ่งในที่นี้คือ P_{CPL} แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 0 W ไปเป็น 800 W



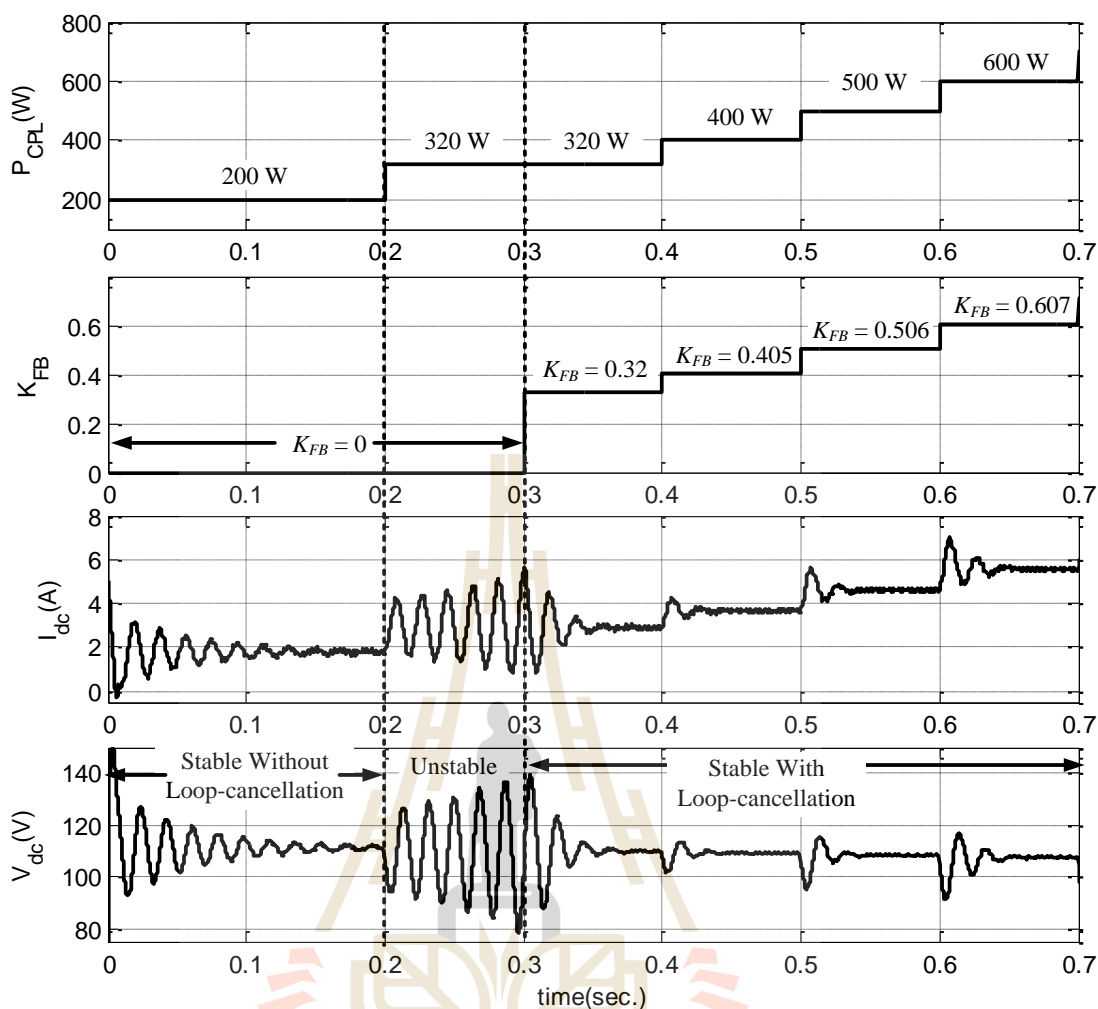
รูปที่ 4.13 การหา $V_{bus,d}$ ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลด P_{CPL}

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า การคำนวณหา $V_{bus,d}$ ที่แปรเปลี่ยนตาม K_{FB} ในสมการที่ (4-13) จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 82.7 V ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จากที่พิกัดของระบบ เนื่องจากค่า

$V_{bus,d}$ ที่มีค่าต่ำสุดจะส่งผลทำให้ค่า K_{FB} มีค่ามากที่สุด ซึ่งจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่มากยิ่งขึ้น สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปลงเล็กจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่มีการเปรียบเทียบระหว่างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า K_{FB} โดยมีค่าเท่ากับ 0.32 ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 จะแสดงผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการปรับตัวตามสมการที่ได้รับการพิสูจน์ไว้แล้ว โดยวิธีการจำลองสถานการณ์จะทำการปรับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 200 W ไปจนถึงที่พิกัดของระบบ ซึ่งในที่นี้คือ 600 W



รูปที่ 4.14 การขึ้นขึ้นผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า K_{FB}



รูปที่ 4.15 การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการคงที่ค่า K_{FB} มีค่าเท่า 0.32 จะทำระบบมีเสถียรภาพสูงสุดเพียง 500 W และจะกลับมาขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มเป็น 600 W ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการปรับค่า K_{FB} ที่แปรเปลี่ยนไปตามระดับของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีความจำเป็น เพื่อสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดย่านการงาน โดยดูได้จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 W ไปเป็น 320 W ที่เวลา 0.2 วินาที โดยกำหนดให้ $K_{FB} = 0$ (วงจรการสร้างเสถียรภาพไม่มีการทำงาน) จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ซึ่งดูได้จากการแกว่งของแรงดันบัลด์ซึและกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าสูงขึ้นไป หลังจากการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่เวลา 0.3 วินาที (วงจรการสร้างเสถียรภาพเริ่มการทำงาน) จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 320 W จนถึง 600 W จะทำให้ค่า K_{FB} มีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการที่ (4-13) ซึ่งทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน โดยไม่ประสบปัญหาจากการขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

4.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติด้วยวิธีลูบยกเล็ก พร้อมทั้งนำเสนอการวิเคราะห์ผลของค่าอัตราขยาย K_{FB} ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง ผลการศึกษาจากทางทฤษฎี และการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอในบทนี้สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรกลับมามีเสถียรภาพได้ และสามารถนำวิธีการลูบยกเล็กมาประยุกต์สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยการประมาณค่า K_{FB} ที่เหมาะสมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการอย่างง่าย จากผลการจำลองสถานการณ์ แสดงให้เห็นว่า วิธีลูบยกเล็กที่มีการปรับตัว สามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานในขณะที่จ่ายโหลดจนถึงที่พิกัดของแหล่งจ่าย เนื้อหาในบทที่ 5 จะเป็นการนำองค์ความรู้การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวมาประยุกต์ใช้กับระบบที่มีการต่อขนานของโหลด ซึ่งรายละเอียดจะได้รับนำเสนอต่อไป



บทที่ 5

การสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

5.1 บทนำ

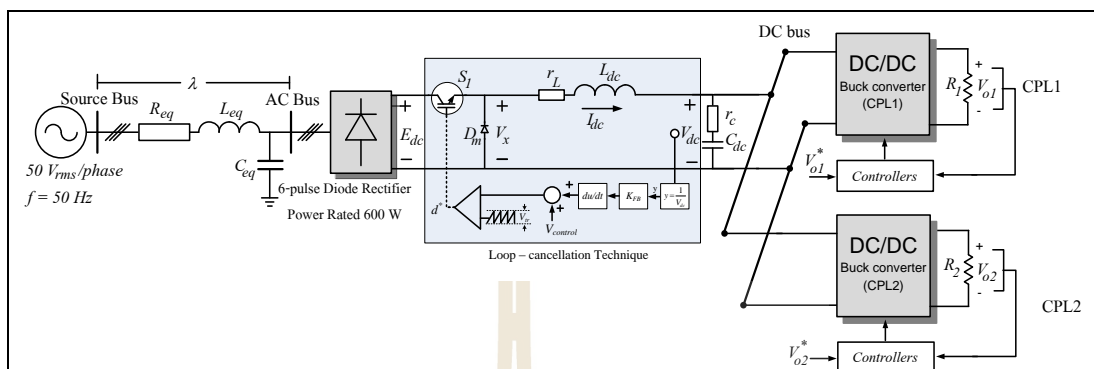
การเพิ่มจำนวนของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีผ่านวงจรกรอง จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการขาดเสถียรภาพนั้น จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมให้แยกลง ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้ จึงนำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกันด้วยวิธีลูบยกเล็ก ซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยได้อาศัยองค์ความรู้ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 มาเป็นแนวทางสำหรับการวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ รวมถึงการนำวิธีลูบยกเล็กมาประยุกต์สำหรับการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวของระบบที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จากผลการจำลองสถานการณ์ที่มีการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัว แสดงให้เห็นว่า ระบบมีเสถียรภาพภายใต้สถานการณ์ที่พิกัด และไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก

5.2.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 5.1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก และวงจรกรองสัญญาณดีซีที่เชื่อมต่อกับโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมทั้ง 2 ชุด ซึ่งโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม จะมีพฤติกรรม

เป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยที่สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมของโหลดตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ให้คงที่ได้ด้วยการปรับแรงดันจาก V_{o1}^* และ V_{o2}^* ตามลำดับ

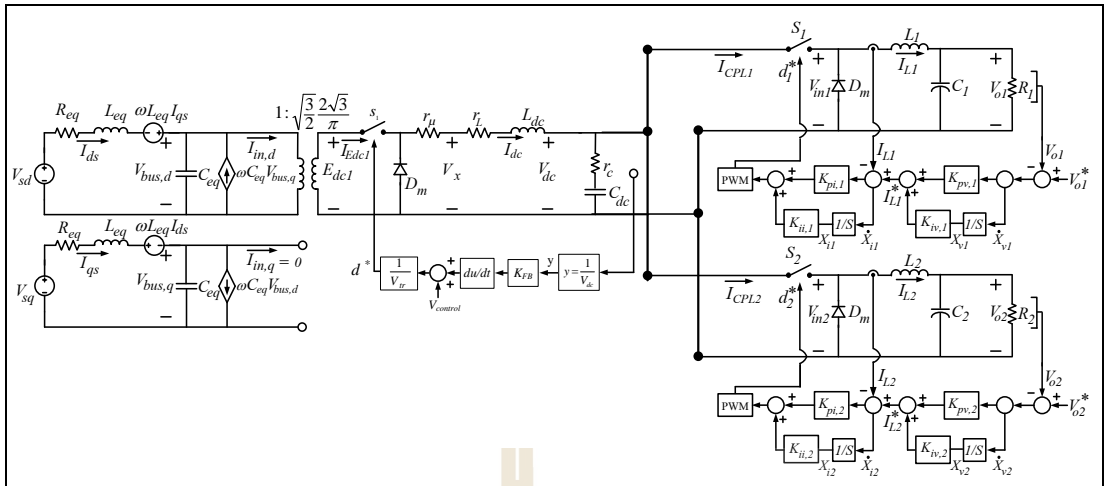


รูปที่ 5.1 ระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปลยกเลิก

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า โครงสร้างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปลยกเลิก ยังมีลักษณะที่สอดคล้องเช่นเดียวกันกับระบบที่พิจารณาในบทที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ข้อดีของวิธีการนี้คือ สามารถรองรับโหลดที่มีการควบคุมได้อย่างทั่วไปเช่น วงจรที่มีการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หรือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นต้น การวิเคราะห์ผลของค่าอัตราขยาย K_{FB} ที่ทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้งจึงมีความจำต่อการวิเคราะห์ผลของค่าดังกล่าวโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแสดงไว้ในหัวข้อที่ 5.2.2 ดังนี้

5.2.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีวิธีตีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

การวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} จะอาศัยการคำนวณผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์มาจากวิธีตีคว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีที่มีความถูกต้องแม่นยำ ดังที่ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 4 จากระบบที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 ได้อาศัยองค์ความรู้การพิสูจน์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ของบทที่ 3 และบทที่ 4 ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลอย่างง่ายที่อยู่บนแกนตีคว ดังรูปที่ 5.2 ดังนี้



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลอย่างง่ายที่อยู่บนแกนดีคิว

จากรูปที่ 5.2 สามารถหาสมการเชิงอนุพันธ์ของวงจรสมมูลที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว โดยที่ไม่พิจารณาโครงสร้างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปลยกลึก (Open-loop) แสดงได้ดังสมการที่ (5-1)

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

$$\begin{cases}
\dot{I}_{L1} = -\frac{K_{pi,1}}{L_1}V_{dc}I_{L1} - \frac{K_{pv,1}K_{pi,1}}{L_1}V_{dc}V_{o1} - \frac{V_{o1}}{L_1} + \frac{K_{iv,1}K_{pi,1}}{L_1}V_{dc}X_{v1} + \frac{K_{ii,1}}{L_1}V_{dc}X_{i1} + \frac{K_{pv,1}K_{pi,1}}{L_1}V_{dc}V_{o1}^* \\
\dot{V}_{o1} = \frac{1}{C_1}I_{L1} - \frac{1}{R_1C_1}V_{o1} \\
\dot{X}_{v1} = -V_{o1} + V_{o1}^* \\
\dot{X}_{i1} = -I_{L1} - K_{pv,1}V_{o1} + K_{iv,1}X_{v1} + K_{pv,1}V_{o1}^* \\
\dot{I}_{L2} = -\frac{K_{pi,2}}{L_2}V_{dc}I_{L2} - \frac{K_{pv,2}K_{pi,2}}{L_2}V_{dc}V_{o2} - \frac{V_{o2}}{L_2} + \frac{K_{iv,2}K_{pi,2}}{L_2}V_{dc}X_{v2} + \frac{K_{ii,2}}{L_2}V_{dc}X_{i2} + \frac{K_{pv,2}K_{pi,2}}{L_2}V_{dc}V_{o2}^* \\
\dot{V}_{o2} = \frac{1}{C_2}I_{L2} - \frac{1}{R_2C_2}V_{o2} \\
\dot{X}_{v2} = -V_{o2} + V_{o2}^* \\
\dot{X}_{i2} = -I_{L2} - K_{pv,2}V_{o2} + K_{iv,2}X_{v2} + K_{pv,2}V_{o2}^*
\end{cases} \quad (5-1)$$

พิจารณาโครงสร้างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบเล็กในรูปที่ 5.2 สามารถเขียนสมการ d^* แสดงดังสมการที่ (5-2) ดังนี้

$$d^* = \frac{1}{V_{tr}} \left(V_{control} + K_{FB} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{V_{dc}} \right) \right) \quad (5-2)$$

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาโครงสร้างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบเล็ก สามารถดำเนินการแทนค่า d^* ในสมการที่ (5-2) ไปยังสมการที่ (5-1) โดยที่พิจารณาการจลรูปสมการในลักษณะเช่นเดียวกันกับสมการที่ได้รับนำเสนอไว้ในบทที่ 4 ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดการพิสูจน์ไว้พอสมควร ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการพิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบเล็ก แสดงได้ดังสมการที่ (5-3)

$$\begin{cases}
\dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}}V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}}V_{sd} \\
\dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}}I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}}V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}}V_{sq} \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}}I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}V_{tr}}{\pi C_{eq}V_{control}}I_{dc1} + \frac{18K_{FB}}{\pi^2 C_{eq}L_{dc}V_{control}} \frac{V_{bus,d}}{V_{dc}} \\
\dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}}I_{qs}
\end{cases}$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}_{dc1} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \frac{V_{control}}{V_{tr}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc1} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}(r_\mu + r_L + r_c) K_{FB}}{\pi L_{dc}^2 V_{tr}} \frac{V_{bus,d}}{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_{dc1} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc} C_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{dc} V_{tr}} \right) V_{bus,d} + \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} \\
&\quad - \frac{K_{ii,1}}{C_{dc}} I_{L1} X_{i1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* + \frac{K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2}^2 + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2} V_{o2} \\
&\quad - \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2} X_{v2} - \frac{K_{ii,2}}{C_{dc}} I_{L2} X_{i2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \\
\dot{I}_{L1} &= -\frac{K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} I_{L1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} V_{o1} - \frac{V_{o1}}{L_1} + \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} X_{v1} + \frac{K_{ii,1}}{L_1} V_{dc} X_{i1} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} V_{o1}^* \\
\dot{V}_{o1} &= \frac{1}{C_1} I_{L1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1} \\
\dot{X}_{v1} &= -V_{o1} + V_{o1}^* \\
\dot{X}_{i1} &= -I_{L1} - K_{pv,1} V_{o1} + K_{iv,1} X_{v1} + K_{pv,1} V_{o1}^* \\
\dot{I}_{L2} &= -\frac{K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} I_{L2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} V_{o2} - \frac{V_{o2}}{L_2} + \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} X_{v2} + \frac{K_{ii,2}}{L_2} V_{dc} X_{i2} + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} V_{o2}^* \\
\dot{V}_{o2} &= \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{R_2 C_2} V_{o2} \\
\dot{X}_{v2} &= -V_{o2} + V_{o2}^* \\
\dot{X}_{i2} &= -I_{L2} - K_{pv,2} V_{o2} + K_{iv,2} X_{v2} + K_{pv,2} V_{o2}^*
\end{aligned} \tag{5-3}$$

จากสมการที่ (5-3) จะเห็นได้ว่า แบบจำลองของระบบจะปรากฏค่าอัตราขยาย K_{FB} ซึ่งการวิเคราะห์ผลของค่าดังกล่าวที่อาศัยทฤษฎีค่าเจาะจง จะต้องทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (5-3) ให้เป็นเชิงเส้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้อาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับ 1 ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำให้เป็นเชิงเส้น ได้ดังสมการที่ (5-4) ค่าต่าง ๆ ในเมตริกซ์ A B C และ D จะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบ

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

เมื่อ

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

รายละเอียดของ $A(x_o, u_o)$, $B(x_o, u_o)$, $C(x_o, u_o)$ และ $D(x_o, u_o)$ แสดงได้ดังนี้

$$A(x_o, u_o) = \begin{bmatrix} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & \frac{18K_{FB}}{\pi^2 C_{eq} L_{dc} V_{control} V_{dc,o}} & \frac{1}{V_{dc,o}} & a(3,5) & a(3,6) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a(5,3) & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} & a(5,6) & a(5,7) & -\frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{iv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{ii,1} I_{L1,o}}{L_{dc}} & a(5,11) & -\frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{ii,2} I_{L2,o}}{L_{dc}} \\ 0 & 0 & a(6,3) & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & a(6,6) & a(6,7) & \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{C_{dc}} & -\frac{K_{iv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{C_{dc}} & -\frac{K_{ii,1} I_{L1,o}}{C_{dc}} & a(6,11) & \frac{K_{pv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{C_{dc}} & -\frac{K_{iv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{C_{dc}} & -\frac{K_{ii,2} I_{L2,o}}{C_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & -\frac{K_{pi,1} V_{dc,o}}{L_1} & \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{dc,o} + 1}{L_1} & \frac{K_{vi,1} K_{pi,1} V_{dc,o}}{L_1} & \frac{K_{ii,1} V_{dc,o}}{L_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv,1} & -K_{iv,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(11,6) & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{pi,2} V_{dc,o}}{L_2} & -\frac{K_{pv,2} K_{pi,2} V_{dc,o} + 1}{L_2} & \frac{K_{vi,2} K_{pi,2} V_{dc,o}}{L_2} & \frac{K_{ii,2} V_{dc,o}}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv,2} & -K_{iv,2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$a(3,5) = -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} \frac{V_r}{V_{control}} \quad a(3,6) = -\frac{18K_{FB}}{\pi^2 C_{eq} L_{dc} V_{control}} \frac{V_{bus,d,o}}{V_{dc,o}^2} \quad a(5,3) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \frac{V_{control}}{V_r} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{(r_\mu + r_L + r_c) K_{FB}}{L_{dc}^2 V_r V_{dc,o}} \quad a(5,6) = \left(\frac{1}{L_{dc}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{(r_\mu + r_L + r_c) K_{FB} V_{bus,d,o}}{L_{dc}^2 V_r V_{dc,o}^2} \right)$$

$$a(5,7) = -\frac{2r_c K_{pi,1} I_{L1,o}}{L_{dc}} - \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{iv,1} K_{pi,1} X_{v1,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{ii,1} X_{il,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1,o}^*}{L_{dc}} \quad a(6,3) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc} C_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_r V_{dc,o}} \right) \quad a(6,6) = -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc} C_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{dc,o}^2 V_r} \right) V_{bus,d,o}$$

$$a(5,11) = -\frac{2r_c K_{pi,2} I_{L2,o}}{L_{dc}} - \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2} X_{v2,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{ii,2} X_{i2,o}}{L_{dc}} + \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}^*}{L_{dc}} \quad a(6,7) = \frac{2K_{pi,1} I_{L1,o}}{C_{dc}} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1,o}}{C_{dc}} - \frac{K_{iv,1} K_{pi,1} X_{v1,o}}{C_{dc}} - \frac{K_{ii,1} X_{i1,o}}{C_{dc}} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1,o}^*}{C_{dc}}$$

$$a(6,11) = \frac{2K_{pi,2} I_{L2,o}}{C_{dc}} + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}}{C_{dc}} - \frac{K_{iv,2} K_{pi,2} X_{v2,o}}{C_{dc}} - \frac{K_{ii,2} X_{i2,o}}{C_{dc}} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}^*}{C_{dc}} \quad a(7,6) = -\frac{K_{pi,1} I_{L1,o}}{L_1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1,o}}{L_1} + \frac{K_{iv,1} K_{pi,1} X_{v1,o}}{L_1} + \frac{K_{ii,1} X_{i1,o}}{L_1} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1,o}^*}{L_1}$$

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

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

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

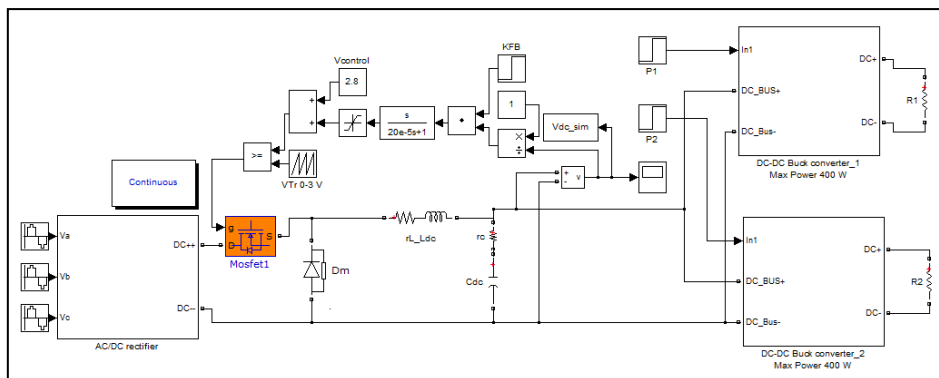
$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

5.2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-4) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ของสัญญาณขนาดเล็กแบบชั่วคราว เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การจำลองสถานการณ์ของระบบในรูปแบบที่ 5.1 โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB คุ้ได้จากรูปที่ 5.3 ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบ แสดงดังตารางที่ 5.1 พร้อมด้วยพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุม กระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัก์ สามารถแสดงได้ดังนี้ $K_{pv1} = K_{pv2} = 0.05$, $K_{iv1} = K_{iv2} = 50$, $K_{ii1} = K_{ii2} = 0.7728$, และ $K_{ii1} = K_{ii2} = 11040$ ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดการออกแบบสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากวิทยานิพนธ์ปริญญาโทของ เทพพนม โสภภาพิม (เทพพนม โสภภาพิม, 2554)

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 5.1

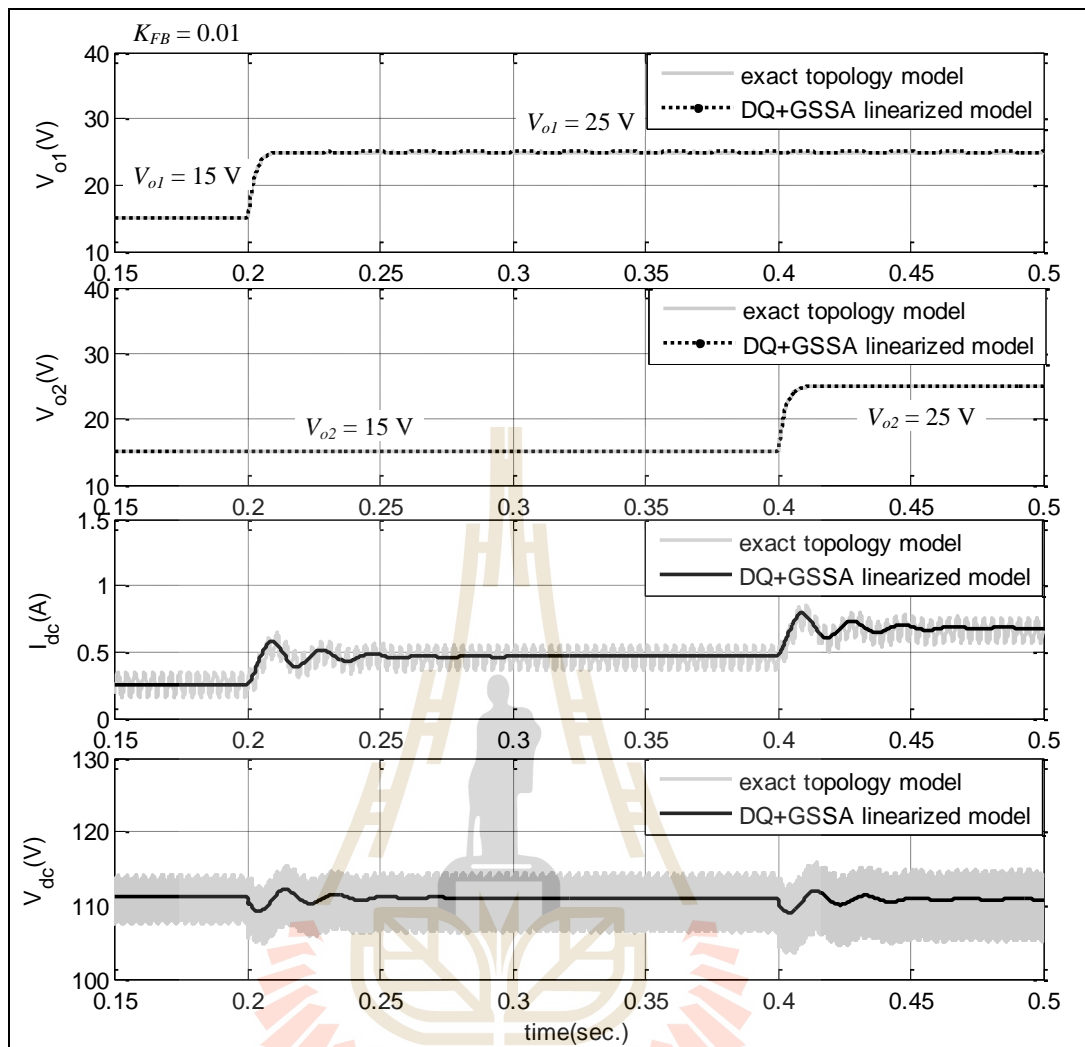
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	50 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของระบบ
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	0.21 mH	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
r_L	0.57 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
L_{dc} ($\Delta I_{dc} \leq 1.5$ A)	37.7 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	ความเหนี่ยวนำของโพลวงจรแปลงผันแบบบัก์
$C_1=C_2$ ($\Delta V_{dc} \leq 10$ mV)	125 μ F	ความจุไฟฟ้าของโพลวงจรแปลงผันแบบบัก์
$R_1=R_2$	20 Ω	ความต้านทานของโพลวงจรแปลงผันแบบบัก์
$V_{control}$	2.9 V	แรงดันควบคุม
V_{tr}	3 V	แรงดันเปรียบเทียบรูปสัญญาณสามเหลี่ยม



รูปที่ 5.3 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

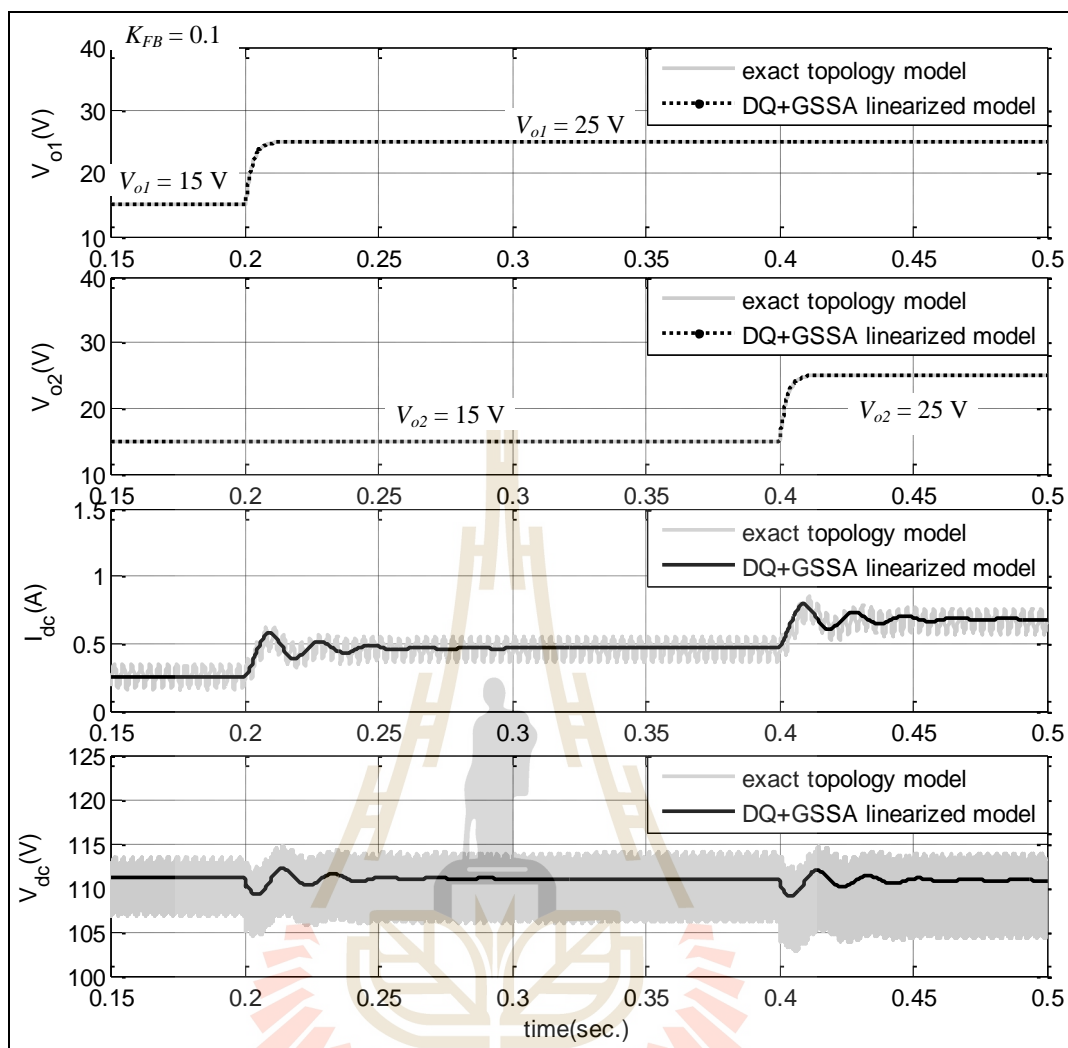
จากรูปที่ 5.3 แสดงการต่อวงจรโดยอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 โดยที่กำหนดให้วงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่ 1 (v_{o1}) มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตจาก 15 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 0.2 วินาที และวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่ 2 (v_{o2}) มีเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตจาก 15 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 0.4 วินาที โดยที่กำหนดให้ K_{FB} มีค่าคงที่เป็น 0.01 และรูปที่ 5.5 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตในลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 5.4 โดยที่กำหนดให้ค่า K_{FB} มีค่าคงที่เป็น 0.1

จากผลการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณในรูปที่ 5.4 และ 5.5 จะสังเกตเห็นได้ว่า ผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาโครงสร้างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก มีความถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวไปวิเคราะห์เสถียรภาพที่พิจารณาผลของค่า K_{FB} ซึ่งรายละเอียดจะได้รับนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.3



รูปที่ 5.4 ผลการตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.2

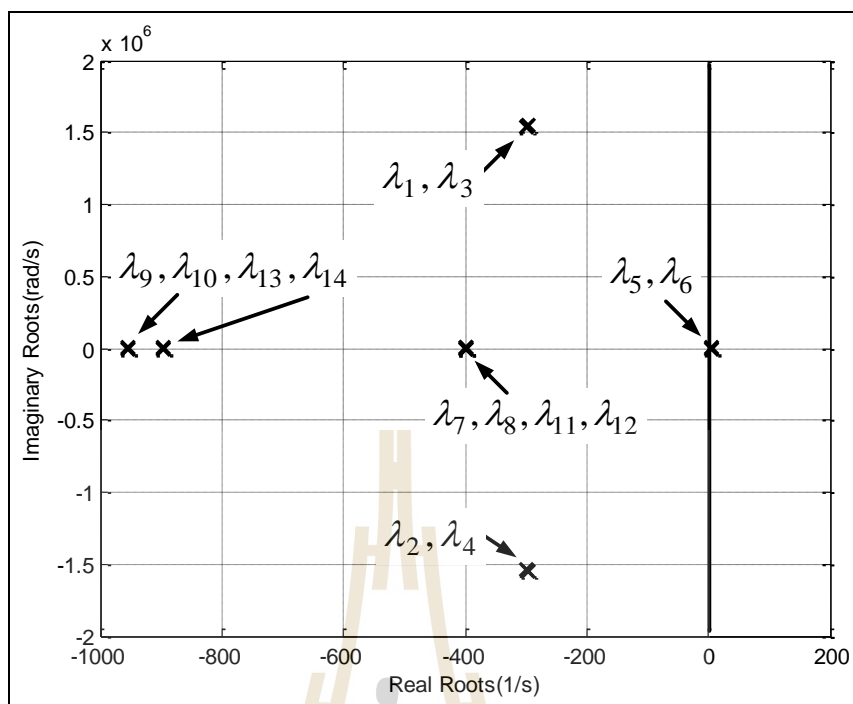
ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_{o1}^* และ V_{o2}^* โดยที่ $K_{FB} = 0.01$



รูปที่ 5.5 ผลการตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.2
ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_{o1} และ V_{o2} โดยที่ $K_{FB} = 0.1$

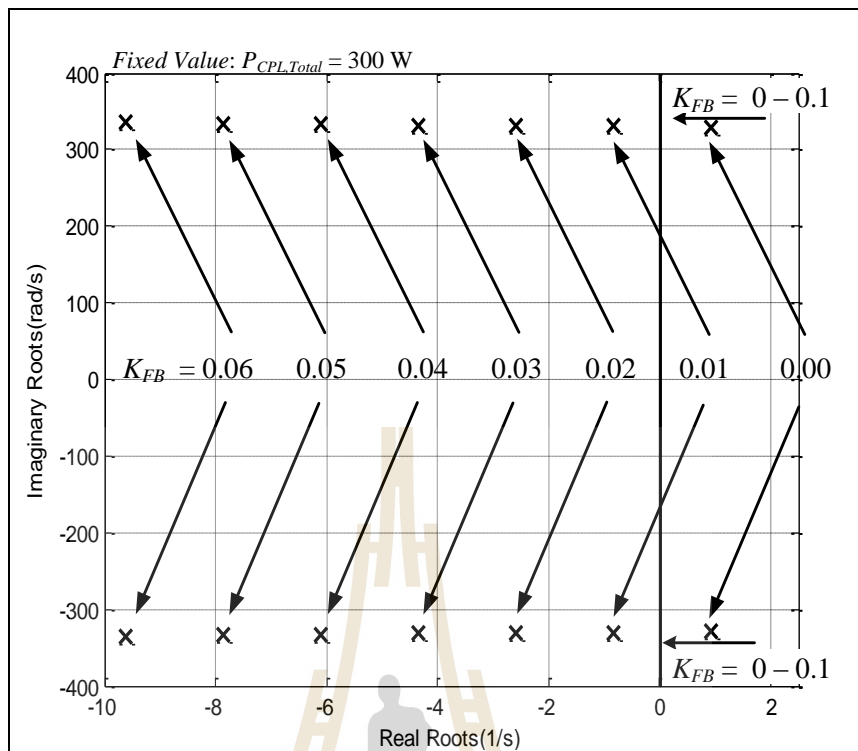
5.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพ

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก จะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งได้รับการอธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.2.2 โดยการวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} ที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ จะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงนำมาใช้ในการพิจารณา ค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix) $A(x_0, u_0)$ แสดงดังรูปที่ 5.6 ซึ่งประกอบไปด้วย $\lambda_1 - \lambda_4$ ดังนี้

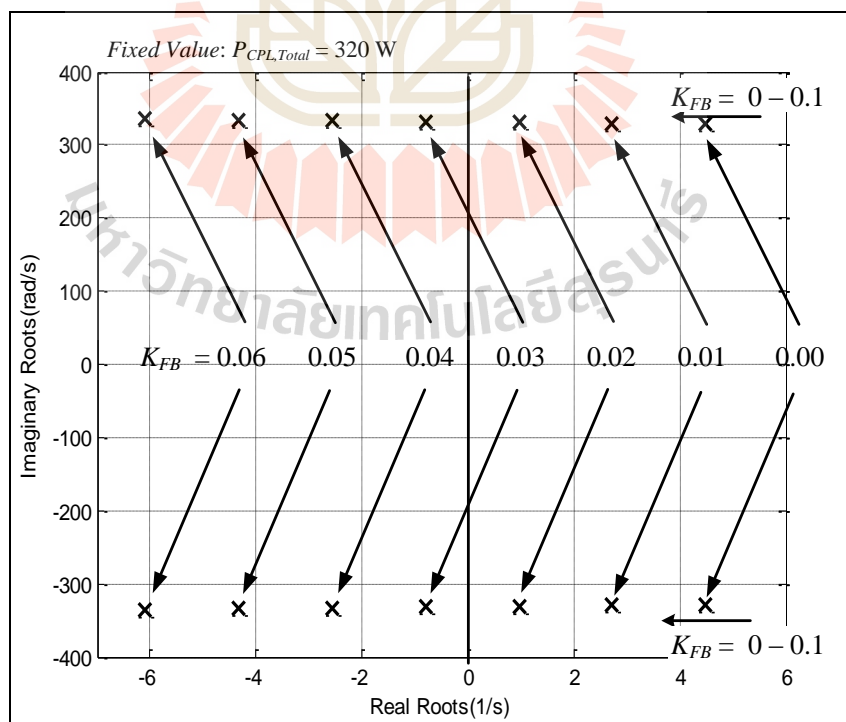


รูปที่ 5.6 ผลการคำนวณค่าเฉพาะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

จากรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก จะปรากฏค่าโพลของระบบอยู่ด้วยกับ 14 ค่า ซึ่งก็คือ $\lambda_1 - \lambda_{14}$ สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของเนื้อหาในบทที่ 5 นี้จะพิจารณาผลของการเพิ่มค่า K_{FB} ที่มีผลทำให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีขั้วเด่นที่บ่งบอกการมีเสถียรภาพของระบบได้ ซึ่งก็คือ λ_5 และ λ_6 ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเลือกพิจารณาขั้วเด่นที่มีต่อเสถียรภาพของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก โดยผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} จาก 0 ถึง 0.06 โดยที่กำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 1 มีค่า $V_{o1}^* = 70.71$ V (250W) และโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 2 มีค่า $V_{o2}^* = 31.62$ V (50W) และรูปที่ 5.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} จาก 0 ถึง 0.06 โดยที่กำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 1 มีค่า $V_{o1}^* = 70.71$ V (250W) และโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 2 มีค่า $V_{o2}^* = 37.41$ V (70W)

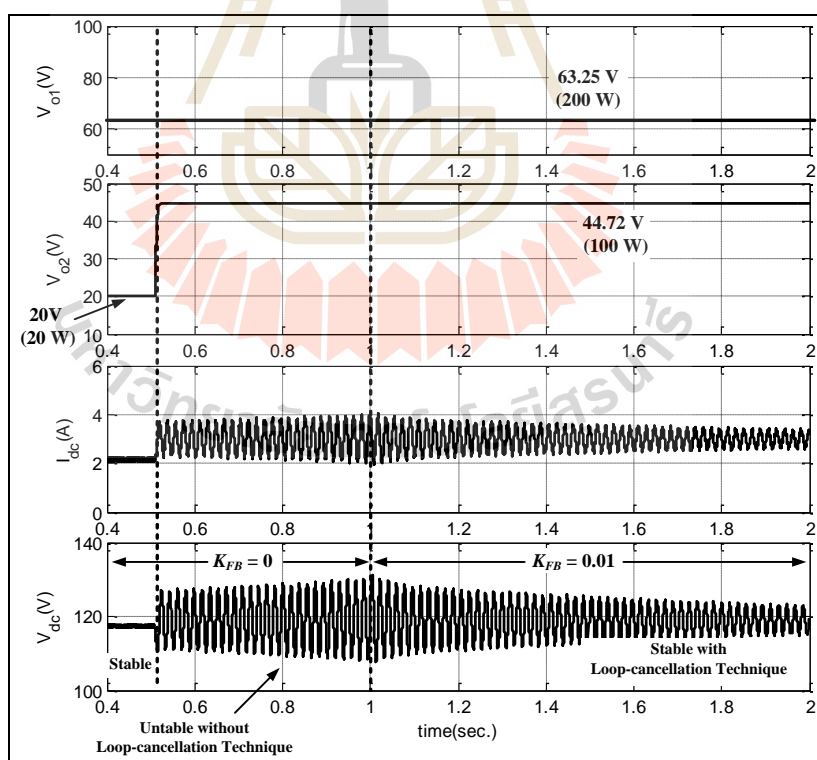


รูปที่ 5.7 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ เมื่อกำหนดให้ $P_{CPL} = 300\text{W}$

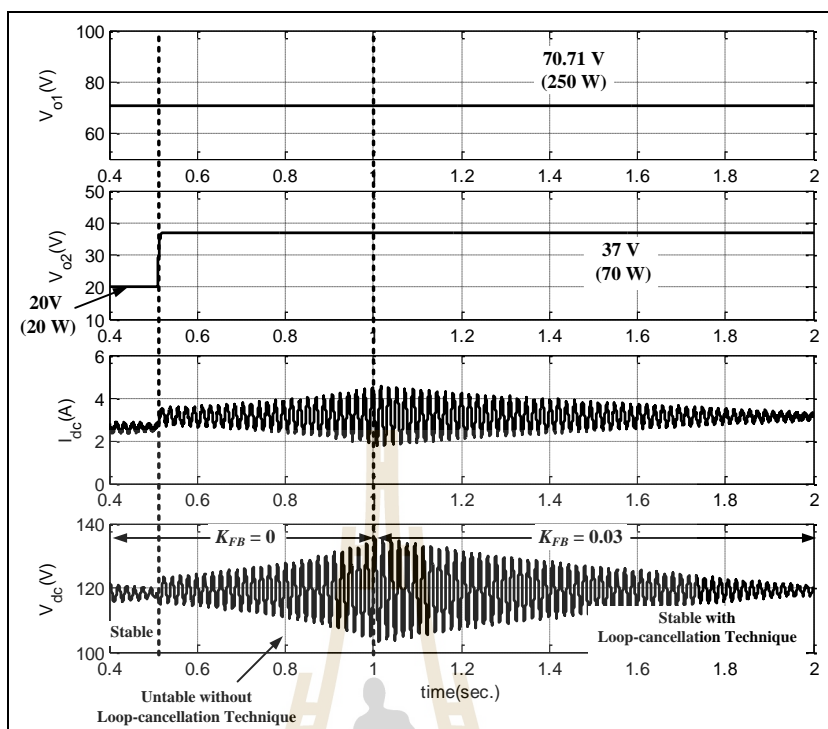


รูปที่ 5.8 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ เมื่อกำหนดให้ $P_{CPL} = 320\text{W}$

จากรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่า เมื่อกำหนดโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 300 W ที่ค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0 ระบบจะขาดเสถียรภาพ และเมื่อ K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0.01 ค่าเจาะจงที่คำนวณได้จะเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมายู่ที่ฝั่งซ้าย ซึ่งหมายถึงระบบที่ขาดเสถียรภาพจะกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง เพียงแค่การเพิ่มค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0 มาเป็น 0.01 และรูปที่ 5.8 มีการปรับเพิ่มโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 300 ไปเป็น 320 W จะเห็นได้ว่า เมื่อต้องการทำให้ระบบที่ขาดเสถียรสามารถกลับมาเสถียรได้อีกครั้ง จะต้องเพิ่มค่า K_{FB} จาก 0.01 มาเป็น 0.03 แสดงให้เห็นว่า ซึ่งการผลยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพภาพของระบบ จะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังเช่นเดียวกันกับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ แสดงดังรูปที่ 5.9 โดยที่มีการปรับตั้งค่าโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชูดที่ 1 มีค่าคงที่ 200 W และ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชูดที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 W ไปเป็น 100 W ที่เวลา 0.5 วินาที สำหรับ รูปที่ 5.10 ได้ปรับตั้งโหลดวงจรแปลงผันชูดที่ 1 มีค่าคงที่ 250W และ โหลดวงจรแปลงผันชูดที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 W ไปเป็น 70 W ที่เวลา 0.5 วินาที



รูปที่ 5.9 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
เมื่อกำหนดให้ผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามีค่า 300 W



รูปที่ 5.10 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
เมื่อกำหนดให้ผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามีค่า 320 W

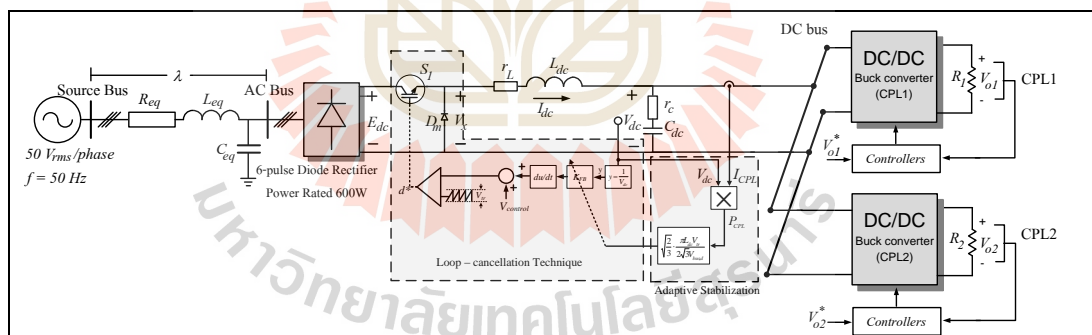
จากรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่า 300 W การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปลยกเลิกเมื่อ K_{FB} เท่ากับ 0.01 จะทำให้ระบบที่พิจารณากลับมามีเสถียรภาพได้ แต่ถ้าวัดระดับกำลังโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีผลรวมเป็น 320 W ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ค่า K_{FB} จะต้องมียค่ามากกว่า 0.01 ในที่นี้คือ 0.03 เพื่อให้ระบบสามารถกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง การวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} ที่เหมาะสมสำหรับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวค่าอื่น ๆ สามารถวิเคราะห์ได้ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (5-4) ดังที่ได้นำเสนอไว้แล้ว อย่างไรก็ตาม เพื่อลดความยุ่งยากต่อการนำแบบจำลองไปโปรแกรมใช้งานสำหรับการหาค่า K_{FB} ทางผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการคำนวณค่า K_{FB} ด้วยสมการอย่างง่ายที่ผ่านการประมาณค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยรายละเอียดจะได้รับนำเสนอในหัวข้อที่ 5.4

5.4 การสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวของระบบที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบ บั๊กซ์นานกัน

การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบั๊กซ์นานกัน จะทำการคำนวณหาค่า K_{FB} ที่ผ่านการประมาณค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะอาศัยหลักการ พิสูจน์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกันกับที่ได้รับนำเสนอไว้ในบทที่ 4 โดยแสดง ได้ดังสมการที่ (5-5)

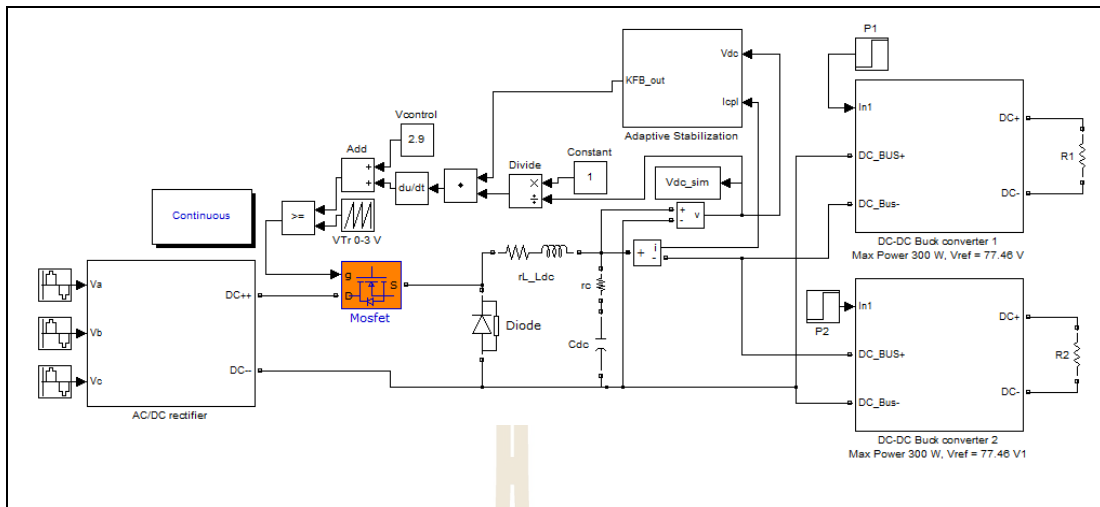
$$K_{FB} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\pi L_{dc} V_{tr} P_{CPL}}{2\sqrt{3} V_{bus,d}} \tag{5-5}$$

จากสมการที่ (5-5) จะสังเกตได้ว่า สมการที่ใช้ในการคำนวณการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็ก จะใช้สมการเช่นเดียวกันกับระบบที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าแบบอุดมคติ ดังนั้น ข้อดีของวิธีการนี้ สามารถรองรับ โหลดชนิดอื่น ๆ ได้อย่างทั่วไป ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้โหลดวงจรแปลงผันแบบบั๊กซ์ที่มีกรควบคุมแรงดันทางฝั่งขาออก 2 ชุดต่อแบบขนานกัน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวที่มีโหลดขนานกัน

จากรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่า การปรับค่า K_{FB} ที่แปรเปลี่ยนไปตามระดับกำลังโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จะอาศัยการประมาณค่าด้วยสมการอย่างง่ายดังแสดงไว้แล้วในสมการที่ (5-5) โดยที่ P_{CPL} อาศัยการวัดค่าแรงดันตกคร่อมบัสดีซี และ กระแสที่ไหลไปยังโหลด ซึ่งในสมการนี้ จะใช้พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณเช่นกันกับพารามิเตอร์ที่ได้รับนำเสนอไว้ในบทที่ 4 โดยการจำลองสถานการณ์ของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 5.11 แสดงได้ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 โครงสร้างการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB

จากรูปที่ 5.12 แสดงการต่อวงจรของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแบบปรับตัว โดยอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บน โปรแกรม MATLAB สำหรับการยืนยันผล ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งการจำลองจะเริ่มจากให้วงจร ลูปลีกไม่ทำงานตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 1.05 วินาที และเริ่มทำงานหลังจาก 1.05 เป็นต้นไป โดยการ ปรับตั้งค่าโหลดกำลังไฟฟ้าสามารถแสดงขึ้นตอนได้ดังต่อไปนี้

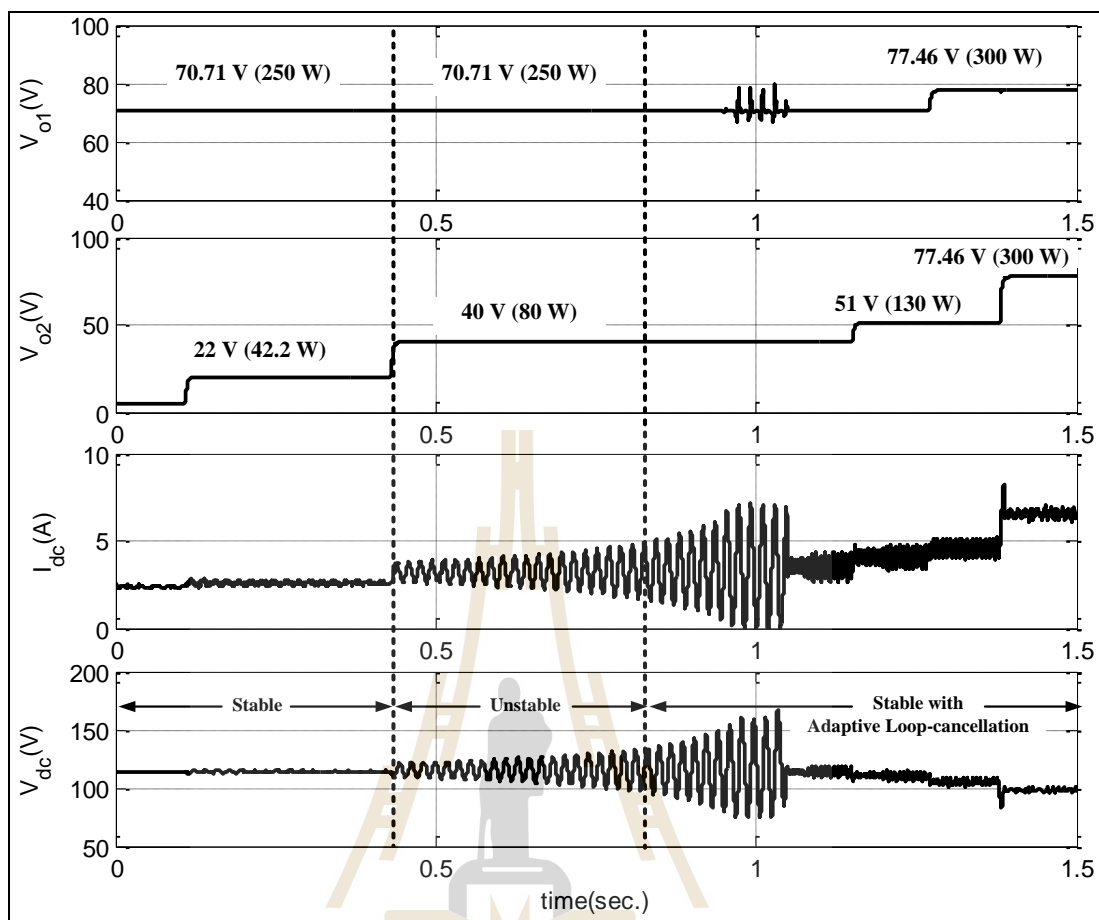
- **ขั้นที่ 1** ปรับตั้งโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 1 มีค่า 250 W และ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 2 มีการเปลี่ยนจาก 0 W เป็น 24.2 W ที่เวลา 0.11 วินาที โดยผลรวมของ โหลดกำลังไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 274.2 W

- **ขั้นที่ 2** ปรับตั้งโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 2 เปลี่ยนแปลงจาก 24.2 W ไปเป็น 80 W ที่เวลา 0.43 วินาที โดยผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 330 W

- **ขั้นที่ 3** ปรับตั้งโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 2 เปลี่ยนแปลงจาก 80 W ไปเป็น 130 W ที่ เวลา 1.151วินาที โดยผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 380 W

- **ขั้นที่ 4** ปรับตั้งโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 1 เปลี่ยนแปลงจาก 250 W ไปเป็น 300 W ที่เวลา 1.27 วินาที โดยผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 430 W

- **ขั้นที่ 5** ปรับตั้งโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 2 เปลี่ยนแปลงจาก 130 W ไปเป็น 300 W ที่ เวลา 1.38 วินาที โดยผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ 600 W



รูปที่ 5.13 การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 5.13 จะเห็นได้ว่า เมื่อโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่ง 2 ชุด มีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดระดับกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นรวมเป็น 600 W ซึ่งเป็นค่าที่พิกัดของแหล่งจ่ายที่สามารถจ่ายได้สูงสุด จะทำให้ระบบที่พิจารณาในรูปที่ 5.11 มีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน โดยดูได้จากการสั่นไหวของแรงดันบัคคีชี ที่ไม่มีผลของการกระเพื่อมของแรงดัน เมื่อเทียบกับการเพิ่มของค่าโหลดกำลังไฟฟ้า และไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบควบคุม แต่ถ้ระบบที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ไม่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก จะส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพที่ 320 W ดังที่นำเสนอไว้แล้วในบทที่ผ่านมา

5.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคกัซกันกัน พร้อมทั้งนำเสนอการวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการศึกษาจากทางทฤษฎี และการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่า วิธีการที่นำเสนอในบทนี้ สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรกลับมามีเสถียรภาพได้ และสามารถนำวิธีการลู่ยกเล็กมาประยุกต์สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยการประมาณค่า K_{FB} จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการอย่างง่าย จากผลการจำลองสถานการณ์ แสดงให้เห็นว่า วิธีลู่ยกเล็กที่มีการปรับตัว สามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดการทำงานในขณะที่จ่ายโหลดจนถึงที่พิกัดของแหล่งจ่าย อย่างไรก็ตาม การยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์อาจไม่เพียงพอต่อความน่าเชื่อถือมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะนำเสนอการสร้างชุดทดสอบระบบที่มีการการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัว ซึ่งรายละเอียดจะได้รับนำเสนอในบทที่ 6



บทที่ 6

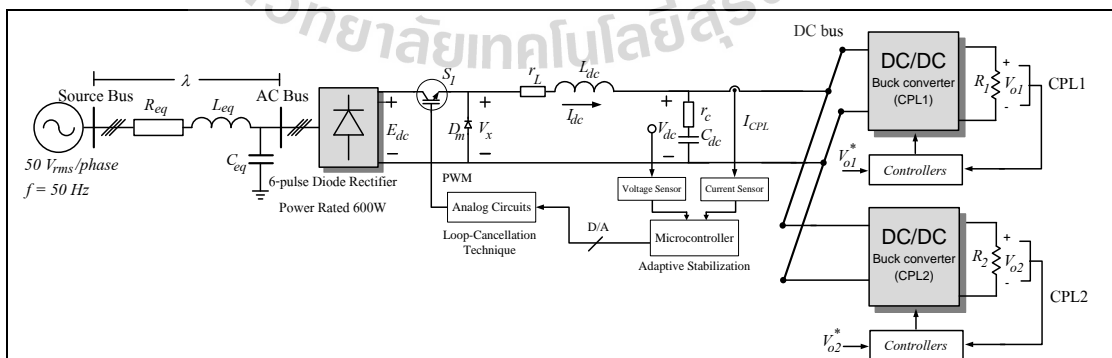
การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวสำหรับชุดทดสอบ

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็ก โดยการทดสอบดังกล่าวจะแบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีแรกเป็นการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า K_{FB} และกรณีที่ 2 แสดงการทดสอบการสร้างเสถียรภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} โดยระบบที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ขนานกัน การสร้างชุดทดสอบสำหรับการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวจะอธิบายในหัวข้อที่ 6.2 และผลการทดสอบเสถียรภาพสำหรับระบบที่พิจารณาของทั้ง 2 กรณีจะนำเสนอในหัวข้อที่ 6.3

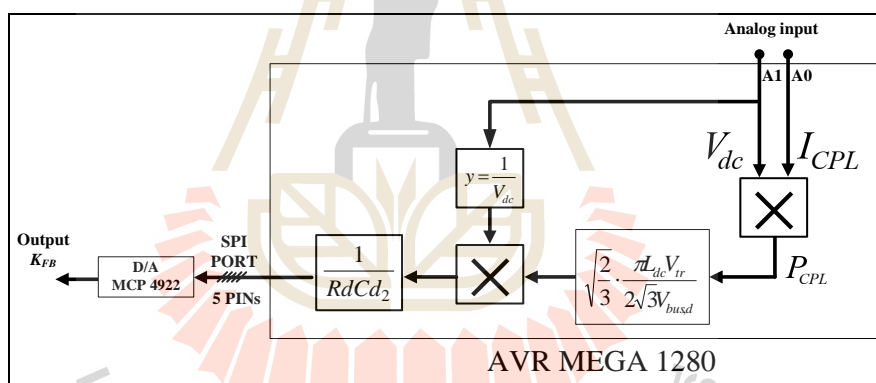
6.2 การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็ก

การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กสำหรับชุดทดสอบ คือ ระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 5.1 ในบทที่ 5 จากระบบดังกล่าว เมื่อนำมาเขียนแสดงใหม่สำหรับการใช้ในการอธิบายการสร้างชุดทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.1



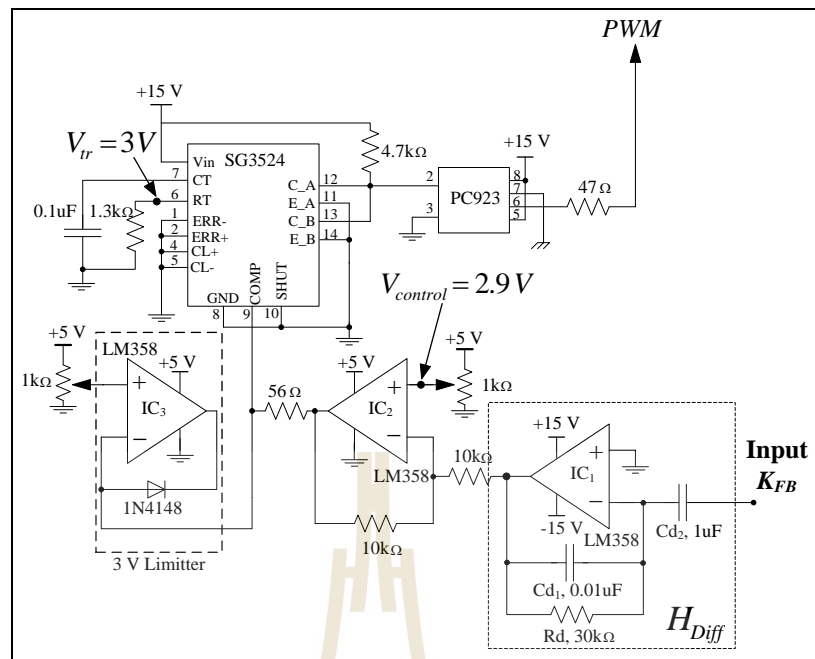
รูปที่ 6.1 ระบบที่พิจารณาการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัว

จากรูปที่ 6.1 แสดงให้เห็นว่า การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กสำหรับระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะมีกระบวนการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรทางดิจิทัลและวงจรทางแอนะล็อก ทั้งนี้การนำทั้ง 2 วงจรมาใช้ร่วมกันเนื่องจาก การสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็กจะมีกระบวนการหาอนุพันธ์ของสัญญาณที่อาศัยความเร็วในการคำนวณสูง โดยถ้าใช้วงจรทางดิจิทัลซึ่งมีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR จะทำให้การสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็กไม่สามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการนำวงจรทางแอนะล็อกมาใช้ร่วมกันกับวงจรทางดิจิทัล โดยวงจรทางดิจิทัลจะมีหน้าที่ในการคำนวณหาค่า K_{FB} ผ่านทางสมการที่ได้รับการพิสูจน์ไว้ในบทที่ 4 โดยอาศัยการอ่านค่าเซนเซอร์แรงดันเอาต์พุตบัสดีซีและเซนเซอร์กระแสที่ไหลไปยังโหลด และส่งค่าดังกล่าวไปยังวงจรทางแอนะล็อก โดยโครงสร้างทางดิจิทัลสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASYMEGA1280 เนื่องจากผู้วิจัยมีความถนัดและเชี่ยวชาญเป็นอย่างดี ซึ่งรายละเอียดการคำนวณภายในบอร์ดดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แผนภาพการคำนวณหาค่า K_{FB} ภายในบอร์ด AVR เบอร์ 1280

จากรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่า วงจรทางดิจิทัลจะประกอบไปด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกที่ใช้ไอซีเบอร์ MCP4922 โดยที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีหน้าที่อ่านค่าแรงดันเอาต์พุตบัสดีซีที่พิน(A1) และอ่านค่ากระแสโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่พิน(A0) จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการของวิธีลูบยกเล็กด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ และส่งค่าผ่านพอร์ต SPI (มอดูลีสื่อสารแบบอนุกรม) ไปยังไอซีเบอร์ MCP4922 เพื่อแปลงสัญญาณดิจิทัลไปเป็นแอนะล็อก และนำค่าดังกล่าวส่งไปยังวงจรทางแอนะล็อกซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 การต่อวงจรแบบแอนะล็อก

จากรูปที่ 6.3 แสดงให้เห็นว่า วงจรทางแอนะล็อกของวิธีลูบยกเล็กประกอบไปด้วย ไอซีเบอร์ LM358 ทำหน้าที่เป็นวงจรอนุพันธ์ วงจรรวมสัญญาณ และวงจรจำกัดสัญญาณ ไอซีเบอร์ SG3524 ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ PWM และไอซีเบอร์ PC923 เป็นวงจรแยกกราวด์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่ำและแรงดันไฟฟ้าสูง สำหรับไอซีเบอร์ LM358 แทนด้วย IC₁, IC₂ และ IC₃ โดยไอซีแต่ละตัวสามารถแสดงการทำงานของวงจรได้ดังต่อไปนี้

- IC₁ เป็นโครงสร้างการหาอนุพันธ์ของสัญญาณร่วมกับวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่านซึ่งมีองค์ประกอบของวงจรเป็นตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่าน โอน แสดงได้สมการที่ (6-1)

$$H_{Diff} = \frac{RdCd_2.s}{1 + RdCd_1s} \quad (6-1)$$

โดยที่ $f(LPF) = \frac{1}{Rd.Cd_1} \text{ rad/s}$

การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่านสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีการของ Rahimi and al et. (Rahimi, Williamson, and Emadi, 2010) ซึ่งสามารถออกแบบค่า Cd_1 และค่า Rd_1 ของวงจรได้จากสมการที่ (6-2) ดังนี้

$$f(LPF) = 10 \times 2\pi \times f_{resonance} \quad (6-2)$$

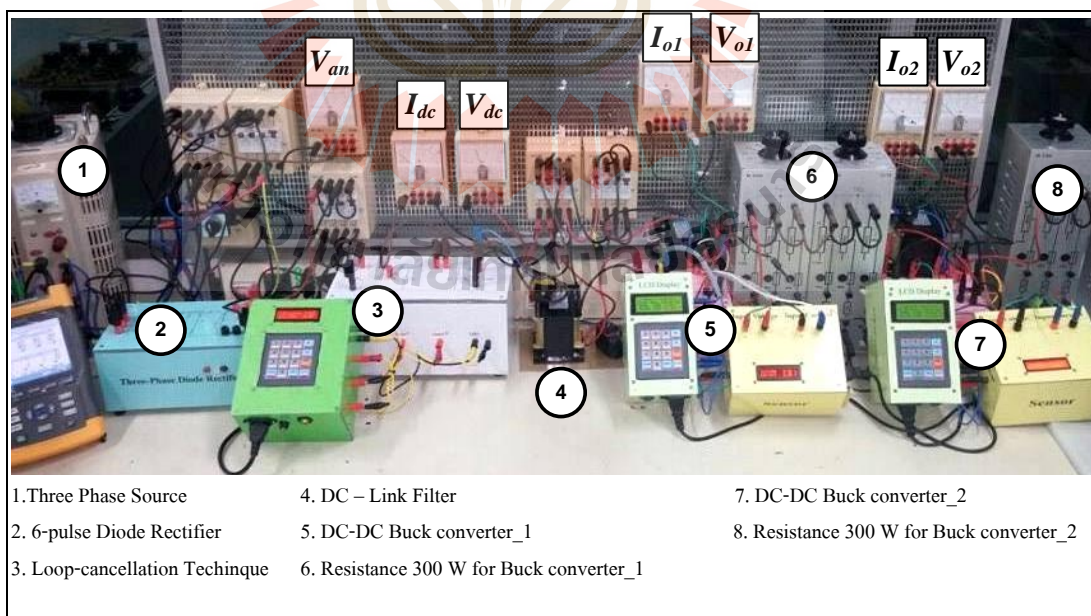
โดยที่ $f_{resonance}$ คือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่คำนวณได้จาก L_{dc} และ C_{dc} มีค่าเท่ากับ 53.21 Hz

จากสมการที่ (6-2) สามารถคำนวณหาค่า $f(LPF)$ ได้มีค่าเท่ากับ 3343.3 rad/s ซึ่งการออกแบบหาค่า Cd_1 และค่า Rd_1 ทำได้โดยกำหนดให้ Cd_1 มีค่าคงที่เท่ากับ 0.01 μF ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่า Rd_1 ได้มีค่าเท่ากับ 30k Ω ในส่วนอัตราขยายที่เกิดจากวงจรการหาอนุพันธ์นั้นคือ $RdCd_2$ จะกำหนดให้ Cd_2 มีค่าเท่ากับ 1 μF นั่นคือ อัตราขยายของวงจรการหาอนุพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.3 โดยผลของอัตราขยายดังกล่าวสามารถละทิ้งด้วยการแทนค่า $RdCd_2$ เป็นตัวหารไว้ในการคำนวณหาค่า K_{FB} ดังที่ได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 6.2

-IC₂ เป็นวงจรรวมสัญญาณที่ได้จาก IC₁ เพื่อนำมาบวกกับแรงดันควบคุม ($V_{control}$) ที่มีการปรับตั้งค่าไว้ที่ 2.9 V และส่งค่าไปยัง IC₃

-IC₃ ทำหน้าที่จำกัดสัญญาณจาก IC₂ ไม่ให้มีค่าเกิน 3 V ในการส่งค่าไปยังไอซีเบอร์ SG3524 สำหรับการสร้างสัญญาณ PWM

สำหรับผลการดำเนินการสร้างชุดทดสอบในรูปที่ 6.1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.4 จากรูปดังกล่าวการดำเนินการสร้างชุดทดสอบได้ใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 6 ชุดอุปกรณ์หลัก ดังนี้



รูปที่ 6.4 ภาพการต่อวงจรชุดทดสอบ

6.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างระบบการสร้างเสถียรภาพแบบปรับค่าด้วยวิธีปฏิกลิก

อุปกรณ์ที่ 1 หม้อแปลงสามเฟส(Three-phase transformer) แบบปรับค่าได้ รุ่น IBC-VR3000-3 ของบริษัทผู้ผลิต Takamura ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต 415 V และด้านเอาต์พุตสามารถปรับใช้งานได้ในช่วง 0 ถึง 450 V โดยหม้อแปลงดังกล่าว จะถูกใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสสำหรับระบบที่พิจารณาที่มีแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกับ $50V_{rms}$ ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 Hz สำหรับรูปร่างของหม้อแปลงดังกล่าวสามารถดูได้รูปที่ 6.5 ดังนี้



รูปที่ 6.5 หม้อแปลงสามเฟสแบบปรับค่าได้ รุ่น IBC-VR3000-3

อุปกรณ์ที่ 2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ไดโอด (Three-phase rectifier) รุ่น VS-36MT160 ของบริษัท Vishay โดยมีพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 35 A และพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1600 V ทำหน้าที่เป็นโหลดวงจรเรียงกระแสของระบบที่พิจารณา โดยรูปร่างของอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.6 ดังนี้



รูปที่ 6.6 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ไดโอดรุ่น VS-26MT160

อุปกรณ์ที่ 3 ชุดวงจรการสร้างเสถียรภาพแบบปรับได้ด้วยวิธีลูบยกเล็ก ซึ่งภายในประกอบไปด้วย วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่เชื่อมต่อด้วยจอแสดงผล LCD และคีย์สวิตช์เมตริกซ์ (KEYPAD)แบบ 4X4 บอร์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกรุ่น ET-MINI MCP4922 วงจรการสวิตช์ใช้เป็น MOSFET เบอร์ IRFP250N ไดโอดกำลังเบอร์ RURG8060 และวงจรลูบยกเล็ก รวมถึงวงจรสร้างสัญญาณ PWM แบบแอนะล็อก โดยรูปร่างชุดวงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็กแสดงได้ดังรูปที่ 6.7

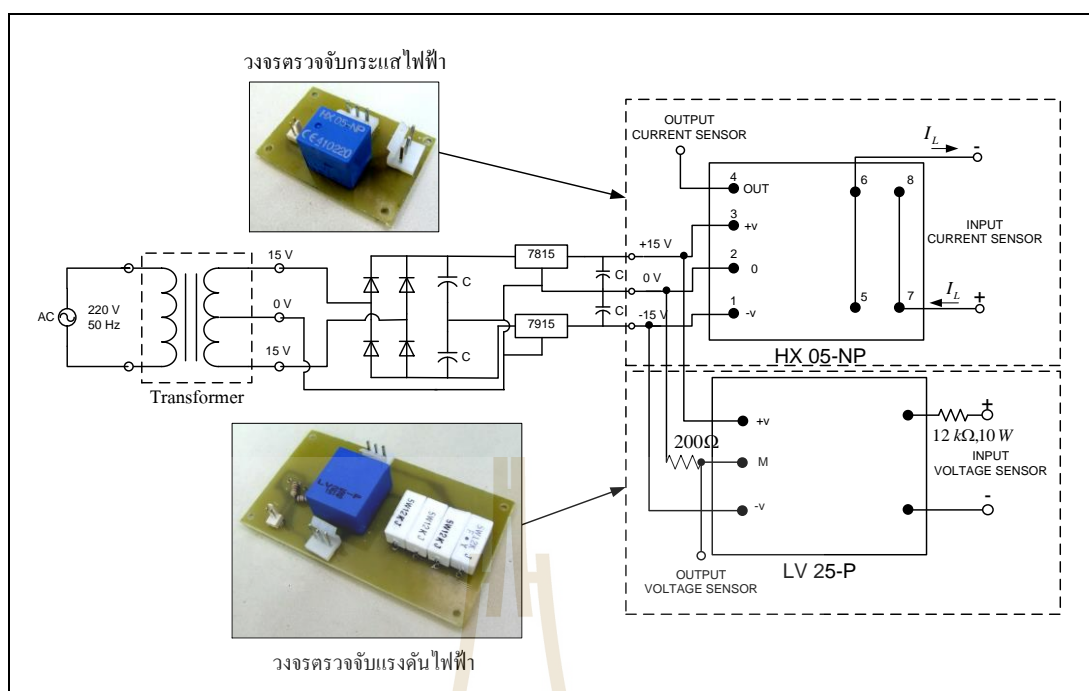


รูปที่ 6.7 วงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก

จากรูปที่ 6.7 สังเกตได้ว่า ชุดทดสอบการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก จะมีการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรทางดิจิทัล และวงจรแอนะล็อก ตามที่ได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.2 ซึ่งรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์สามารถได้รับการอธิบายได้ดังต่อไปนี้

วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

ชุดทดสอบของวงจรตรวจจับ ประกอบด้วย วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าเบอร์ HX 05-NP พิกัดกระแส 5 แอมแปร์ ทำหน้าวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ และวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าเบอร์ LV 25-P พิกัด 500 โวลต์ ทำหน้าที่วัดแรงดันเอาต์พุตบัสดีซี โดยจะใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกันที่แรงดัน -15V, 0V และ +15 V ซึ่งองค์ประกอบการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 6.8 ดังนี้



รูปที่ 6.8 ภาพการต่อวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.8 ของวงจรตรวจจับกระแส จะสังเกตได้ว่า การต่อวงจรของการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ หรือทางด้านปฐมภูมิ มีด้วยกัน 2 แบบ คือ การต่อแบบอนุกรม และการต่อแบบขนาน ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้เลือกการต่อวงจรของการวัดกระแสไฟฟ้าแบบขนาน เพื่อเพิ่มพิสัยของการวัดกระแสไฟฟ้าเป็น 2 เท่า โดยจาก 5 แอมแปร์ ไปเป็น 10 แอมแปร์ และลดความเสี่ยงของการเกิดความเสียหาย เมื่ออุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ามีค่าเกิน 5 แอมแปร์ สำหรับวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า จะเห็นได้ว่า จากการต่อวงจรมีตัวต้านทานปรากฏอยู่ทั้งด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ เนื่องจากพิสัยทางด้านแรงสูงมีที่วัดมีค่าแรงดันไฟฟ้า 500 V กระแสไฟฟ้า 10 mA ซึ่งการออกแบบค่าความต้านทานด้านแรงสูง พิจารณาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6-2) ได้ โดยกำหนดให้แรงดันที่วัดจากด้านแรงสูง (V_{HV}) ไม่เกิน 100 V

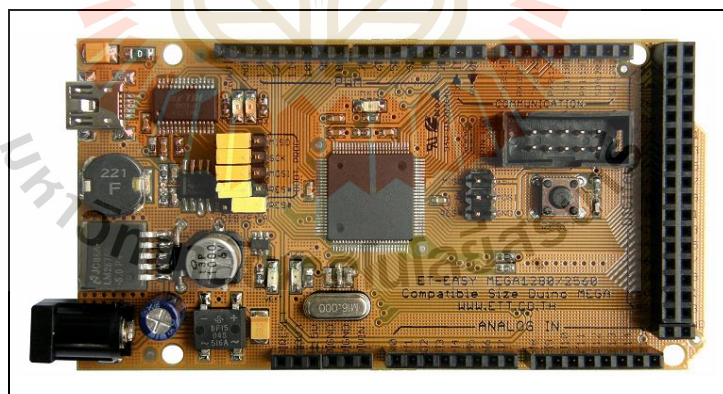
$$R_{HV} = \frac{V_{HV}}{I_{HV}} = \frac{100}{10 \times 10^{-3}} = 10k\Omega \quad (6-2)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (6-2) สังเกตได้ว่า เมื่อความต้านทานด้านแรงสูงมีค่ามาก จะทำให้กระแสทางด้านแรงสูงมีค่าน้อยลง แต่จะส่งผลให้การตรวจจับมีความละเอียดน้อยลง ดังนั้นค่าความต้านทานที่ผู้วิจัยได้นำมาใช้งานและสามารถหาซื้อได้ในท้องตลาดคือ 12 kΩ สำหรับด้านแรงต่ำของค่าความต้านทาน เกิดขึ้นจากการปรับจูนด้วยมือ ซึ่งใช้หลักการคือ ทดสอบจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่

ด้านแรงสูงมีค่าเท่ากับ 100 V เนื่องจากเป็นแรงดันสูงที่วัดค่าได้ และหลังจากนั้นทำการปรับค่าความต้านทานทางด้านแรงต่ำเพื่อให้มีค่าเท่ากับ 5 V ซึ่งเป็นแรงดันสูงสุดที่ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สามารถอ่านค่าได้ ซึ่งค่าความต้านทานที่อ่านได้มีค่าเท่ากับ 200 Ω

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล 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 รวมทั้งพอร์ตดิจิทัล, พอร์ตแอนะล็อก, พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM, พอร์ตการสื่อสารอนุกรม ผ่านมอดูและขนาดหน่วยความจำที่เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม ทางบริษัทอีทีที จึงได้นำ ATMEGA1280 มาพัฒนาเป็นชุดบอร์ด โดยใช้ชื่อว่า ET-EASY MEGA1280 (โครงสร้างของชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280 สามารถดูได้จากภาคผนวก จ. ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6.9 ดังนี้



รูปที่ 6.9 ชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280

คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับชุดบอร์ด ET-EASY MEGA1280

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ประสิทธิภาพสูงแต่ใช้พลังงานต่ำในตระกูล AVR
- สถาปัตยกรรมแบบ RISC

- มีชุดคำสั่ง 135 คำสั่ง และส่วนใหญ่คำสั่งเหล่านี้จะใช้เพียง 1 สัญญาณนาฬิกาในการประมวลผลคำสั่ง
- มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัว
- ทำงานสูงสุดที่ 16 ล้านคำสั่งต่อวินาที (MIPS) เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz

■ หน่วยความจำ

- หน่วยความจำแฟลชสำหรับโปรแกรม 128 กิโลไบต์ เขียน/ลบได้ 10,000 ครั้ง
- หน่วยความจำแบบ EEROM ขนาด 4 กิโลไบต์ เขียน/ลบได้ 100,000 ครั้ง
- หน่วยความจำแรมชนิดเอสแรม (SRAM) ขนาด 8 กิโลไบต์
- เก็บข้อมูลได้กว่า 20 ปี ที่อุณหภูมิ 85 °C และกว่า 100 ปี ที่ 25 °C

■ มีระบบโปรแกรมตัวเองอยู่ในชิพ

- สามารถทำการอ่านขณะเขียนได้จริง โดยสามารถล็อกการทำงานได้เพื่อความปลอดภัยของซอฟต์แวร์

■ มีการเชื่อมประสานกับ JTAG (IEEE std. 1149.1 compliant)

■ คุณสมบัติการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

- มีตัวตั้งเวลา และตัวนับขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงานได้ 2 โหมด
- มีตัวตั้งเวลา และตัวนับเวลาขนาด 16 บิต จำนวน 4 ตัว ที่แยกโหมดการทำงานได้ 3 โหมด คือ prescaler, compare และ capture
- มีตัวนับเวลาเวลาจริง (real time counter) ที่แยกวงจรถูกกำหนดความถี่ได้
- มี PWM จำนวน 12 ช่องสัญญาณที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 16 บิต
- มีตัวปรับผลการเปรียบเทียบของเอาต์พุต
- มีตัวแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ
- มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับ/ส่งได้ จำนวน 4 พอร์ต
- เชื่อมประสานแบบอนุกรมแบบ SPI ได้ทั้งแบบมาสเตอร์และสเลฟ
- มีการเชื่อมประสานแบบอนุกรมด้วยสายสัญญาณ 2 เส้น แบบ ส่งข้อมูลเรียงไป

- มีตัวตั้งเวลาแบบวอตซ์ด็อกที่สามารถกำหนดการทำงานได้โดยสามารถแยกสัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ
- มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณแอนะล็อกอยู่ในตัว
- มีการรองรับการขัดจังหวะและ เวก-อัฟ (wake-up) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของขาชิพ
- 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 โดยมีพอร์ตอินพุตเอาต์พุตที่ใช้งานจำนวน 11 พอร์ต ประกอบไปด้วย พอร์ต A ถึง พอร์ต K แต่ละพอร์ตมีขนาด 8 บิต ซึ่งรายละเอียดของแต่ละพอร์ต สามารถดูได้จากภาคผนวก จ. สำหรับพอร์ตที่จำเป็นสำหรับการใช้งานในวิจัยวิทยานิพนธ์ คือ พอร์ต A บิตที่ 0 ถึงบิตที่ 7 ทำหน้าที่ส่งข้อมูลไปยังมอดูล LCD เพื่อแสดงผล พอร์ต C บิตที่ 0 ถึง บิตที่ 7 โดยให้ บิตที่ 0 ถึงบิตที่ 3 ทำหน้าที่เป็นอินพุต ส่วน บิตที่ 4 ถึงบิตที่ 7 ทำหน้าที่เป็นเอาต์พุต เพื่ออ่านค่าคีย์สวิตช์ปุ่มกดทั้ง 16 ตัว โดยใช้หลักการคีย์สวิตช์แบบเมตริกซ์ และ พอร์ต F บิตที่ 0 และ บิตที่ 1 ทำหน้าที่เป็นอินพุตเพื่อรับสัญญาณแอนะล็อก

การใช้งานมอดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR มีมอดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลหรือ ADC (analog to digital converter) ความละเอียดขนาด 10 บิต (10-bit resolution) ที่แรงดัน +5V ซึ่ง

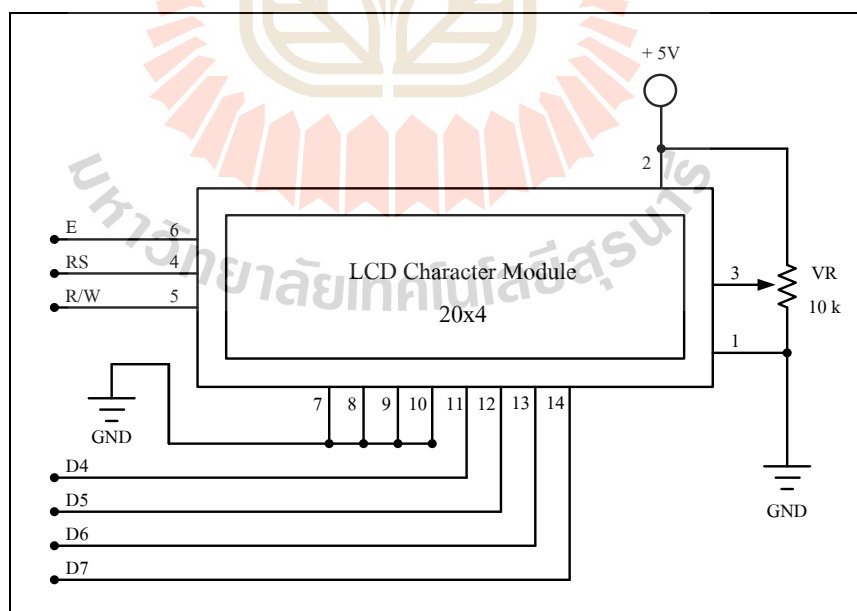
หมายถึงเมื่อแปลงเป็นสัญญาณเป็นดิจิทัลแล้วจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 – 1024 โดยมีมอดู ADC จำนวน 16 ช่องอินพุตสัญญาณ คือ ADC0-ADC15 ซึ่งจะกำหนดไว้ที่พอร์ต F ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ใช้ช่องสัญญาณเพียง 2 ช่อง คือ ช่อง ADC0 และ ช่องADC1 โดยผลการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล คำนวณได้จากสมการที่ (6-3) ดังนี้

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{REF}} \quad (6-3)$$

โดยที่ V_{IN} คือ แรงดันด้านขาอินพุต
 V_{REF} คือ แรงดันอ้างอิงจะถูกกำหนดไว้ที่ 5 V

การใช้งานมอดูแสดงผล LCD (LIQUID CRYSTAL DISPLAY MODULE)

หน่วยแสดงผลมอดูล LCD หรือ หน่วยแสดงผลแบบผลึกเหลว โดยมอดูล LCD จะมีอยู่สองชนิดด้วยกันคือ แบบตัวอักษร และแบบกราฟิก สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้แบบตัวอักษร ซึ่งโครงสร้างการต่อใช้งานพื้นฐานของมอดูล LCD แสดงดังรูปที่ 6.10 ดังนี้



รูปที่ 6.10 ภาพการต่อใช้งานมอดูล LCD

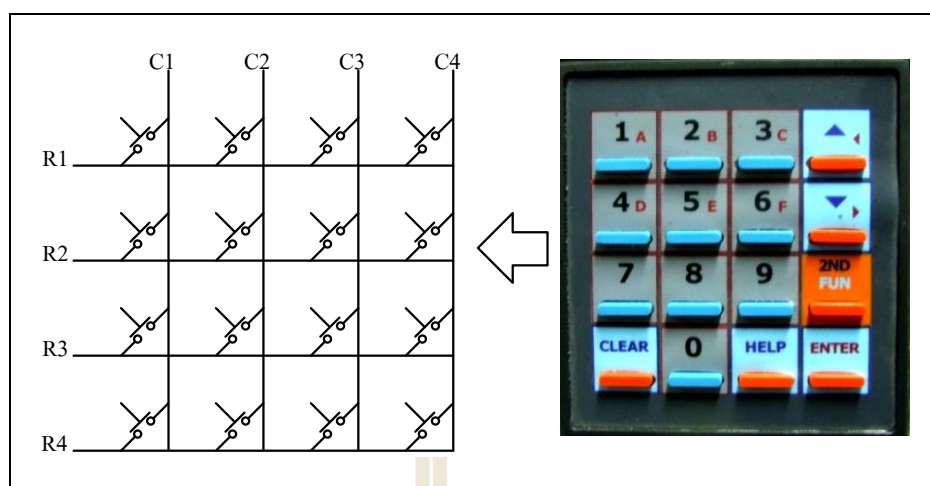
จากรูปที่ 6.10 รายละเอียดขาสัญญาณของมอดูล LCD มีดังนี้

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

จากรูปที่ 6.10 ของขาข้อมูลที่ 7 ถึง 14 จะสังเกตได้ว่าเป็นการเชื่อมต่อขาข้อมูลของมอดูล LCD ผ่านชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 4 บิต จะทำให้ประหยัดขาสัญญาณอินพุต/เอาต์พุต ที่ต้องใช้ในการเชื่อมต่อกับ LCD ได้กว่าการเชื่อมต่อวงจรแบบ 8 บิต เนื่องจากวิธีนี้จะสูญเสียขาสัญญาณเพื่อใช้ในการควบคุมการแสดงผล LCD เพียง 7 เส้นเท่านั้น ซึ่งตามปกติแล้วการเชื่อมต่อขาสัญญาณเพื่อการควบคุมการแสดงผล LCD แบบ 8 บิต นั้นจะต้องสูญเสียขาสัญญาณถึง 11 เส้น แต่วิธีการนี้ก็ต้องแลกมาด้วยความซับซ้อนในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการแสดงผลของ LCD ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำ ไลบรารี (Library) สำหรับการควบคุมการแสดงผลแบบ 4 บิตของบริษัท อีทีที ที่ได้เป็นผู้เขียน นำมาใช้งาน ทำให้สามารถเขียนโปรแกรมสั่งงาน LCD ได้ง่ายมากขึ้นและใช้โค้ด (Code) คำสั่งน้อยลงด้วย

การใช้งานคีย์สวิตช์เมตริกซ์ (KEYPAD)

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



รูปที่ 6.11 การต่อสัญญาณแบบคีย์สวิตช์

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

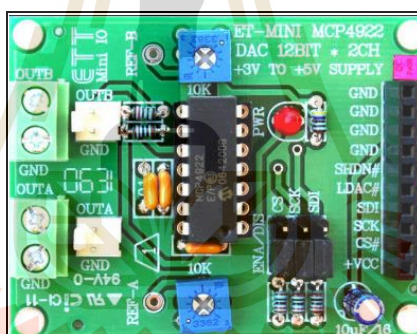
บอร์ดวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกเบอร์ MCP4922

บอร์ด ET - MINI MCP4922 ขนาด 12 บิตจัดทำขึ้นโดยบริษัท อีทีที แสดงได้ดังรูปที่ 6.12 มีหน้าที่ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก โดยการใช้งานจะต่อผ่านพอร์ต SPI (มอดูสื่อสารแบบอนุกรม) ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ซึ่งหน้าที่การใช้งานขาของไอซี MCP4922 สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

หน้าที่ขาสัญญาณบนบอร์ด ET-MINI MCP4922

- ขา +Vcc และ GND ใช้ต่อเข้ากับ Vcc และ GND ของ MCU ที่ใช้ควบคุม ซึ่งรับรองแรงดันได้ตั้งแต่ 2.7 V - 5.5 V

- ขา CS -Chip select Input จะทำงานที่ลอจิก LOW เพื่อที่จะ Enable Clock และ Data
- ขา SCK จะเป็นขาสำหรับรับสัญญาณ Clock (SPI) จากภายนอกเข้ามา
- ขา SDI เป็นขา Data สำหรับข้อมูลแบบอนุกรมจากภายนอกเข้ามา
- ขา LDAC จะทำหน้าที่ลอจิก LOW ซึ่งจะทำหน้าที่โหลดข้อมูลที่ถูกรับ Convert แล้ว ออกไปที่ขา Output
- ขา SHDN จะทำงานที่ลอจิก LOW ทำหน้าที่ Shutdown DAC .ให้อยู่ใน Standby Mode ในสถานะใช้งานปกติจะต้องเป็นลอจิก High
- ขา OUTA และ OUTB เป็นขา Output สำหรับต่อสัญญาณแอนะล็อกที่ได้ไปใช้งาน
- ขา VR REF-A และ REF-B ใช้สำหรับปรับแรงดันอ้างอิงให้ แชนแนล A และ B ตามลำดับ โดยแรงดันอ้างอิงนี้จะปรับที่ 0 ถึง +Vcc



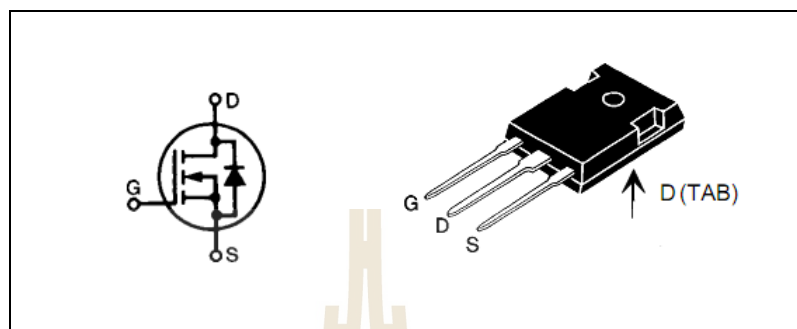
รูปที่ 6.12 ชุดบอร์ด ET- MINI MCP4922 DAC 12 BIT
(วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก)

การใช้งานมอดูแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกในรูปที่ 6.12 สำหรับงานวิจัย วิทยานิพนธ์จะเลือกใช้ขา OUTA ในการส่งค่าให้กับวงจรทางแอนะล็อก ดังในรูปที่ 6.2 ซึ่งรายละเอียดการเขียนโปรแกรมสามารถดูได้จากภาคผนวก ข.

วงจรการสวิตซ์สำหรับการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเล็ก

วงจรการสวิตซ์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้วงจรที่เป็นลักษณะมอดู การออกแบบ จะคำนึงถึงพิกัดของแรงดันและกระแสเป็นสำคัญ โดยค่าพิกัดกระแสของโหลดเท่ากับ 10 A ในขณะที่แรงดันมีค่าเท่ากับ 120 V และเมื่อคำนึงถึงค่าตัวประกอบนิรภัย (safety factor) 25

เปอร์เซ็นต์ มอดูที่ใช้สำหรับวงจรลูปยกเล็กจะมีค่าพิคกระแสมากกว่า 10 A และมีค่าพิคแรงดันมากกว่า 120 V เพราะฉะนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้มอดูที่มีพิคแรงดัน 250 V พิคกระแส 25 A ซึ่งมอดูดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 6.13 ดังนี้



รูป 6.13 มอดูการสวิตซ์ของการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเล็ก

ไดโอดกำลัง

พิจารณาจากโครงสร้างการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเล็กในรูปที่ 6.1 ไดโอด D_1 ต้องมีพิคแรงดันมากกว่าค่าแรงดันเอาต์พุตดีซี ซึ่งมีค่าเท่ากับ 116.9 V แต่เมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ ค่าพิคแรงดันของไดโอด D_m จะมีค่ามากกว่า 146.13 V เพราะฉะนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จึงเลือกใช้ไดโอด D_m ที่มีพิคแรงดัน 200 V ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6.14 ดังนี้



รูปที่ 6.14 ไดโอดของวงจรลูปยกเล็ก

อุปกรณ์ที่ 4 วงจรกรองแรงดันบัสดีซีที่ประกอบไปด้วย ตัวเหนี่ยวนำ L_{dc} ดังแสดงในรูปที่ 6.15 มีค่าขนาดเท่ากับ 37.7 mH พิคกระแสไฟฟ้า 10 A และตัวเก็บประจุ C_{dc} ดังในรูป 6.16 ขนาดความจุไฟฟ้า 237.35 μF ซึ่งใช้ตัวเก็บประจุขนาด 470 μF สองตัวมาต่ออนุกรมกัน และเป็น

ค่าที่ผ่านการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งสามารถดูได้จาก (Sopapirm T., Areerak K-N. and Areerak K-L., 2012) โดยมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 800 V

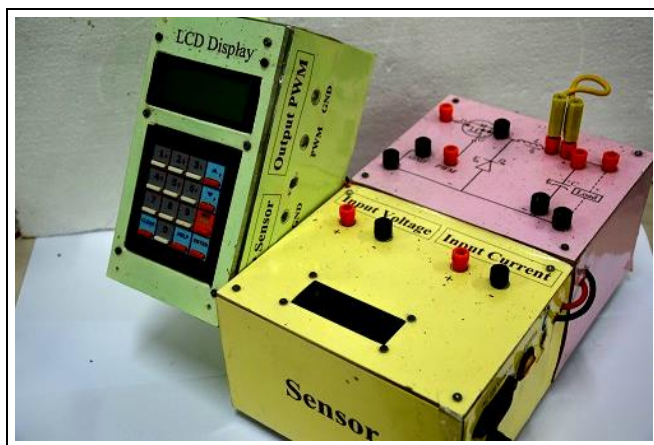


รูปที่ 6.15 ตัวเหนี่ยวนำ L_{dc} ขนาดเท่ากับ 37.7 mH



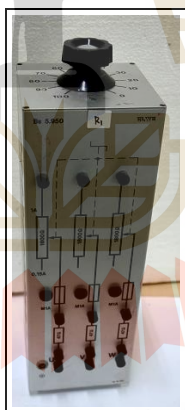
รูปที่ 6.16 ตัวเก็บประจุ C_{dc} ขนาดเท่ากับ 237.35 μ F

อุปกรณ์ที่ 5 ชุดวงจรแปลงผันแปลงผันแบบบัก์ที่ประกอบไปด้วย 3 วงจรหลักๆ คือ วงจรการสั่งงานผ่านคีย์สวิตช์เมตริกซ์ที่มีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ชุดวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ชุดวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีอุปกรณ์การสวิตช์เป็น MOSFET เบอร์ IRFP250N ไอโอดกำลังเบอร์ MUR160 ตัวเหนี่ยวนำขนาดเท่ากับ 15 mH และตัวเก็บประจุขนาดเท่ากับ 125 μ F ซึ่งรายละเอียดการสร้างวงจรสามารถดูได้จากวิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิตของเทพพนม (เทพพนม โสภภาพิม, 2554) สำหรับรูปร่างของชุดวงจรแปลงผันแบบบัก์แสดงได้ดังรูปที่ 6.17 ดังนี้



รูปที่ 6.17 ชุดวงจรแปลงผันแบบบัคค์

อุปกรณ์ที่ 6 โหลดตัวต้านทานสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์มีค่าเท่ากับ $20\ \Omega$ พิกัดกำลังไฟฟ้า 300 W โดยรูปร่างตัวต้านทานแสดงได้ดังรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ $20\ \Omega$

จากการอธิบายอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสร้างชุดทดสอบสำหรับการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กข้างต้น ลำดับต่อไป คือ การอธิบายการโปรแกรมควบคุมการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กตามรูปที่ 6.2 ภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

6.2.2 การโปรแกรมระบบควบคุมการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเล็ก

การโปรแกรมการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเล็ก ประกอบไปด้วย การอ่านค่าจากการตรวจจับแรงดันเอาต์พุตบัสดีซี การตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ไหลไปยังโหลด การคำนวณหาค่า K_{FB} และการส่งข้อมูลผ่านมอดูผ่าน SPI (การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก) ในรูปที่ 6.2 จะถูกโปรแกรมลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR โดยใช้ภาษาซีซึ่งสามารถดูแผนภูมิการโปรแกรมได้ดังรูปที่ 6.19 จากรูปดังกล่าว การโปรแกรมการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเล็ก สามารถอธิบายได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 คือการประกาศเรียกฟังก์ชันใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MAGA1280 ฟังก์ชันมาตรฐานของการโปรแกรมด้วยภาษาซี และรวมถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น ฟังก์ชัน ADC (การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล) เป็นต้น

ส่วนที่ 2 คือการกำหนดฟังก์ชันและตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณตามระบบการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเล็ก

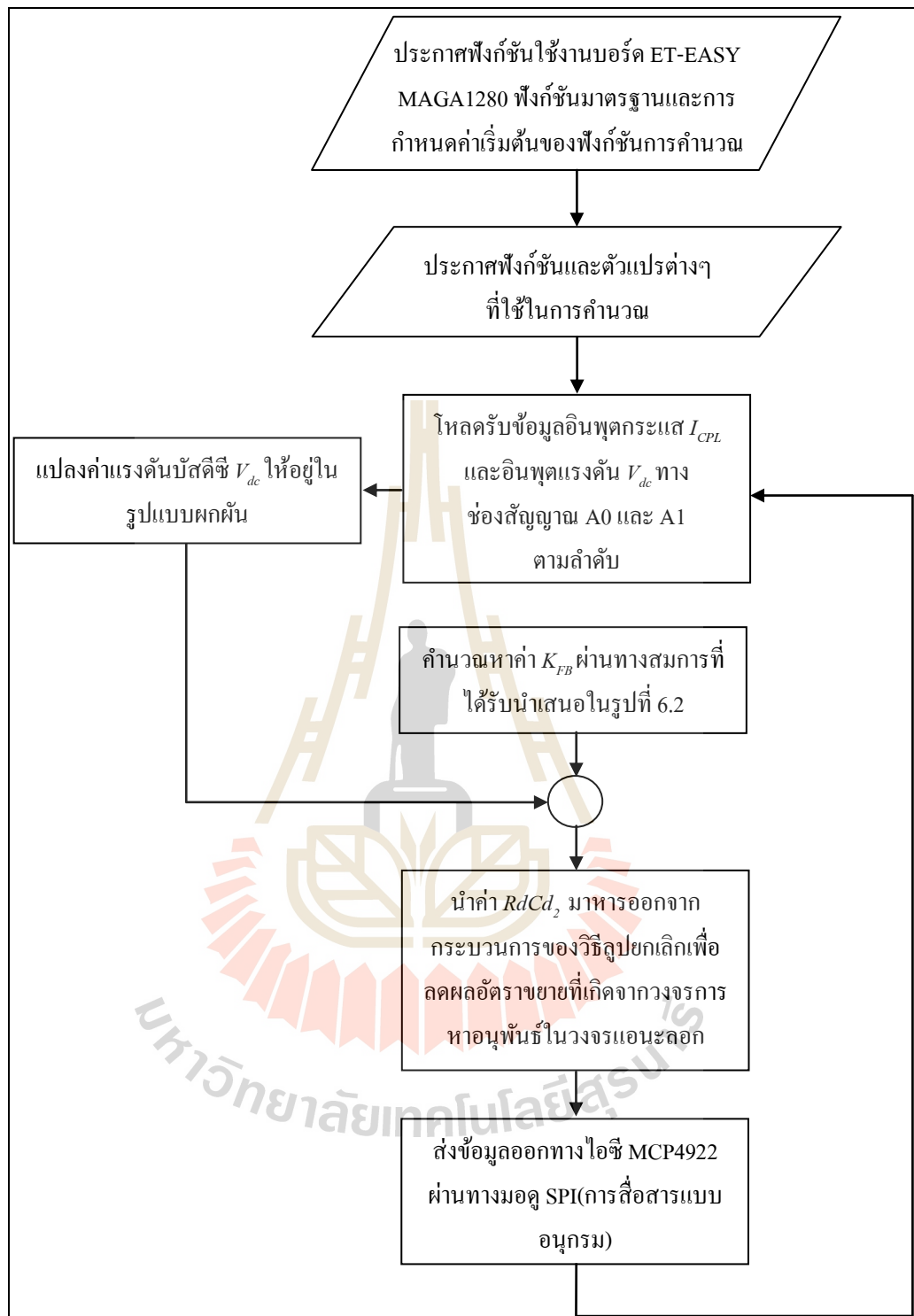
ส่วนที่ 3 คือการโหลดรับข้อมูลอินพุตที่ใช้ในการคำนวณตามระบบการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเล็ก ได้แก่ ค่ากระแส I_{CPL} ผ่านทางช่องสัญญาณแอนะล็อก A0 และค่าแรงดัน V_{dc} ผ่านช่องสัญญาณ A1

ส่วนที่ 4 คือการคำนวณหาค่า K_{FB} ผ่านสมการที่ได้รับนำเสนอในรูปที่ 6.2 ซึ่งวิธีการพิสูจน์สามารถดูได้หัวข้อที่ 4.4 ในบทที่ 4

ส่วนที่ 5 คือการแปลงสัญญาณของแรงดัน V_{dc} ให้อยู่ในรูปแบบผกผัน เพื่อให้กระบวนการทำงานของวิธีลูปยกเล็กสอดคล้องเช่นเดียวกันกับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่ได้รับนำเสนอไว้ในบทที่ 5

ส่วนที่ 6 คือการนำกระบวนการส่วนที่ 4 และ ส่วนที่ 5 นำมาคูณกัน และลดทอนผลของอัตราขยายที่เกิดจากวงจรแอนะล็อกด้วยการหาร $RdCd_2$

ส่วนที่ 7 คือการส่งข้อมูลเอาต์พุตสัญญาณสำหรับการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเล็กออกทางช่องสัญญาณไอซี MCP4922 ด้วยมอดู SPI



รูปที่ 6.19 แผนภูมิการโปรแกรมการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็ก

การอธิบายแผนภูมิการโปรแกรมข้างต้นคือ การคำนวณระบบการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวเพียงรอบแรกเท่านั้น โดยการคำนวณในรอบต่อไป จะเริ่มทำการรับข้อมูลอินพุต ค่ากระแสและการแรงดันไฟฟ้าค่าใหม่ (การโปรแกรมในส่วนของที่ 3) และหลังจากนั้นจึงดำเนินการคำนวณซ้ำในแต่ละส่วนใหม่ตลอดการสร้างเสถียรภาพ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรมทั้งหมดต่อหนึ่งรอบการคำนวณของโปรแกรมทั้งหมดต่อหนึ่งรอบการคำนวณมีค่าโดยประมาณ 0.5 มิลิวินาที

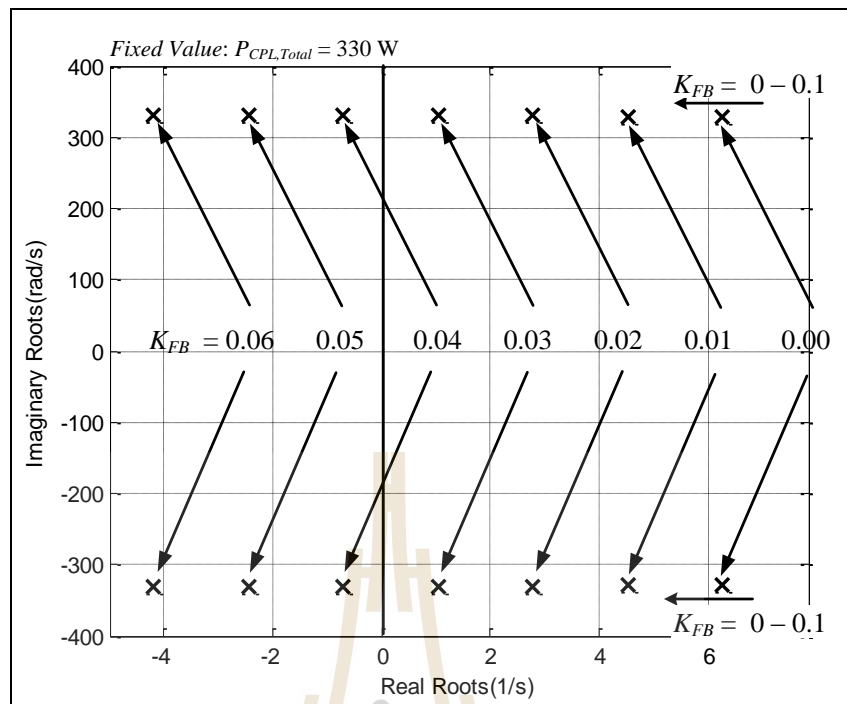
หมายเหตุ: โค้ดโปรแกรมภาษาซีของการสร้างเสถียรภาพสามารถดูได้จากภาคผนวก ข.

6.3 การทดสอบการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเล็ก

การทดสอบในทางปฏิบัติของการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเล็กจะทดสอบด้วยกัน 2 กรณีคือ กรณีแรกการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า K_{FB} และกรณีที่ 2 ทดสอบโดยที่มีการแปรเปลี่ยนค่า K_{FB} ตามระดับกำลังของโหลดกำลังไฟฟ้า ซึ่งผลการทดสอบทั้ง 2 กรณีดังกล่าวสามารถดูได้จากหัวข้อต่อไป

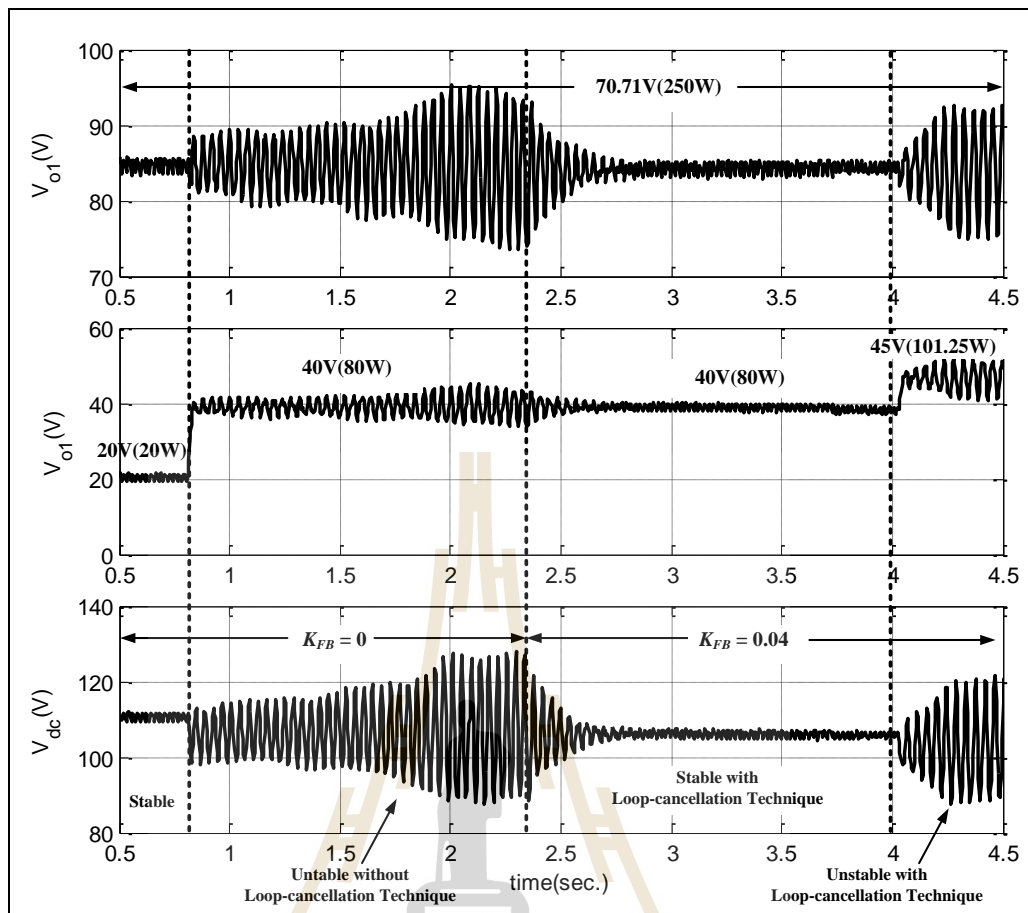
6.3.1 กรณีการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อมีการคงค่า K_{FB}

การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเล็กที่มีการคงค่า K_{FB} สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองเชิงพลวัตที่ได้รับการพิสูจน์ไว้ในบทที่ 5 ซึ่งหลักการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะพิจารณาการเพิ่มโหลดดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชูดที่ 2 จาก 20 W ไปเป็น 80 W โดยที่กำหนดให้โหลดดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชูดที่ 1 มีค่าคงที่เป็น 250 W จากนั้นเริ่มทำการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยทำการเพิ่มค่า K_{FB} ทีละ 0.01 ไปจนถึง 0.1 ซึ่งผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.20



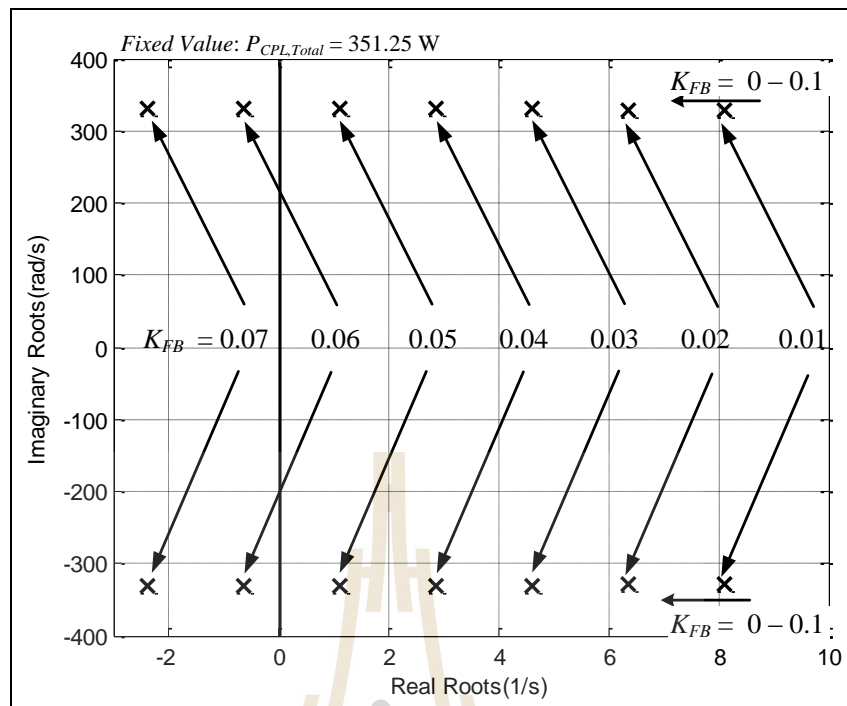
รูปที่ 6.20 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ
เมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคมีค่าเป็น 330 W

จากรูปที่ 6.20 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคมีค่าเท่ากับ 330 W โดยที่ค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0 (วงจรชดเชยไม่ทำงาน) จะทำให้ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เกิดการขาดเสถียรภาพ แต่ถ้าทำการเพิ่มค่า K_{FB} จาก 0 ไปเป็น 0.05 (วงจรชดเชยเริ่มทำงาน) จะทำให้ขั้วเด่นของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งขวาไปยังฝั่งซ้ายของระนาบเอส ซึ่งหมายถึงระบบที่ขาดเสถียรภาพ จะกลับมามีเสถียรภาพใหม่ได้อีกครั้งเมื่อค่า K_{FB} มีค่าเป็น 0.04 ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.21 โดยแสดงการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเมื่อกำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคชุดที่ 1 มีค่า 250 W และ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคชุดที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 20 W ไปเป็น 80 W ที่เวลา 0.85 วินาที โดยที่ผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามียุคค่าเป็น 330 W หลังจากนั้น เมื่อเวลา 2.4 วินาที ได้กำหนดให้วงจรชดเชยเริ่มทำงานโดยที่มีค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0.04 และเมื่อเวลา 4 วินาที ได้เพิ่มโหลดวงจรแปลงผันชุดที่ 2 จาก 80 W ไปเป็น 101.25 W ซึ่งมีผลรวมของกำลังไฟฟ้ายุคเป็น 351.25 W



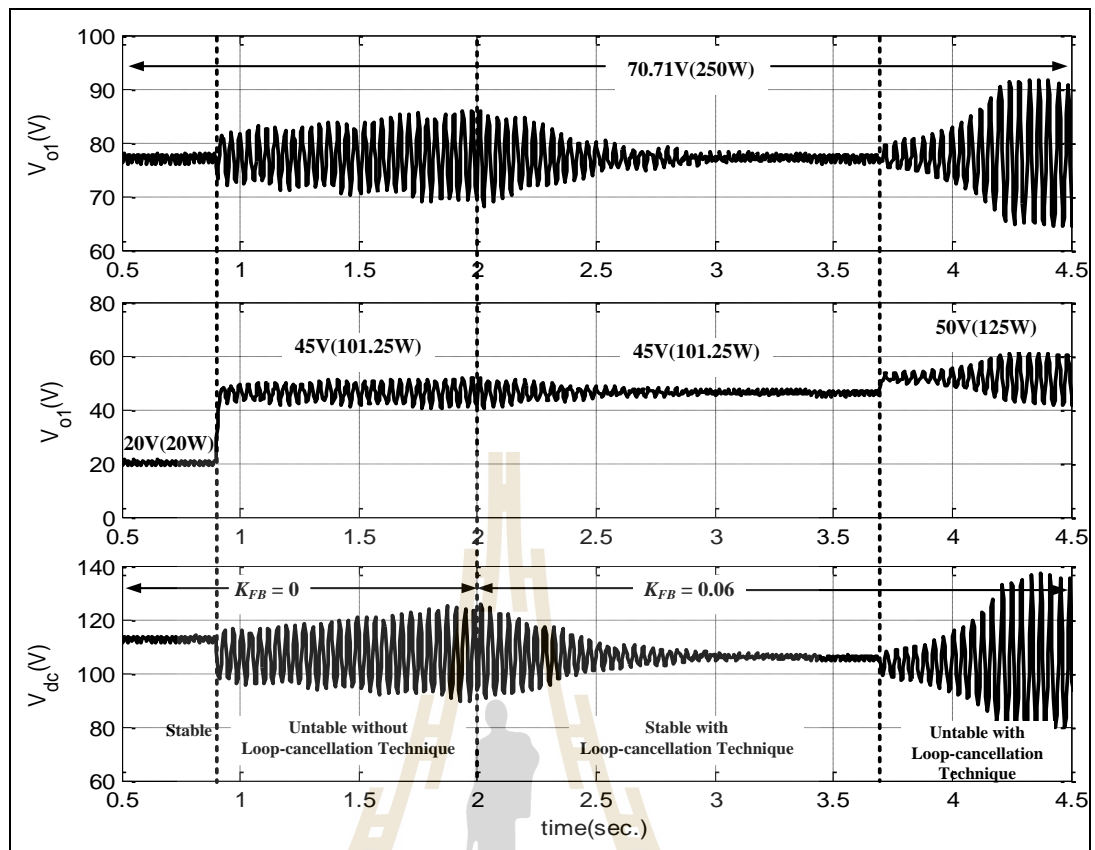
รูปที่ 6.21 ผลการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0.03

จากรูปที่ 6.21 สังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเป็น 330 W จะทำให้ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เกิดการขาดเสถียรภาพ และเมื่อหลังจากวงจรถูกยกเลิกเริ่มทำงาน โดยที่กำหนดค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0.04 จะทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเพิ่ม โหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชุดที่ 2 ไปเป็น 101.25 W จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะสำหรับการวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพเมื่อผลรวมของ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้ง 2 ชุดมีค่า 251.25 W ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 6.22



รูปที่ 6.22 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ
เมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์มีค่าเป็น 351.25 W

จากรูปที่ 6.22 จะสังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเป็น 351.25 W จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพโดยที่ค่า K_{FB} มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 0.05 และระบบจะมีเสถียรภาพอีกครั้งจะต้องทำการเพิ่มค่า K_{FB} ไปเป็น 0.06 ตามผลที่ได้วิเคราะห์ในรูปที่ 6.22 โดยผลการบรรเทาการขาดเสถียรของชุดทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 6.23 ซึ่งแสดงผลการขาดเสถียรภาพเมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์มีค่าเท่ากับ 351.25 W และผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก เมื่อค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0.06 รวมถึงที่เวลา 3.7 วินาทีได้ทำการเพิ่มโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 101.25 W ไปเป็น 125 W ซึ่งมีผลรวมของกำลังไฟฟ้าเป็น 375 W



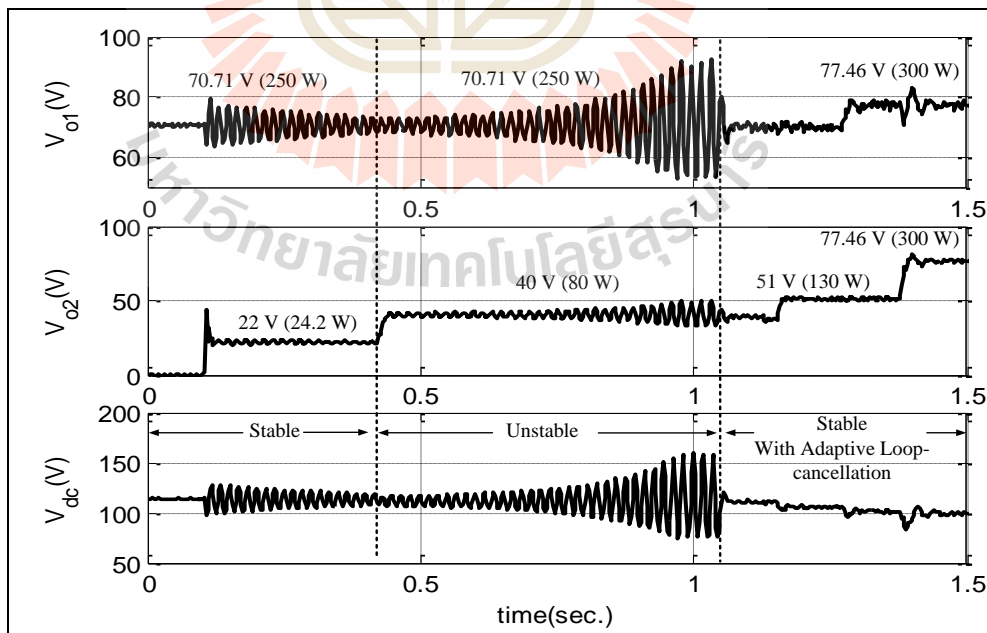
รูปที่ 6.23 ผลการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0.06

จากรูปที่ 6.23 จะสังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 351.25 W จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ และภายหลังจากเวลาที่ 2 วินาที ได้สั่งให้วงจรอุปยกเล็กเริ่มทำงานโดยที่กำหนดให้ค่า K_{FB} มีค่าเท่า 0.06 จะทำให้ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์กลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเพิ่มโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชุดที่ 2 มีค่าเป็น 125 W ซึ่งก็คือ ผลรวมของวงจรแปลงผันแบบบัก์มีค่าเป็น 375 W จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้อีก และถ้าต้องการทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ 357 W จะต้องทำการวิเคราะห์ผลของ K_{FB} ผ่านคอมพิวเตอร์อีกครั้ง ดังนั้นนี่คือข้อเสียการคงค่า K_{FB} สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอุปยกเล็ก โดยในหัวข้อที่ 6.3.2 จะแสดงผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} ที่แปรเปลี่ยนไปตามระดับกำลังของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้ง 2 ชุด ซึ่งจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน

6.3.2 กรณีการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB}

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} หรือที่เรียกว่าการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัว แสดงได้ดังรูปที่ 6.24 ซึ่งการทดสอบจะเริ่มจากให้วงจรรูปเล็กไม่ทำงานตั้งแต่เวลา 0 วินาที ถึง 1.05 วินาที และเริ่มทำงานหลังจาก 1.05 เป็นต้นไป โดยการปรับตั้งค่าโหลดกำลังไฟฟ้าสามารถแสดงขึ้นตอนได้ดังต่อไปนี้

- ขั้นที่ 1 ปรับตั้งโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชูดที่ 1 มีค่า 250 W และ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชูดที่ 2 มีการเปลี่ยนจาก 0 W เป็น 24.2 W ที่เวลา 0.11 วินาที โดยผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 274.2 W
- ขั้นที่ 2 ปรับตั้งโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชูดที่ 2 เปลี่ยนแปลงจาก 24.2 W ไปเป็น 80 W ที่เวลา 0.43 วินาที โดยผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 330 W
- ขั้นที่ 3 ปรับตั้งโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชูดที่ 2 เปลี่ยนแปลงจาก 80 W ไปเป็น 130 W ที่เวลา 1.151 วินาที โดยผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 380 W
- ขั้นที่ 4 ปรับตั้งโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชูดที่ 1 เปลี่ยนแปลงจาก 250 W ไปเป็น 300 W ที่เวลา 1.27 วินาที โดยผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 430 W
- ขั้นที่ 5 ปรับตั้งโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชูดที่ 2 เปลี่ยนแปลงจาก 130 W ไปเป็น 300 W ที่เวลา 1.38 วินาที โดยผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 600 W



รูปที่ 6.24 ผลการทดสอบการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัว

จากรูปที่ 6.24 จะสังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุด มีค่าเป็น 330 W จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และเมื่อหลังจากเวลา 1.05 วินาที วงจรลูบยกเล็กเริ่มทำงานในลักษณะการปรับค่า K_{FB} ที่อาศัยการอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตบัคค์และกระแสที่ไหลไปยังโหลด จะทำให้ผลการแกว่งของรูปสัญญาณลดลงอย่างนับพัน นั่นคือ ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีเสถียรภาพได้อย่างสมรรถนะที่ดี โดยที่โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าที่ 600 W ก็ตาม

6.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 6 กล่าวถึงการสร้างชุดสอบสำหรับการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็ก ซึ่งในเบื้องต้นได้อธิบายถึงโครงสร้างการทำงานของแต่ละวงจร ได้แก่ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองแรงดันบัคค์ วงจรการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็ก ซึ่งมีการทำงานร่วมกันของวงจรทางดิจิทัลและวงจรแอนะล็อก โดยที่วงจรทางดิจิทัลจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MAGA1280 สำหรับการอ่านค่าอินพุตกระแสที่ไหลไปยังโหลด และอ่านค่าอินพุตแรงดันบัคค์ใช้ในการคำนวณหา K_{FB} ที่แปรเปลี่ยนไปตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุด จากนั้นส่งข้อมูลออกไปยังไอซีเบอร์ MPC4922 ผ่านมอดู SPI เพื่อส่งค่า K_{FB} ให้กับวงจรแอนะล็อก โดยวงจรดังกล่าวได้มีการอธิบายการใช้งานและการทำงานของไอซีแต่ละตัวไว้พอสังเขป สำหรับโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมโหลดความต้านทานทั้ง 2 ชุด จะใช้บอร์ดรุ่นเดียวกันกับวงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก ซึ่งได้มีการอธิบายความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR การใช้งานจอแสดงผล LCD ก็ยี่สวีตซ์เมตริกซ์ มอดู ET-MINI MCP4922 การออกแบบวงจรการสวีตซ์ที่ใช้ MOSFET ไดโอดกำลัง รวมถึงการเขียนโปรแกรมควบคุมการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็ก จากนั้นเมื่อชุดทดสอบสามารถทำงานได้อย่างมั่นคง ผู้วิจัยจึงเริ่มจากการทดสอบการสร้างเสถียรภาพไว้ 2 กรณี โดยกรณีแรกทดสอบโดยการสร้างเสถียรภาพที่มีการคงที่ K_{FB} เพื่อแสดงถึงสมรรถนะการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสำหรับการสร้างชุดสอบการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จากที่มีสภาวะการขาดเสถียรภาพเนื่องจาก โหลดกำลังไฟฟ้าคง แต่กลับทำให้ระบบดังกล่าวกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้งภายหลังที่วงจรลูบยกเล็กเริ่มทำงาน โดยมีการโปรแกรมค่า K_{FB} เดียวกันกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การสร้างชุดทดสอบของวงจรลูบยกเล็กสามารถชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่ได้รับการพิสูจน์ไว้เนื้อหาของบทที่ผ่านมา และกรณีที่ 2 เป็นการทดสอบที่มีการปรับเปลี่ยน

ค่า K_{FB} ตามระดับกำลังของโหลดกำลังไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัว จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า วงจรการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวโดยใช้วิธีลูบยกเล็ก สามารถทำให้ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ มีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน โดยที่ไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพเมื่อ โหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มระดับไฟฟ้าที่สูงขึ้นภายใต้พิกัดของระบบ ในที่นี้คือ 600 W อีกทั้งยังทำให้สมรรถนะการทำงานระบบควบคุมของโหลดดียิ่งขึ้น



บทที่ 7

การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก

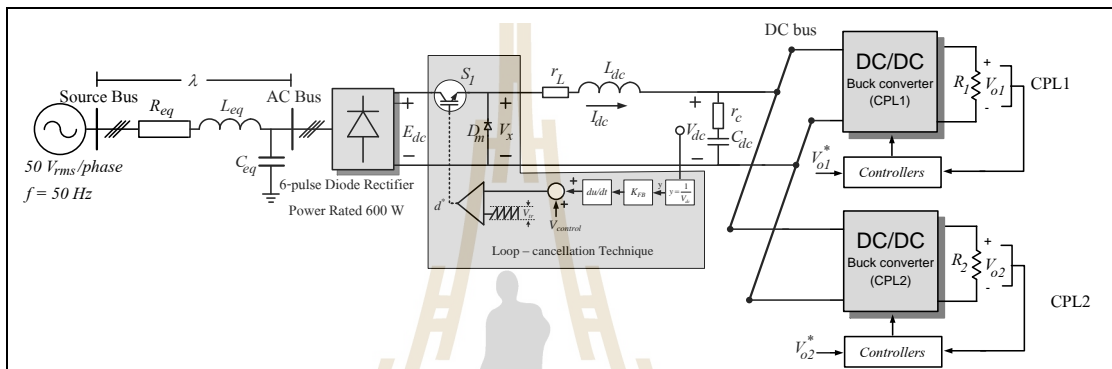
7.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอ การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกันโดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เนื่องจากวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ผลของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยตรง และประยุกต์ใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนได้ อีกทั้งยังสามารถประมาณการส่งไกวสูงสุดของวงจรกรอง ในเบื้องต้นของบทนี้จะพิจารณาจากระบบที่มีโครงสร้างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก ซึ่งจะเป็นระบบที่พิจารณาเช่นเดียวกันในบทที่ 5 มาทำการวิเคราะห์เสถียรภาพจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่ได้รับการพิสูจน์ไว้แล้วในบทดังกล่าว โดยการวิเคราะห์จะอาศัยการคำนวณหาค่าตอบสนองการเชิงอนุพันธ์ด้วยฟังก์ชัน ode45 บนโปรแกรม MATLAB และนำคำตอบที่ได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับชั่วเดนนั่นคือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_{dc}) และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_{dc}) เพียงเท่านี้ก็สามารวิเคราะห์หาจุดการทำงานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และกลับมามีเสถียรภาพได้ด้วยการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก นั่นคือข้อดีของวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสที่สามารถวิเคราะห์ผลได้จากสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยตรง และลดความยุ่งยากในการทำสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นเชิงเส้นสำหรับการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และอีกผลการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอในบทนี้คือการนำวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสมาขึ้นยืนยันผลของสมการคำนวณค่า K_{FB} ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งเรียกว่า การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็ก จากผลการยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ของค่า K_{FB} ที่ทำให้ระบบที่พิจารณาในบทนี้มีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน

7.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระบบเฟสสำหรับระบบที่พิจารณา

7.2.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 7.1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปยกเลิก วงจรกรองสัญญาณดีซี และ โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคที่มี การควบคุมทั้ง 2 ชุด โดยระบบดังกล่าวจะเป็นระบบที่พิจารณาเช่นเดียวกันในบทที่ 5



รูปที่ 7.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มี โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคจำนวนกัน

จากรูปที่ 7.1 การวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} สามารถดำเนินการหาสมการเชิงอนุพันธ์โดยอาศัยองค์ความรู้ที่ได้รับจากการพิสูจน์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 5.2.2 ของบทที่ 5 ซึ่งสามารถแสดงสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังสมการที่ (7-1) ดังนี้

$$\begin{cases}
 \dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
 \dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
 V_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}V_{ir}}{\pi C_{eq} V_{control}} I_{dcl} + \frac{18K_{FB}}{\pi^2 C_{eq} L_{dc} V_{control}} \frac{V_{bus,d}}{V_{dc}} \\
 \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\
 \dot{I}_{dcl} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \frac{V_{control} V_{bus,d}}{V_{ir}} - \frac{(r_{\mu} + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dcl} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}(r_{\mu} + r_L + r_c)K_{FB}}{\pi L_{dc}^2 V_{ir}} \frac{V_{bus,d}}{V_{dc}} - \frac{r_c K_{pi,1}}{L_{dc}} I_L^2 \\
 - \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_{dc}} I_{L1} V_{o1} + \frac{r_c K_{iv,1} K_{pi,1}}{L_{dc}} I_{L1} X_{v1} + \frac{r_c K_{ii,1}}{L_{dc}} I_{L1} X_{i1} + \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* - \frac{r_c K_{pi,2}}{L_{dc}} I_{L2}^2 \\
 - \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_{dc}} I_{L2} V_{o2} + \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2}}{L_{dc}} I_{L2} X_{v2} + \frac{r_c K_{ii,2}}{L_{dc}} I_{L2} X_{i2} + \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_{dc}} I_{L2} V_{o2}^*
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc1} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc} C_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{dc} V_{tr}} \right) V_{bus,d} + \frac{K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1}^2 + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1} - \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} X_{v1} \\
- \frac{K_{ii,1}}{C_{dc}} I_{L1} X_{i1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* + \frac{K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2}^2 + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2} V_{o2} \\
- \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2} X_{v2} - \frac{K_{ii,2}}{C_{dc}} I_{L2} X_{i2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{C_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \\
\dot{I}_{L1} = -\frac{K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} I_{L1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} V_{o1} - \frac{V_{o1}}{L_1} + \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} X_{v1} + \frac{K_{ii,1}}{L_1} V_{dc} X_{i1} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{L_1} V_{dc} V_{o1}^* \\
\dot{V}_{o1} = \frac{1}{C_1} I_{L1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1} \\
\dot{X}_{v1} = -V_{o1} + V_{o1}^* \\
\dot{X}_{i1} = -I_{L1} - K_{pv,1} V_{o1} + K_{iv,1} X_{v1} + K_{pv,1} V_{o1}^* \\
\dot{I}_{L2} = -\frac{K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} I_{L2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} V_{o2} - \frac{V_{o2}}{L_2} + \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} X_{v2} + \frac{K_{ii,2}}{L_2} V_{dc} X_{i2} + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{L_2} V_{dc} V_{o2}^* \\
\dot{V}_{o2} = \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{R_2 C_2} V_{o2} \\
\dot{X}_{v2} = -V_{o2} + V_{o2}^* \\
\dot{X}_{i2} = -I_{L2} - K_{pv,2} V_{o2} + K_{iv,2} X_{v2} + K_{pv,2} V_{o2}^*
\end{cases} \quad (7-1)$$

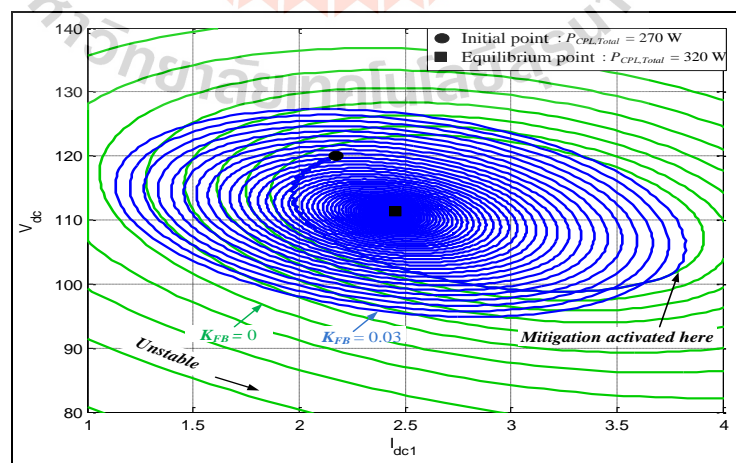
จากสมการเชิงอนุพันธ์ที่ (7-1) จะสังเกตได้ว่า มีค่า K_{FB} ปรากฏอยู่ในสมการ โดยผลของค่าดังกล่าวจะสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 7.1 ได้ตามที่ได้รับการนำเสนอในบทที่ผ่านมา ดังนั้นในบทนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์ของค่า K_{FB} ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นั่นคือ ดำเนินการหาค่าตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 7.1 ด้วยฟังก์ชัน ode45 ของโปรแกรม MATLAB เพื่อแสดงผลการยืนยันว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งรายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป

7.2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในหัวข้อที่ 5.3 ในบทที่ 5 จะพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีขั้วเด่นเพียงแค่ 2 ตัว เท่านั้น โดยขั้วเด่นนี้จะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งขั้วเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะเป็นขั้วที่สื่อถึงวงจรรอง เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าของวงจรรอง (L_{dc} และ C_{dc}) ดังนั้นจึงทำให้ตัวแปรสถานะ I_{dc} (กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอง) และ V_{dc} (แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรรอง) เป็นตัวแปรสถานะที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบ จากแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากวิทยานิพนธ์ปริญญาโทของ อภิชัย สุยะพันธ์ (อภิชัย สุยะพันธ์, 2558) ระบุไว้ว่า ถ้าระบบไฟฟ้าที่พิจารณามี

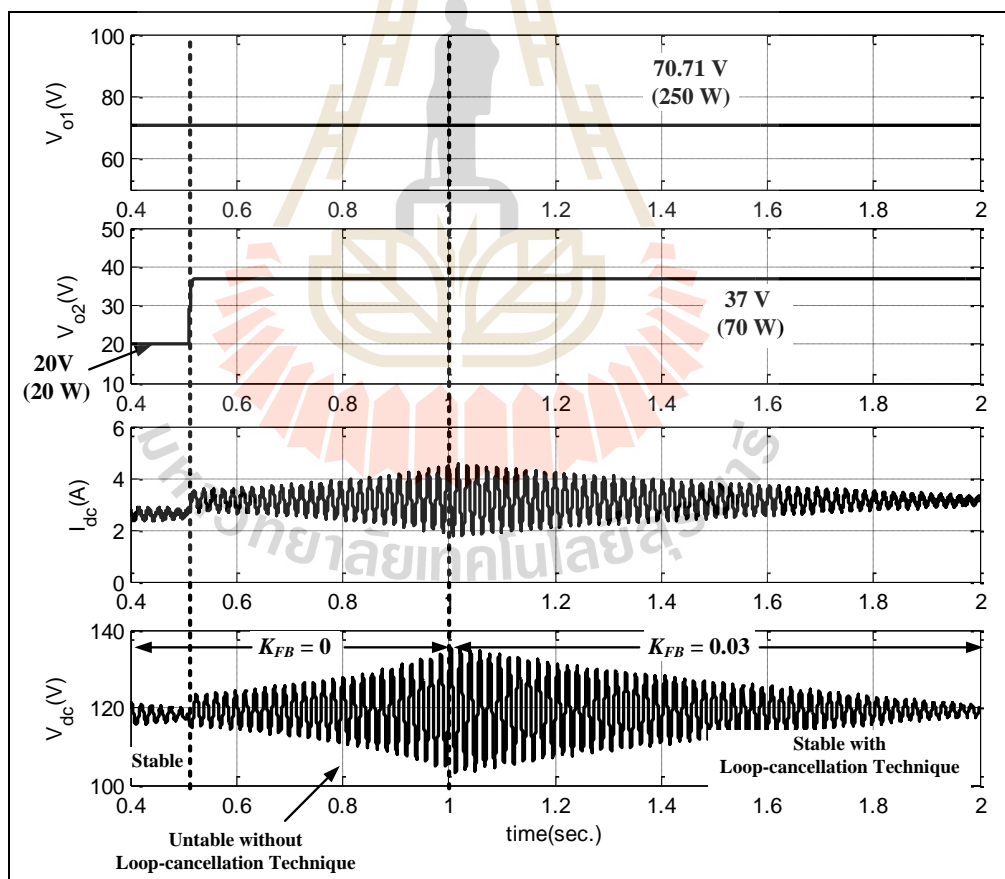
จำนวนขั้วเด่นเพียงแค่ 2 ตัว การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถทำได้ โดยอาศัยการสร้างการโคจรของคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับขั้วเด่นได้ แต่การหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อนำคำตอบที่หาได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับขั้วเด่น จะต้องคำนวณหาจากชุดสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบทั้งหมด 14 สมการ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 7.1 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถทำได้โดยสร้างการโคจรของคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะ I_{dc1} และ V_{dc}

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส จะพิจารณาการวิเคราะห์ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์เพิ่มขึ้นทีละ 10 W ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาขาดเสถียรภาพ ซึ่งการวิเคราะห์สามารถทำได้โดยการคำนวณหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ที่ (7-1) ด้วยฟังก์ชัน ode45 บนโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดให้ \dot{I}_{sd} , \dot{I}_{sq} , $\dot{V}_{bus,d}$, $\dot{V}_{bus,q}$, \dot{I}_{dc} , \dot{V}_{dc} , \dot{I}_{L1} , \dot{V}_{o1} , \dot{X}_{v1} , \dot{X}_{i1} , \dot{I}_{L2} , \dot{V}_{o2} , \dot{X}_{v2} และ \dot{X}_{i2} ในสมการที่ (7-1) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะสามารถสร้างการโคจรของคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อผลรวมของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าจาก 270 W ไปเป็น 320 W ซึ่งแสดงเป็นเส้นสีเขียวในรูปที่ 7.2 และอีกส่วนหนึ่งของผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสสำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก เมื่อค่า K_{FB} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 ไปเป็น 0.03 ที่เวลา 0.1 วินาที ซึ่งแสดงเป็นเส้นสีน้ำเงินไว้ในรูปที่ 7.2 เช่นเดียวกัน



รูปที่ 7.2 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เมื่อกำหนดให้ $K_{FB} = 0.03$ และผลรวมของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักก์มีค่าเท่ากับ 320 W

จากรูปที่ 7.2 จะสังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งทั้ง 2 ชุดมีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าจาก 270 W ไปเป็น 320 W จะทำให้การโคจรของคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบออกห่างจากจุดปฏิบัติงานมากยิ่งขึ้นอย่างไม่มีการสิ้นสุด เมื่อเวลาผ่านไปดังแสดงในเส้นสีเขียว ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 7.1 จะขาดเสถียรภาพเมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งทั้ง 2 ชุดมีค่ามากกว่า 320 W และในขณะที่ค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0.03 ที่เวลา 0.1 วินาทีของเส้นสีน้ำเงิน จะทำให้การโคจรของคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ เคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานของระบบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้งเมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งทั้ง 2 ชุดมีค่าระดับกำลังไฟฟ้าเป็น 320 W โดยผลการยืนยันวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 7.3 ดังนี้

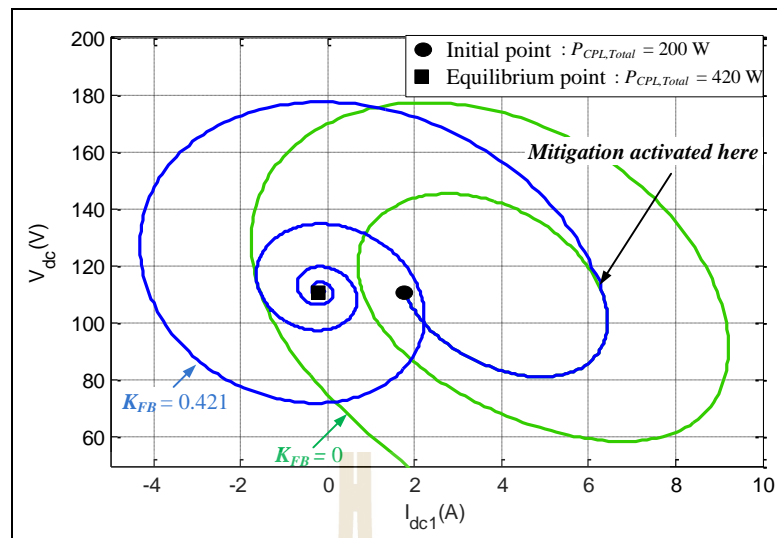


รูปที่ 7.3 การยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อกำหนดให้ผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคกิ้งมีค่าเท่ากับ 320 W

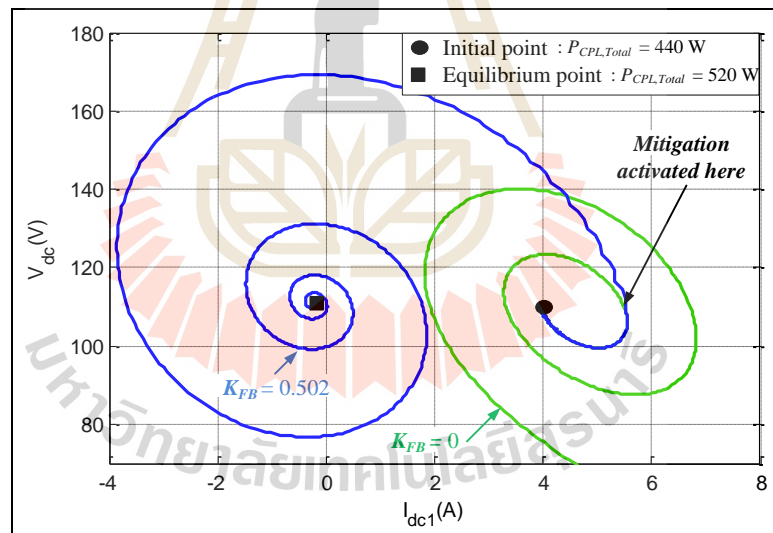
จากรูปที่ 7.3 จะสังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์มีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าจาก 270 W ไปเป็น 320 W ที่เวลา 0.5 วินาที จะทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เกิดการขาดเสถียรภาพ และเมื่อหลังจากเวลาที่ 1 วินาที ได้กำหนดให้วงจรอุปยกเล็กเริ่มทำงาน โดยที่ค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0.03 ตามผลที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส พบว่า ผลการกระเพื่อมของแรงดันบัสดีซีมีค่าลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งแสดงว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะกลับมามีเสถียรภาพเมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์มีค่าระดับกำลังไฟฟ้าที่ 320 W ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสที่ได้นำเสนอในบทนี้ สามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบ และวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} ที่ทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเริ่มกลับมามีเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เพียงแค่อาศัยการสร้างเส้นโคจรของคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะ I_{dc1} และ V_{dc} อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มีนำเสนอการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีอุปยกเล็กนั่นคือ เมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ได้มีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จะต้องทำให้ค่า K_{FB} มีค่าเพิ่มขึ้นไปจากเดิม เพื่อให้ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน ซึ่งในหัวข้อที่ 5.4 ของบทที่ 5 ได้มีการนำเสนอสมการคำนวณค่า K_{FB} ที่แปรเปลี่ยนไปตามผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยอาศัยจากการประมาณค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (7-2)

$$K_{FB} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\pi L_{dc} V_r P_{CPL,Total}}{2\sqrt{3}V_{bus,d}} \quad (7-2)$$

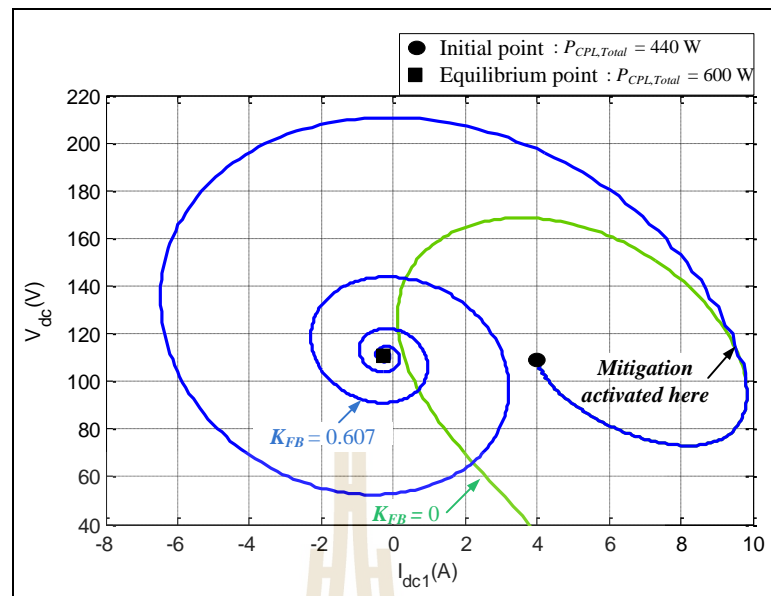
จากสมการที่ (7-2) จะเห็นได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ($P_{CPL,Total}$) มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า K_{FB} มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นในบทนี้จะนำวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสมาทำการยืนยันผลการปรับค่า K_{FB} จากสมการที่ (7-2) ที่แปรเปลี่ยนไปตามผลรวมระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุด โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงในลักษณะเช่นเดียวกันของรูปที่ 7.2 โดยกำหนดให้ $P_{CPL,Total}$ มีค่าเป็น 420 W, 520 W และ 600 W ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 7.4 - 7.6 ดังนี้



รูปที่ 7.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หระนาบเฟส เมื่อกำหนดให้ $K_{FB} = 0.421$ และผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักมีค่าเท่ากับ 420 W

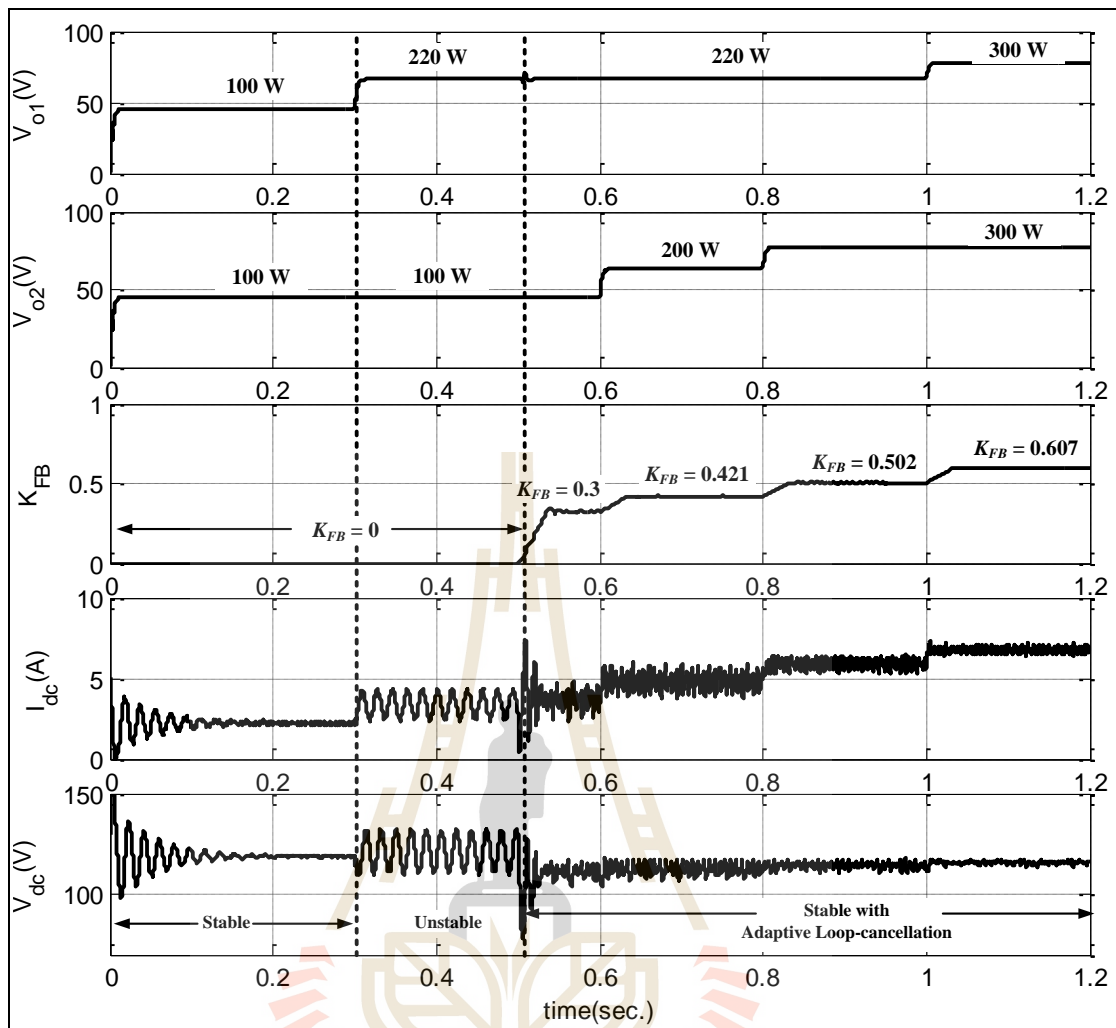


รูปที่ 7.5 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หระนาบเฟส เมื่อกำหนดให้ $K_{FB} = 0.502$ และผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักมีค่าเท่ากับ 520 W



รูปที่ 7.6 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เมื่อกำหนดให้ $K_{FB} = 0.607$ และผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักมีค่าเท่ากับ 600 W

จากรูปที่ 7.4 ถึงรูปที่ 7.6 จะสังเกตได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าระดับกำลังไฟฟ้าคงตัวของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักทั้ง 2 ชุด มีค่าเป็น 420 W, 520 W และ 600 W โดยที่ค่า K_{FB} เปลี่ยนแปลงไปตามสมการที่ (7-2) ซึ่งก็คือ 0.421, 0.502 และ 0.607 ที่เวลา 0.1 วินาที จะทำให้การโคจรของคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบเข้าสู่จุดปฏิบัติงานเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งก็คือ ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าสมการสำหรับการคำนวณค่า K_{FB} ที่ได้จากการประมาณค่าผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถคำนวณค่าดังกล่าวที่ทำให้วงจรการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีปวกเล็ก สามารถชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพเมื่อผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นก็ตาม ซึ่งผลการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์สำหรับระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวแสดงได้ดังรูปที่ 7.7 ดังนี้



รูปที่ 7.7 การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 7.7 จะเห็นได้ว่า เมื่อโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุด มีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดรวมเป็น 600 W ซึ่งเป็นค่าที่พิกัดของแหล่งจ่ายที่สามารถจ่ายได้สูงสุด จะทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 7.1 มีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน โดยดูได้จากการสั้นไกวของแรงดันบัคค์ซี ที่ไม่มีผลของการกระเพื่อมของแรงดัน เมื่อเทียบกับการเพิ่มของค่าโหลดกำลังไฟฟ้า และไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบควบคุม อีกทั้งผลของการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ระนาบเฟส ดังนั้น จึงยืนยันได้ว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการดังกล่าวสำหรับระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปลยกลีสามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ

7.3 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 7 นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคซ์กันานกัน ซึ่งระบบที่พิจารณาดังกล่าวจะมีโครงสร้างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็กเข้าไปในระบบ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ไว้แล้วในบทที่ 5 มาผ่านวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส โดยดำเนินการหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ด้วยฟังก์ชัน ode45 ของโปรแกรม MATLAB และนำคำตอบที่ได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบ I_{dc1} และ V_{dc} เพื่อใช้ในการคาดเดาจุดการทำงานของระบบว่ามีเสถียรภาพ หรือขาดเสถียรภาพ จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส และผลการยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็กและการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัว สามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ และเป็นวิธีการที่ง่ายสำหรับการนำไปใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยตรง

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกัน โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เริ่มจากการศึกษาค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมาคือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ และสุดท้ายคืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพรวมถึงงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้นถือเป็นพื้นฐานและองค์ความรู้ที่สำคัญอย่างยิ่งต่อผู้วิจัยสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งผลงานดังกล่าวได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 2

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งเป็นเนื้อหาในบทที่ 3 โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เริ่มจากการพิจารณาจากระบบอย่างง่าย นั่นคือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าแบบอุดมคติ ซึ่งระบบดังกล่าวสามารถดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นได้ โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง จากผลการวิเคราะห์และการยืนยันผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อทำการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าน้อยกว่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบส่งจ่าย นั่นคือ ระบบส่งจ่ายมีพิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 600 W แต่ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีระดับกำลังไฟฟ้าเป็น 320 W ซึ่งผลการขาดเสถียรภาพจะทำให้แรงดันเอาต์พุตบัสดีซีเกิดการแกว่งที่มีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา และจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบควบคุมให้แย่ลงได้ จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเพื่อทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถจ่ายโหลดได้สูงสุดเท่ากับพิกัดของระบบ โดยที่ไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการห้วงแบบแอกทีฟสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มอุปกรณ์การสวิตซ์เข้าไปใน

ระหว่างไดโอดเรียงกระแส และวงจรกรองแรงดันบัสดีซี หลังจากนั้นทำการตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพื่อมาปรับคณผ่านค่าอัตราขยายความต้านทานเสมือน (r_{LA}) และส่งค่าดังกล่าวไปลบกับวัฏจักรหน้าที่ (d_{act}) ซึ่งจะเปรียบเสมือนว่ามีค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของระบบและจะสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ โดยการวิเคราะห์ผลของค่า r_{LA} จะอาศัยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีคิวิและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อน จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีดังกล่าวสามารถให้ผลการตอบสนองของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์มีความถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น นั่นคือใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ซึ่งการวิเคราะห์ได้นำเสนอการเพิ่มขึ้นของค่า r_{LA} ปรากฏว่า การเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น จากการยืนยันผลความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟ สามารถทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทนี้มีเสถียรภาพที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีระดับกำลังไฟฟ้าที่มากกว่า 320 W อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของค่า r_{LA} จะมีผลต่อข้อจำกัดของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทนี้ ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.4 ของบทที่ 3 จะเห็นได้ว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอในบทนี้ สามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพสูงสุดมีค่าไม่เกิน 410 W โดยสาเหตุดังกล่าวเกิดจากการเพิ่มค่า r_{LA} ที่สูงขึ้นจะทำให้แรงดันบัสดีซีมีค่าลดลง ซึ่งจะทำให้เสถียรภาพของระบบมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน ดังนั้น เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอในบทนี้ สำหรับงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาต่อมาเป็นการนำเสนอวิธีการลูบยกเล็กมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้เช่นเดียวกัน

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 โดยระบบที่จะนำมาพิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะเป็นระบบที่พิจารณาเช่นเดียวกันในบทที่ 3 คือวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็กทำได้โดยศึกษาพฤติกรรมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งดูได้จากแผนภาพล๊อคไดอะแกรมที่ได้นำเสนอไว้ว่า กระแสไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (I_{CPL}) มีค่าเท่ากับ ระดับกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) หารด้วยขนาดของแรงดันเอาต์พุตบัสดีซี (V_{dc}) ซึ่งผลของค่าดังกล่าวจะ ไปลดทอนเสถียรภาพของระบบได้ ดังนั้นถ้าต้องการกำจัดผลของกระแสไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (I_{CPL}) นี้ออกไป จะต้องทำการตรวจจับขนาดแรงดันเอาต์พุตบัสดีซีแบบผกผัน เพื่อนำมาปรับคณด้วยอัตราขยาย (K_{FB}) พร้อมกับการหาอนุพันธ์ของค่าดังกล่าวและหลังจาก

นั้นนำไปบวกกับค่าวัฏจักรหน้าที (d^*) ซึ่งหลักการที่ได้อธิบายในส่วนนี้ ในงานวิจัยในอดีตจะเรียกว่า วิธีลูปยกเล็ก ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้โดยตรง และยังไม่มีการวิจัยในอดีตที่นำวิธีลูปยกเล็กมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะนำมาใช้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ โดยโครงสร้างการทำงานของวิธีลูปยกเล็กจะมีลักษณะคล้ายเคียงกับวิธีการหน่วงแบบแอกทิฟ นั่นคือ มีการเพิ่มอุปกรณ์การสวิตซ์เข้ามาในวงจร ซึ่งจะอยู่ระหว่างไดโอดเรียงกระแส และ วงจรกรอง สำหรับการวิเคราะห์ของค่าอัตราขยาย (K_{FB}) จะอาศัยการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีเดียวกันกับวิธีที่ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 3 โดยผลของค่าดังกล่าว เมื่อนำมาพิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง จะเห็นได้ว่าผลของการเพิ่มค่า K_{FB} จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น นั่นคือเมื่อค่า K_{FB} เพิ่มขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้มากกว่า 320 W อีกทั้งผลของค่าดังกล่าวที่สูงขึ้น จะมีผลต่อการแกว่งของแรงดันเอาต์พุตบัสดีซีให้มีค่าน้อยลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการที่ได้นำเสนอในบทนี้ สามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีประสิทธิผลมากกว่าวิธีการหน่วงแบบแอกทิฟ อย่างไรก็ตามผลของระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา และเมื่อระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น จะต้องทำการเพิ่มค่า K_{FB} โดยอาศัยการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน แต่อาจจะทำให้เกิดความยุ่งยาก และซับซ้อนสำหรับการนำไปโปรแกรมใช้งานจริง ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการพิสูจน์หาสมการอย่างง่ายสำหรับคำนวณหาค่า K_{FB} ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งเรียกว่า การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเล็ก โดยที่สมการของการคำนวณหาค่า K_{FB} จะอาศัยการประมาณค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ไว้แล้ว ซึ่งผลของการคำนวณหาค่าดังกล่าวนี้ สามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน โดยทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถจ่ายระดับกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่พิกัดของระบบ นั่นคือ 600 W โดยที่ไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเล็กที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 ถือเป็นองค์ความรู้ในส่วนที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวของระบบที่มีการต่อขนานของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม ซึ่งถือว่า โหลดดังกล่าวมีพฤติกรรมเหมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและเป็นระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

การสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวสำหรับเนื้อหาในบทที่ 5 จะเป็นวงจรชนิดเดียวกันกับวงจรที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 แต่จะมีส่วนที่เพิ่มเติมไปจากเดิมคือ ได้นำวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมมาแทนที่ในส่วนของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เพื่อทำให้ระบบไฟฟ้าที่

พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถนำมาสร้างใช้งานจริงได้ และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น โดยการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวจะใช้วิธีลูปลูกเล็กมากำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพ ซึ่งในเบื้องต้น ได้นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีเดียวกันที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 และ 4 จากการยืนยันผลการวิเคราะห์ของค่าดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่า K_{FB} มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น และผลของค่าดังกล่าวที่ทำให้ระบบเริ่มกลับมามีเสถียรภาพ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 นั่นคือ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปลูกเล็กสามารถทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพโดยพิจารณาค่า K_{FB} เดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อดีในการนำวิธีลูปลูกเล็กมาใช้สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพกับระบบที่ได้นำเสนอไว้ในบทนี้ โดยไม่คำนึงว่าโหลดที่จะมาเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีเป็นชนิดใดก็ตาม ดังนั้นจึงสามารถนำสมการอย่างง่ายของการคำนวณค่า K_{FB} ที่ได้รับการพิสูจน์ไว้ในบทที่ 4 มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 5 จากการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปลูกเล็ก สามารถจ่ายโหลดให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการต่อขนานทั้ง 2 ชุด จนมีค่าระดับกำลังไฟฟารวมเป็น 600 W ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี อย่างไรก็ตามการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์อาจไม่พอเพียงต่อความน่าเชื่อถือมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ดำเนินการสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปลูกเล็ก เพื่อยืนยันผลการพิสูจน์ในทางทฤษฎี การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ให้มีความถูกต้องแม่นยำ และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปลูกเล็ก จะเป็นเนื้อหาในบทที่ 6 ซึ่งในเบื้องต้นได้ดำเนินการอธิบายอุปกรณ์ของแต่ละวงจรที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูลที่สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตได้ ไดโอดเรียงกระแสสามเฟส วงจรกรองแรงดันบัสดีซีที่มีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นองค์ประกอบ วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานฝั่งขาออก ซึ่งภายในของวงจรดังกล่าวจะมีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MAGA 1280 เป็นตัวควบคุมการทำงาน และอุปกรณ์สุดท้ายที่เป็นจุดเด่นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้คือ วงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีลูปลูกเล็ก ซึ่งภายในของวงจรมีการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรทางแอนะล็อกและวงจรทางดิจิทัล ทั้งนี้การนำทั้ง 2 วงจรมาใช้ร่วมกันเพื่อให้วงจรถูกเล็กมีการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวให้มีสมรรถนะที่ดี โดยที่วงจรทางดิจิทัลจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ซึ่งเป็นบอร์ดชนิดเดียวกันที่ใช้กับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ในการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการติดตั้งเซนเซอร์สำหรับการคำนวณค่า K_{FB}

และส่งค่าดังกล่าวไปยังวงจรทางแอนะล็อกเพื่อทำการหาอนุพันธ์ของสัญญาณตามกระบวนการของวิธีลูปลักษณ์ที่ได้รับการนำเสนอในบทที่ผ่านมา ซึ่งโครงสร้างการทำงานของวงจรดังกล่าวได้มีการอธิบายไว้พอสมควร สำหรับการสร้างเสถียรภาพจากชุดทดสอบในบทนี้ได้ดำเนินการไว้ 2 กรณี โดยกรณีแรกทดสอบโดยการสร้างเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า K_{FB} เพื่อแสดงถึงสมรรถนะการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่สามารถทำงานด้วยการโปรแกรมค่า K_{FB} ที่สอดคล้องกับค่าที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้จากที่มีสถานะการขาดเสถียรภาพเนื่องจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว แต่กลับทำให้ระบบดังกล่าวกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้งภายหลังที่วงจรลูปลักษณ์เริ่มทำงาน และกรณีที่ 2 เป็นการทดสอบการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับค่า K_{FB} ตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า วงจรการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูปลักษณ์ สามารถทำให้ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานโดยไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นภายใต้พิกัดของระบบ ในที่นี้คือ 600 W อีกทั้งยังทำให้สมรรถนะการทำงานระบบควบคุมของโหลดดียิ่งขึ้น

ในลำดับสุดท้ายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เพิ่มเติมในส่วนการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นเนื้อหาในบทที่ 7 โดยได้กล่าวถึงการนำเสนอการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ไว้แล้วในบทที่ 5 มาผ่านวิธีการวิเคราะห์ระบบเฟส โดยดำเนินการหาคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยฟังก์ชัน ode45 บนโปรแกรม MATLAB จากนั้นนำผลคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีความสัมพันธ์กับชั่วเด้น นั่นคือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะของชั่วเด้น เพื่อดูการเคลื่อนที่ของตำแหน่งคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ว่า เข้าสู่จุดปฏิบัติการแบบพอสแตียร์หรือเคลื่อนที่ออกห่างจากจุดปฏิบัติการมากขึ้นอย่างไม่มีที่สิ้นสุดที่เวลาผ่านไป ซึ่งจะเป็นการบ่งบอกว่าระบบมีเสถียรภาพ หรือขาดเสถียรภาพ และนั่นคือข้อดีสำหรับวิธีนี้ที่สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยตรงและเหมาะกับระบบไฟฟ้าที่มีการต่อขนานของโหลดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ตัวแปรสถานะของระบบมีการเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในเบื้องต้นของบทนี้ ได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูปลักษณ์สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน มาผ่านวิธีการวิเคราะห์ระบบเฟส โดยแบ่งออกการวิเคราะห์เป็น 2 กรณีคือ กรณีแรกนำมาวิเคราะห์จุดการทำงานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ทำให้ระบบเริ่มขาดเสถียรภาพ และวิเคราะห์ผลของค่า K_{FB} ที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพ สำหรับกรณีที่ 2 ได้นำมาพิจารณาการวิเคราะห์ผลจากสมการคำนวณหาค่า K_{FB} ที่แปรเปลี่ยนไปตามระดับของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวซึ่งมีการพิสูจน์ไว้แล้วในบทที่ 4 จากการยืนยันผลด้วยจำลอง

สถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวสามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ และมีความซับซ้อนน้อยกว่าการใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะมาทำการวิเคราะห์เสถียรภาพ และเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการนำวิธีการวิเคราะห์ระบบเฟสไปวิเคราะห์เสถียรภาพกับระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต

8.2 สรุปจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

- ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน โดยใช้วิธีดิลิว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการทำแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพได้ง่ายโดยอาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นและวิธีการไม่เป็นเชิงเส้นได้ นั่นคือ การใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะมาพิจารณาเสถียรภาพของระบบ และการใช้วิธีการวิเคราะห์ระบบเฟส อีกทั้งยังสามารถนำวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ นำเสนอไว้แล้วมาพิสูจน์ใช้กับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทิฟและวิธีลูบยกเล็ก ซึ่งแบบจำลองที่ได้สามารถนำมาใช้การคาดเดาจุดการทำงานของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

- ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงให้เห็นว่า วิธีการหน่วงแบบแอกทิฟมีข้อจำกัดสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่สูงขึ้น ซึ่งสาเหตุดังกล่าวเกิดจากการเพิ่มค่าความต้านทานเสมือน (r_{LA}) ที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้แรงดันเอาต์พุตบัคค์ซีมีค่าลดลง โดยการลดลงของค่าดังกล่าวจะทำให้เสถียรภาพของระบบแย่ลง แต่ข้อดีของวิธีการนี้คือ ไม่มีกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ และสามารถนำไปสร้างใช้งานจริงได้ ไม่ซับซ้อน รวมถึงนำไปประยุกต์ใช้กับระบบต่างๆ ได้ง่าย

- ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำวิธีการลูบยกเล็กมาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน ซึ่งยังไม่พบเห็นในงานวิจัยในอดีตที่นำวิธีการดังกล่าวมาพิจารณากับวงจรแปลงผันเอชเป็นดีซี และยังไปกว่านั้นได้นำเสนอผลการปรับค่า K_{FB} ที่แปรเปลี่ยนไปตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยสมการอย่างง่าย เพื่อทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีค่าระดับกำลังไฟฟ้าเท่ากับพิกัดของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี โดยไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพที่ระบบมีการจ่ายโหลดที่สูงขึ้น หรือมีเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าแบบฉับพลันก็ตาม

- ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็ก เพื่อยืนยันผลจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ให้มีความน่า

เชื่อมากขึ้น และเป็นแนวทางของการนำวงจรอุปยกเล็กที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งวิธีการออกแบบของการสร้างวงจรได้มีอธิบายการทำงานของวงจรไว้ อย่างละเอียด รวมถึงองค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MAGA 1280 และเทคนิคการเลือกใช้อิเล็กทรอนิกส์สำหรับการนำไปใช้งานของแต่ละวงจร

8.3 ข้อเสนอแนะเพื่องานวิจัยในอนาคต

- ควรมีการพิจารณาระบบไฟฟ้าที่สอดคล้องกับโครงสร้างที่มีสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ ดังเช่น ระบบไฟฟ้าแบบไฮบริดจ์ในรถยนต์ ระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน เรือดำน้ำ หรือระบบไฟฟ้าที่มีการนำพลังงานทดแทนมาใช้ในปัจจุบัน เพื่อแสดงถึงการนำองค์ความรู้ที่ได้รับมาใช้ในการประยุกต์

- ควรมีวิธีการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าบัลติซี (V_{dc}) และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลด (I_{CPL}) จากตัวอุปกรณ์เซนเซอร์ให้มีความแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากผลของการกระเพื่อมของรูปสัญญาณ จะทำให้การอ่านค่าดังกล่าวจากเซนเซอร์ส่งผลต่อการคำนวณหา K_{FB} ซึ่งจะทำให้ผลของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพมีความคาดเคลื่อนได้จากการผลการพิสูจน์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

- ควรมีวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยอาศัยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method) เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความหลากหลาย และสามารถประมาณขอบเขตการมีเสถียรภาพได้

- ควรมีการพิจารณาโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่นำมาต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีให้มีความหลากหลายดังเช่น โหลดวงจรที่มีการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หรือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อให้มีความสอดคล้องกับระบบที่มีอยู่ในอุตสาหกรรม

รายการอ้างอิง

- เทพพนม โสภานเพิ่ม (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.

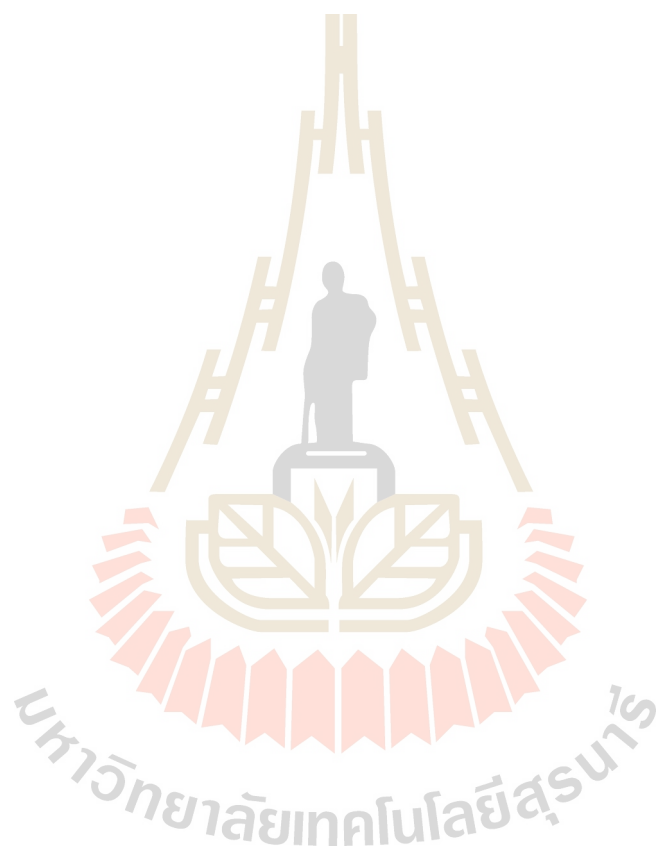
- Emadi A., Fahimi B. and Ehsani M. (1999). On the Concept of Negative Impedance Instability in the More Electric Aircraft Power Systems with Constant Power Loads. **Soc. Automotive Eng. Journal.** : 689-699.
- Emadi A. (2004). Modeling and Analysis of Multi-converter DC Power Electronic Systems Using 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.
- Khalil H.K. (1996). "Nonlinear systems", 2nd Ed., Prentice Hall
- Kondratiev I., Santi E., Dougal R. and Veselov G. (2004). Synergetic control for DC-DC buck converter with constant power load. in **Proc. IEEE 35th Power Electro. Spec. Conf.** : 3758-3764.

- Khaligh A., Rahimi A. M. and Emadi A. (2008). Modified pulse-adjustment technique to control DC/DC converter driving variable constant-power loads. **IEEE Trans. Ind. Electron.** 55(3):1133-1146.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Rivetta C. H., Emadi A., Williamson G. A., Jayabalan R. and Fahimi B. (2006). Analysis and control of a buck DC-DC converter operating with constant power load in sea and undersea vehicles. **IEEE Trans. Ind. Appl.** 42(2):559-572
- 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 Overcom 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.

- Santi E., Li D., Monti A. and Stankovic A.M. (2005). A geometric approach to large-signal stability of switching converter under sliding mode control and synergetic control in **Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.** :1389-1395.
- 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.
- Sopapirm T., Areerak K-N and Areerak K-L. (2012). The identification of AC-DC power system parameter using an adaptive tabu search technique. **International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)**. 7(4):4655-4662.
- Tsang, K.M., and Chan, W.L. (2005). Cascade controller for DC/DC buck convertor. **IEE 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.
- 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.
- 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.
- Xiaogang F., Jinjun L. and Lee F. C. (2002). Impedance specifications for stable DC distributed power systems. **IEEE Trans. Power Electron**. 17(2):157-162.
- Xinyun L., Forsyth A. J. and Cross A. M. (2007). Negative input-resistance compensator for a constant power loads. **IEEE trans. Ind. Electron**. 54(6):3188-3196.

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.



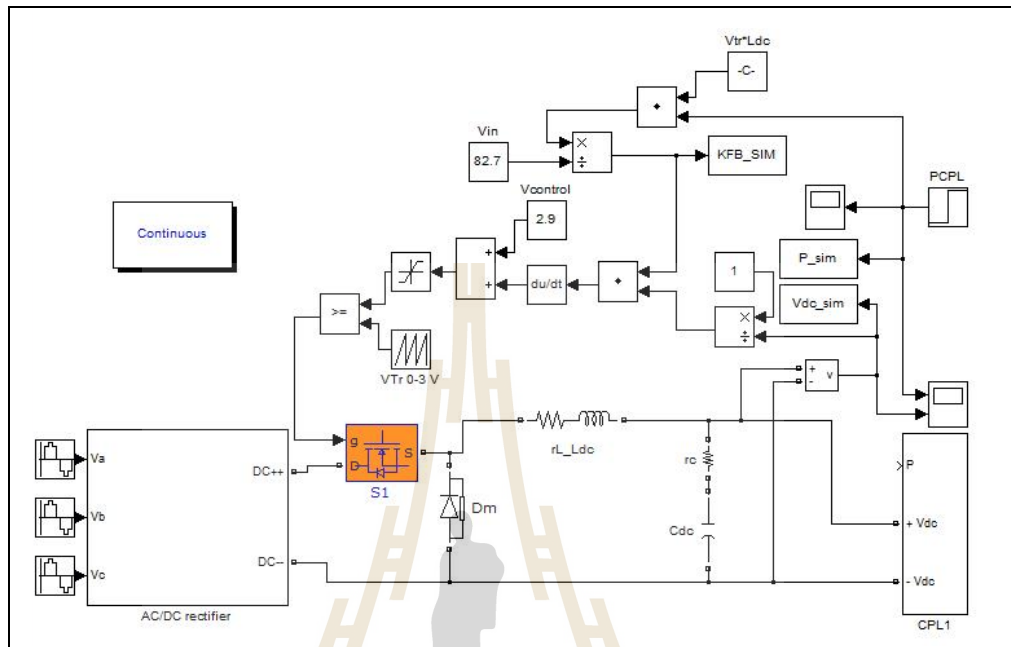


ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบของการปรับค่าแรงดันควบคุม ($V_{control}$)
ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

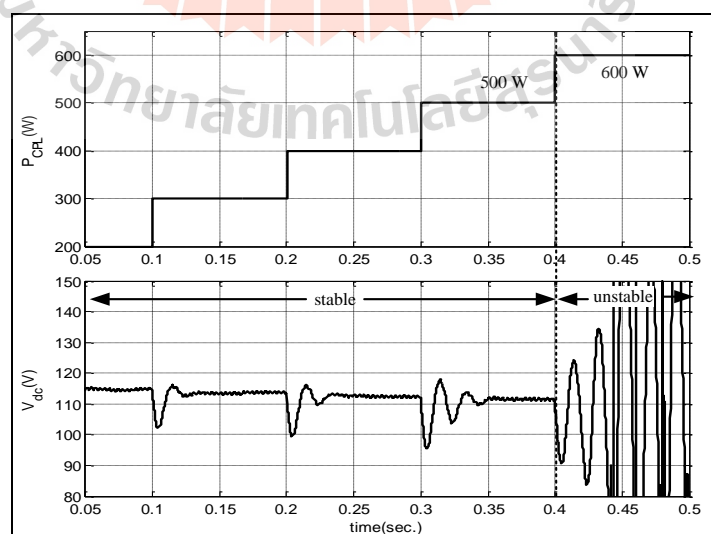
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การทดสอบหาค่าแรงดันควบคุม ($V_{control}$) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งแสดงการต่อวงจรได้ดังรูปที่ ก.1 ได้ดังนี้



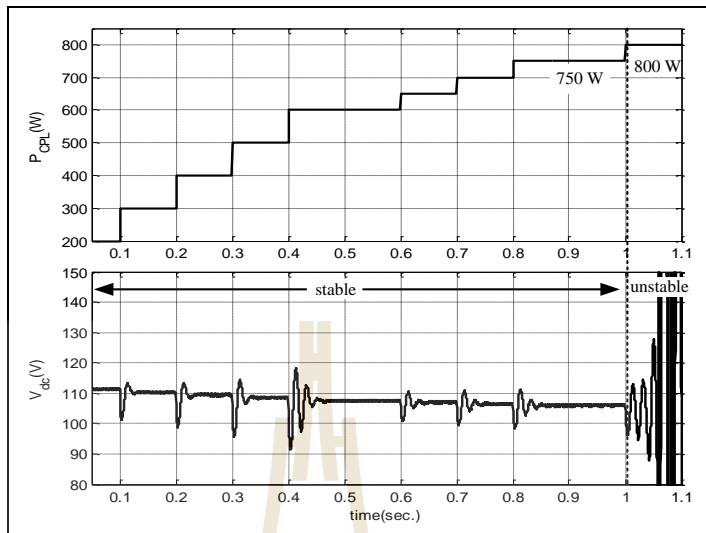
รูปที่ ก.1 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

- ผลการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กเมื่อ $V_{control} = 2.95 \text{ V}$



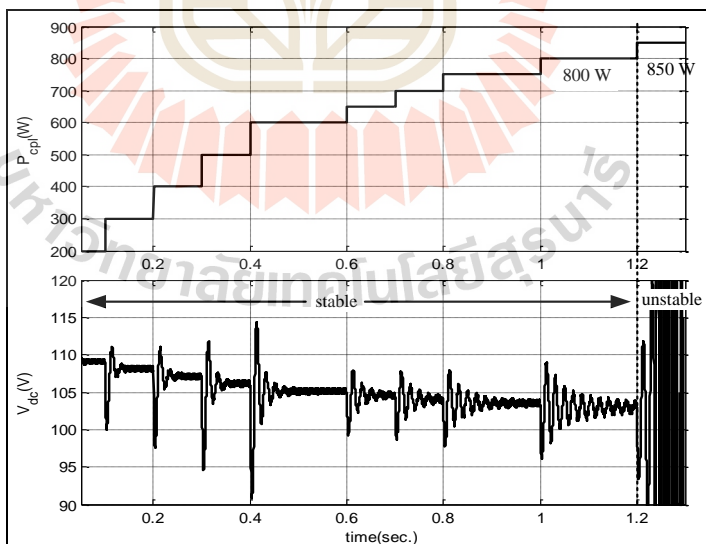
รูปที่ ก.2 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.95 \text{ V}$

- ผลการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กเมื่อ $V_{control} = 2.9 \text{ V}$



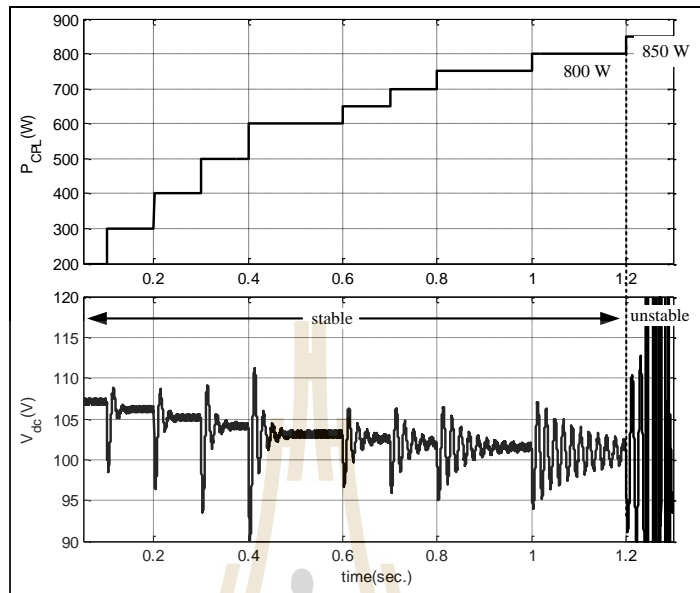
รูปที่ ก.3 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.9 \text{ V}$

- ผลการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กเมื่อ $V_{control} = 2.85 \text{ V}$



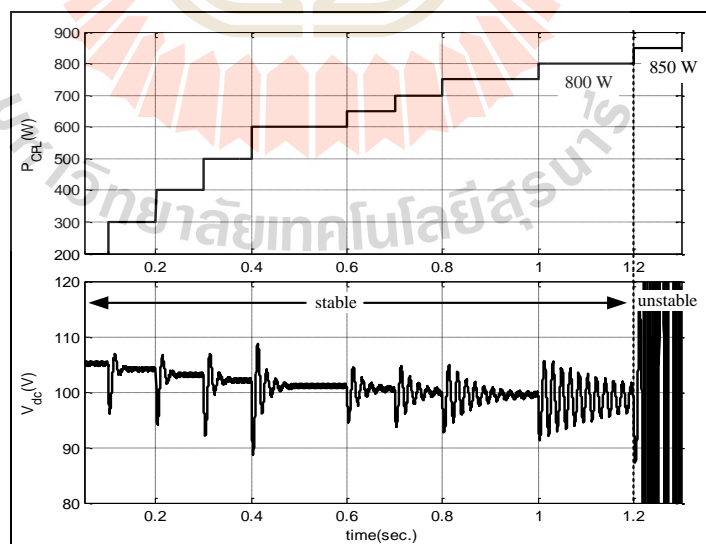
รูปที่ ก.4 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.85 \text{ V}$

- ผลการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กเมื่อ $V_{control} = 2.8$ V



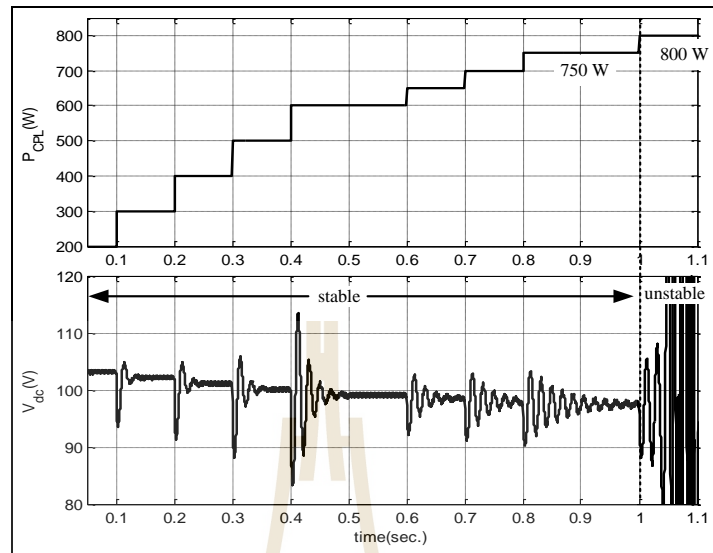
รูปที่ ก.5 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.8$ V

- ผลการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กเมื่อ $V_{control} = 2.75$ V



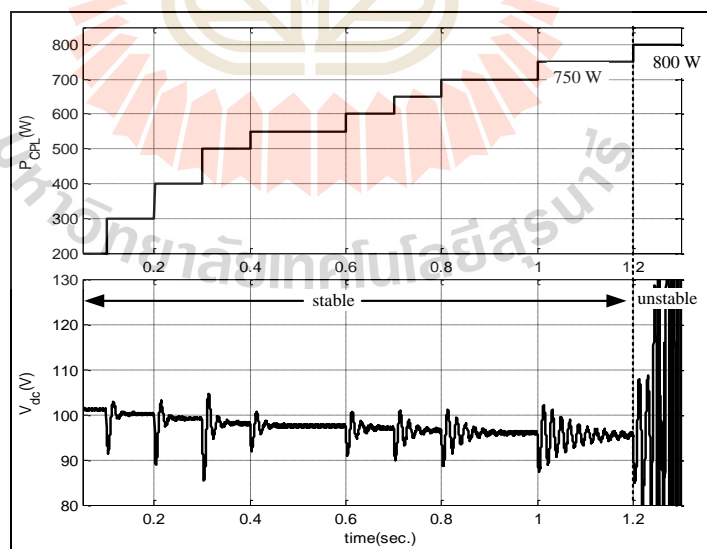
รูปที่ ก.6 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.75$ V

- ผลการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กเมื่อ $V_{control} = 2.7$ V



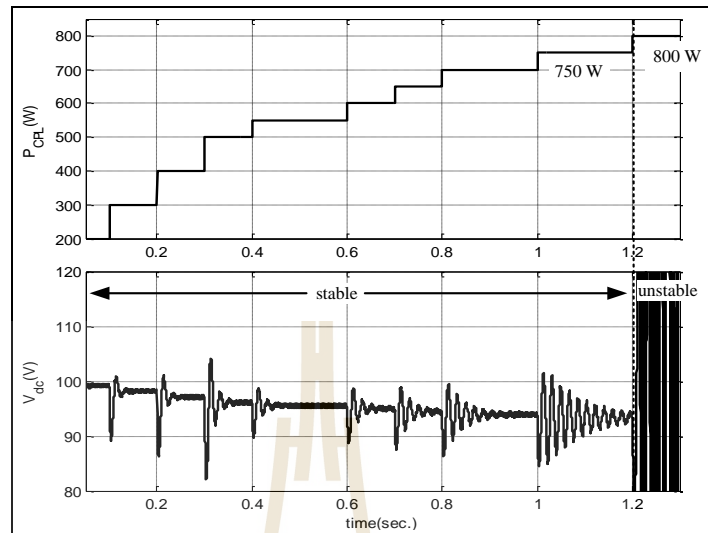
รูปที่ ก.7 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.7$ V

- ผลการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กเมื่อ $V_{control} = 2.65$ V



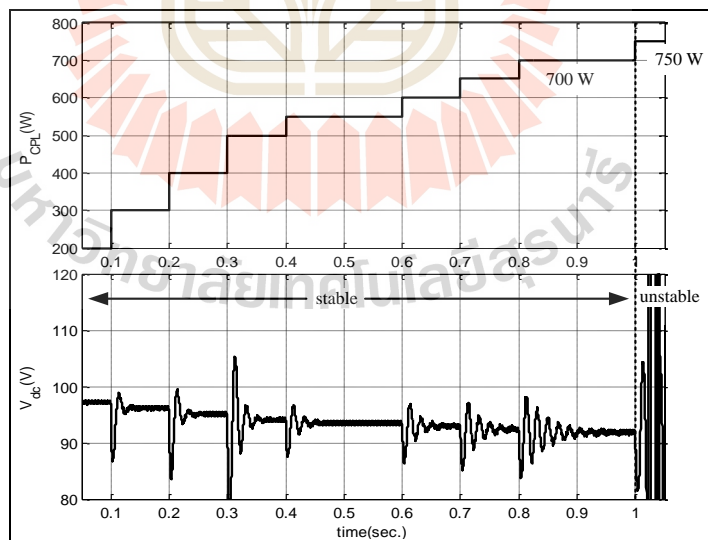
รูปที่ ก.8 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.65$ V

- ผลการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กเมื่อ $V_{control} = 2.6$ V



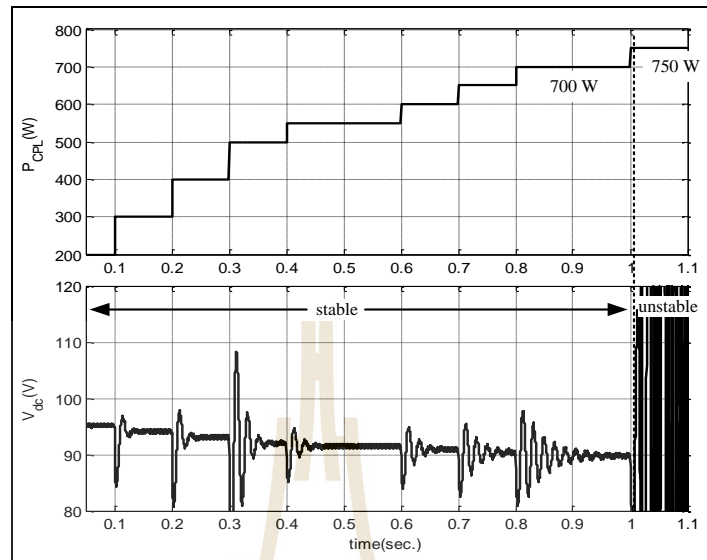
รูปที่ ก.9 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.6$ V

- ผลการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กเมื่อ $V_{control} = 2.55$ V



รูปที่ ก.10 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.55$ V

- ผลการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กเมื่อ $V_{control} = 2.5$ V



รูปที่ ก.11 ผลการจำลองสถานการณ์เมื่อกำหนดให้ $V_{control} = 2.5$ V

จากรูปที่ ก.2 ถึงรูปที่ ก.11 จะเห็นได้ว่าการสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กสำหรับวงจรเรียงเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ สามารถทำให้ระบบไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 800 W ที่ $V_{control}$ มีค่าอยู่ในช่วง 2.75-2.85 และค่า $V_{control}$ ลดลงจะส่งผลต่อแรงดันเอาต์พุตบัสดีซีมีค่าลดลงด้วย แต่สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีพิกัดของระบบอยู่ที่ 600 W ดังนั้นค่า $V_{control}$ ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์คือ $V_{control}$ มีค่าเท่ากับ 2.9 และเป็นค่าที่ทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงไปจากเดิมน้อยที่สุด

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. At the top, it features a stylized golden structure resembling a traditional Thai roof or a tiered stupa. Below this, a grey silhouette of a person stands on a pedestal. The base of the emblem is a golden lotus flower with multiple petals. Surrounding the lotus is a decorative border of red and orange triangular shapes. The university's name is written in Thai script around the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ข.

รายละเอียดการพิสูจน์การประมาณค่าของสมการที่ (4-5)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากสมการที่ (4-5) ในบทที่ 4 แสดงได้ดังนี้

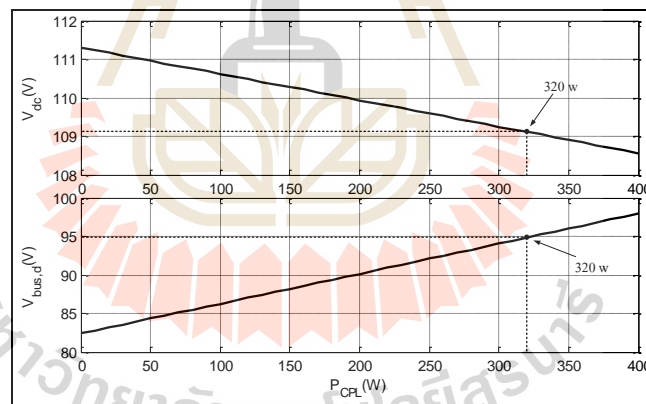
$$\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}V_{tr}}{\pi C_{eq} \left(V_{control} - K_{FB} \left(\frac{\dot{V}_{dc}}{V_{dc}^2} \right) \right)} I_{dc1} + \frac{18K_{FB}}{\pi^2 C_{eq} L_{dc}} \frac{1}{\left(V_{control} - K_{FB} \left(\frac{\dot{V}_{dc}}{V_{dc}^2} \right) \right)} \frac{V_{bus,d}}{V_{dc}}$$

จากสมการที่ (4-5) สามารถกำหนดให้ $K_{FB} \left(\frac{\dot{V}_{dc}}{V_{dc}^2} \right) = 0$ เนื่องจาก มีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับ

กับ $V_{control}$ ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

$$\text{การคำนวณค่า } K_{FB} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\pi L_{dc} V_{tr} P_{CPL}}{V_{bus,d}} \text{ โดยกำหนดให้ } P_{CPL} = 320 \text{ W, } L_{dc} = 37.7$$

mH, $V_{tr} = 3 \text{ V}$, $V_{control} = 2.9$ จากการคำนวณค่าในสภาวะคงตัวจะได้ $V_{bus,d,o} = 95 \text{ V}$ และ $V_{dc,o} = 109.1 \text{ V}$ แสดงดังรูปที่ 4 ดังนี้



รูปที่ ข.1 ผลการคำนวณค่าในสภาวะอยู่ตัว

ดังนั้น จะได้ $K_{FB} = 0.2792$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า จะได้ } K_{FB} \left(\frac{\dot{V}_{dc}}{V_{dc}^2} \right) &= 0.2792 \left(\frac{\dot{V}_{dc}}{109.1^2} \right) \\ &= 2.0658 \times 10^{-5} \times \dot{V}_{dc} \text{ ซึ่ง } \ll V_{control} \end{aligned}$$



ภาคผนวก ค.

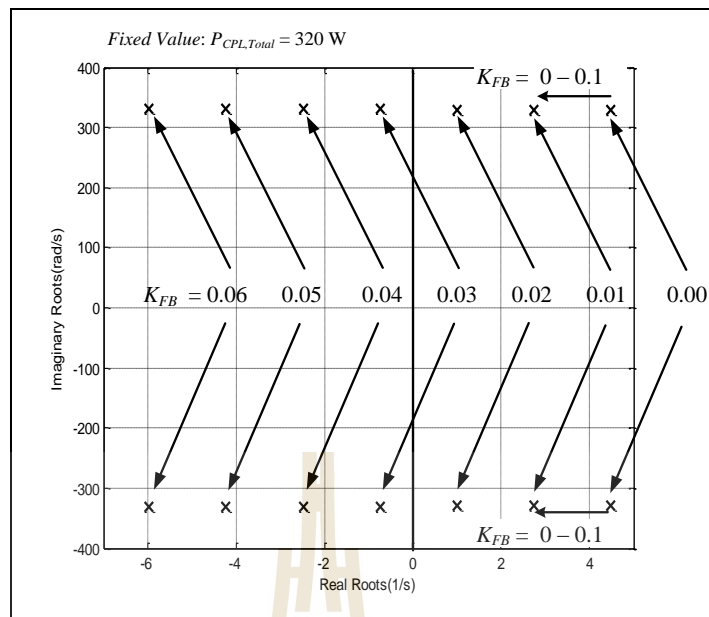
ผลการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} ที่ปรากฏอยู่ในตัวแปรสถานะ $V_{bus,d}$ และ I_{dc}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

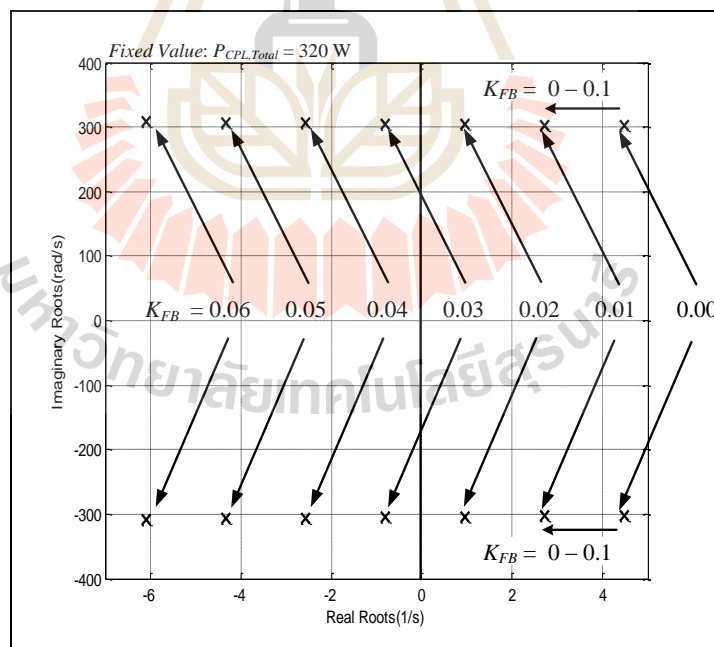
การสร้างเสถียรภาพแบบปรับตัวด้วยวิธีลูบเกลินในบทที่ 4 จะเห็นได้ว่า ได้มีการประมาณค่า K_{FB} สำหรับการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ด้วยสมการอย่างง่าย โดยพิจารณาเพียงตัวแปรสถานะเพียงตัวเดียวนั้นคือ V_{dc} แต่ภายในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่า K_{FB} ปรากฏอยู่ภายในตัวแปรสถานะ $V_{bus,d}$ และ I_{dc} ซึ่งได้ถูกละทิ้งเนื่องจากไม่มีผลต่อเสถียรภาพ ดังนั้นในภาคผนวก ค. นี้จะดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพเปรียบเทียบผลการพิจารณาค่า K_{FB} ที่ปรากฏอยู่ภายในตัวแปรสถานะ $V_{bus,d}$ และ I_{dc} และที่ไม่นำมาพิจารณา โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการพิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแสดงได้ดังสมการที่ (ค-1) ดังนี้

$$\begin{cases} \dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\ \dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}V_{ir}}{\pi C_{eq} V_{control}} I_{dcl} + \frac{18K_{FB}}{\pi^2 C_{eq} L_{dc} V_{control}} \frac{V_{bus,d}}{V_{dc}} \\ \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\ \dot{I}_{dcl} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}V_{control} V_{bus,d}}{\pi L_{dc} V_{ir}} - \frac{(r_{\mu} + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dcl} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}(r_{\mu} + r_L + r_c) K_{FB}}{\pi L_{dc}^2 V_{ir}} \frac{V_{bus,d}}{V_{dc}} \\ \quad + \frac{r_c P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc}} \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dcl} - \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc}} + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc} C_{dc}} \left(\frac{K_{FB}}{V_{dc} V_{ir}} \right) V_{bus,d} \end{cases} \quad (ค-1)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการที่ (ค-1) จะเห็นได้ว่า มีค่า K_{FB} ปรากฏอยู่ภายในตัวแปรสถานะ $V_{bus,d}$, I_{dc} และ V_{dc} ซึ่งผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_{FB} แสดงได้ดังรูปที่ ค.1 และรูปที่ ค.2 เป็นกรณีที่กำหนดให้ค่า K_{FB} มีค่าเท่ากับ 0 ภายในตัวแปรสถานะ $V_{bus,d}$ และ I_{dc} ซึ่งผลการวิเคราะห์จะกำหนดให้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าคงที่ 320 W



รูปที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อพิจารณาค่า K_{FB} ปรากฏ
 อยู่ภายในตัวแปรสถานะ $V_{bus,d}$, I_{dc} และ V_{dc}



รูปที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อพิจารณาค่า K_{FB} ปรากฏ
 อยู่ภายในตัวแปรสถานะ V_{dc} เพียงอย่างเดียว

จากรูปที่ ค.1 และ ค.2 จะเห็นได้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพมีความสอดคล้องกันนั่นคือเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 320 W จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และระบบจะกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้งจะต้องกำหนดค่า K_{FB} มีค่าเท่า 0.03 ซึ่งผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 กรณี จะแสดงให้เห็นว่า ค่า K_{FB} ที่ปรากฏอยู่ในตัวแปรสถานะ $V_{bus,d}$ และ I_{dc} ไม่มีผลต่อเสถียรภาพ ดังนั้นการสร้างสมการอย่างง่ายสำหรับการประมาณค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถดำเนินการวิเคราะห์ผลการปรับค่า K_{FB} ได้จากสมการของตัวแปรสถานะ V_{dc} ได้โดยตรง





ภาคผนวก ง.

โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราฟสัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

*****
ก. โปรแกรมการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวัตน์ - رافสัน สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟส
แบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ โดยนายเทพพนม โสกาเพิ่ม
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2560
*****

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

%%อุปโปรแกรมการค้นหาคำด้วยวิธีของนิวัตน์ - رافสัน%%
while eaVbus>=es & ealampda>=es
    if k~=0
        du= Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*cosd(r)/Z;
        DU=Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z;
        dv= Vs*sind(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*sind(r)/Z;
        DV=-Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z;
        U= Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*cosd(r)/Z - P_Total/3;
    end
    k=k+1;
end

```

```

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

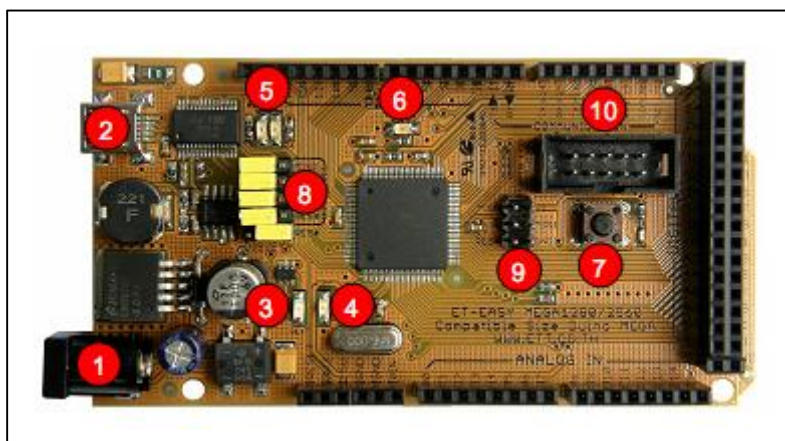
```



ภาคผนวก จ.

โครงสร้างชุดบอร์ด ET-EASY MAGA1280

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ จ.1 โครงสร้างบอร์ด ET-EASY MEGA1280

- หมายเลข 1 คือ ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงจากภายนอก สามารถใช้ได้กับแหล่งจ่ายทั้งแบบ AC และ DC พร้อมวงจร Bridge Rectifier และ Regulate แบบ Switching ช่วยลดความร้อนของ IC Regulate เมื่อมีการดึงกระแสมากๆได้เป็นอย่างดี สามารถใช้กับแรงดัน Input 7-20V

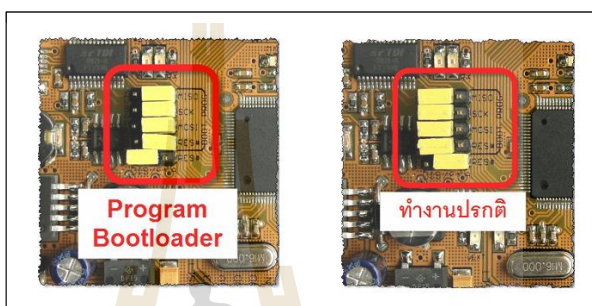
- หมายเลข 2 เป็นขั้วต่อ USB สำหรับติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ PC โดยใช้ FT232RL เป็น USB Bridge ในการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ PC และ MCU ในบอร์ด และยังสามารถใช้ไฟจาก พอร์ต USB เป็นแหล่งจ่ายให้กับบอร์ดได้ด้วย โดยจะมี Poly Fuse ขนาด 500 mA สำหรับป้องกันการดึงกระแสเกินจากพอร์ต USB ด้วย และที่พิเศษคือมีวงจรสำหรับตรวจสอบแหล่งจ่าย เพื่อสลับการใช้งานแหล่งจ่ายจาก USB ไปเป็น External Supply ได้เอง โดยอัตโนมัติ โดยเมื่อไม่ได้ต่อ External Supply บอร์ดจะใช้ไฟจากพอร์ต USB เป็นแหล่งจ่ายในการทำงาน แต่เมื่อมีการต่อ External Supply วงจรจะสลับไปใช้แหล่งจ่ายจาก External Supply เองโดยอัตโนมัติ โดย LED +VCC ใช้แสดงสถานะเมื่อมีการจ่ายไฟให้กับบอร์ด และ LED VEXT ใช้แสดงสถานะเมื่อมีการจ่ายไฟจาก External Supply

- หมายเลข 3 เป็น LED VEXT ใช้แสดงสถานะเมื่อมีการจ่ายไฟเลี้ยงจาก External Supply

- หมายเลข 4 เป็น LED +VCC ใช้แสดงสถานะของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง (+VCC) ของบอร์ด โดยเมื่อบอร์ดใช้แหล่งจ่ายจาก External Supply จะแสดงสถานะ โดยการให้ LED VEXT และ LED +VCC ติดสว่างพร้อมกันทั้งคู่ แต่ถ้าบอร์ดใช้แหล่งจ่ายจากพอร์ต USB จะแสดงสถานะ โดยการให้ LED +VCC ติดสว่างเพียงดวงเดียว

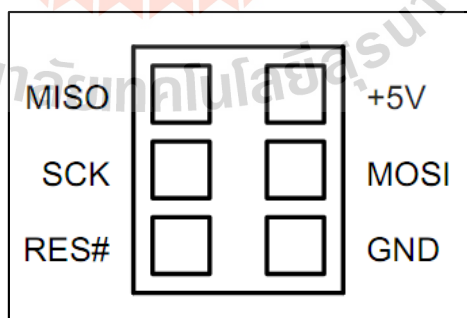
- หมายเลข 5 เป็น LED แสดงสถานะของ RX และ TX ใช้สำหรับแสดงการรับส่งข้อมูลระหว่างบอร์ด ET-EASY MEGA1280 กับคอมพิวเตอร์ PC ผ่านทางพอร์ต USB

- หมายเลข 6 เป็น LED D13 ใช้สำหรับแสดงการทำงานของ Bootloader และ ใช้ทดสอบการทำงานของบอร์ดจากการควบคุมของ 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 จ.2 Jumper สำหรับเลือก การ Program Bootloader

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



รูปที่ ก.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 ฉ.

พอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น ET-EASY MEGA1280

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Port A (PA7...PA0)

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

Port B (PB7...PB0)

พอร์ต B เป็นไอ/โอพอร์ตแบบทำงาน 2 ทิศทาง ขนาด 8 บิต ที่มีวงจรถวลล์อ์พอยู่ภายใน (เลือกได้เป็นรายบิต) สามารถทำงานเป็นเอาต์พุตได้ทั้งแบบซิงค์และซอร์ส จุดเด่นของพอร์ตนี้ก็คือ เป็นพอร์ตที่มีความสามารถในการขับกระแสได้ดีกว่าพอร์ตอื่นๆ

Port C (PC7...PC0)

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

Port D (PD7...PD0)

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

Port E (PE7...PE0)

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

Port F (PF7...PF0)

พอร์ต F รองรับการนำเข้าไปทำการแปลงสัญญาณแอนาล็อกมาเป็นดิจิตอล

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

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

Port G (PG5...PG0)

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

Port H (PH7...PH0)

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

Port J (PJ7...PJ0)

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

Port K (PK7...PK0)

พอร์ต K รองรับการนำเข้าเพื่อทำการแปลงสัญญาณแอนาลอกมาเป็นดิจิตอล

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

Port L (PL7..PL0)

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





ภาควิชา

โปรแกรมภาษา C++ ด้วย Arduino

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

*****
ช. โปรแกรมการควบคุมวงจรลูปลูกเล็ก ด้วยชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR
โดยนายเทพพนม โสภานเพิ่ม สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
พ.ศ. 2560
*****

%%%ประกาศฟังก์ชันมาตรฐานการใช้บอร์ด AVR%%%

#include <avr/io.h>

#include <compat/deprecated.h>

#include <LCD_4BIT.h>

%%%ประกาศตัวแปรเริ่มต้น%%%
int voltage_sensor = 0;  %กำหนดรับอินพุตสัญญาณแอนะล็อกที่พิน A0
int EN = 11;            %กำหนดให้พินที่ D11 สำหรับส่งสัญญาณ PWM
float Vcontrol = 2.9;
float Vtr = 3;
float KFB = 0.01;
int Read_Voltage = 0, d=0, d1=0;
%%%ประกาศชื่อตัวแปรของขาพินสำหรับฟังก์ชัน MCP4922%%%
/////////Digital to analog/////////

int CS = 8;
int SCK = 52;
int SDI = 51;
int LDAC = 9;
int SHDN = 10;

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;
}
%%%ประกาศฟังก์ชันการใช้งานบอร์ด MCP4922
void Write_MCP4922(unsigned char DAC_Channel,unsigned int DAC_Data)
{
digitalWrite(CS, LOW);
switch (DAC_Channel)
Channel(0=A,1=B)
{
case 0x00: DAC_Data |= 0x3000;
break;
case 0x01: DAC_Data |= 0xB000;
break;
}
}

```

```
shiftOut(SDI, SCK, MSBFIRST,(DAC_Data >> 8)& 0xFF);
shiftOut(SDI, SCK, MSBFIRST,DAC_Data & 0xFF);
digitalWrite(CS, HIGH);
digitalWrite(LDAC, LOW);
digitalWrite(LDAC, HIGH);
}
void loop()
{
    %%วิธีการคำนวณของกระบวนการของวิธีปลูกเล็ก%%
    Read_Voltage = analogRead(voltage_sensor)*2.5;
    Vcontrol =Vcontrol-(KFB* (1/Read_Voltage));
    d=Vcontrol/Vtr;
    Write_MCP4922(1,d);
}
```




ภาคผนวก ซ.

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Sopapirm, T., Areerak, K-N., Areerak, K-L. (2012). **The Identification of AC-DC Power System Parameters Using an Adaptive Tabu Search Technique**. International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E). 7(4): 4655-4662.

เทพพนม โสภานเพิ่ม, กองพันธ์ อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์. การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37, ขอนแก่น, 19-21 พฤศจิกายน 2557, Vol. 2

เทพพนม โสภานเพิ่ม, กองพันธ์ อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์. การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการป้อนกลับแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, อุบลราชธานี, 18-20 พฤศจิกายน 2558, Vol. 2, หน้า 409-412.

เทพพนม โสภานเพิ่ม, กองพันธ์ อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์. การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการห้วงแบบแอกทีฟและวิธีดูปอกเล็กสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 39, เพชรบุรี, 2-4 พฤศจิกายน 2559.

Sopapirm, T., Areerak, K-N., Areerak, K-L. (2016). **The Active Damping Stabilization of AC-DC Power Systems Feeding Constant Power Loads**. International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E). 12(4): 287-295.

The Active Damping Stabilization of AC-DC Power Systems Feeding Constant Power Loads

T. Sopapirm¹, K-N. Areerak², K-L. Areerak³

Abstract – Power converters with their controls normally behave as constant power loads. These loads have small-signal negative impedance to the system. The negative impedance of CPLs can degrade the system stability. Therefore, this paper presents the mitigation technique to eliminate the destabilizing effect of CPLs for AC-DC power systems. The proposed mitigation technique is based on the active method which is normally used in DC-DC converters. As for the AC-DC power system, the switching device is added into the filter circuit that acts as an additional DC-DC conversion stage to control the output DC voltage. The virtual resistance can then be used to increase the filter damping via adjusting the duty cycle of added switching device. As a result, the AC-DC feeder system can return to stable operation when the proposed stabilization is activated. The stability analysis, simulation and experimental results are used to verify the effectiveness of the proposed active damping stabilization.

Keywords: Constant power load (CPL), AC-DC converters, active damping technique, negative impedance instability.

Nomenclature

V_{sa} V_{sb} V_{sc} = phase source voltage
 R_{eq} = transmission line resistance
 L_{eq} = transmission line inductance
 C_{eq} = transmission line capacitance
 ω = source frequency
 ϕ = phase angle of AC bus voltage
 ϕ_I = phase angle of DQ frame
 λ = phase shift between source bus and AC bus
 $V_{bus,a}$ $V_{bus,b}$ $V_{bus,c}$ = input terminal voltage of diode rectifier
 $I_{in,a}$ $I_{in,b}$ $I_{in,c}$ = input terminal current of diode rectifier
 E_{dct} = output voltage of diode rectifier without an overlap angle effect
 E_{dc} = output terminal voltage of diode rectifier
 r_{μ} = overlap angle resistance
 I_{dc} = output terminal current of diode rectifier
 r_L = DC-link inductor resistance
 L_{dc} = DC-link inductance
 r_c = DC-link capacitor resistance
 C_{dc} = DC-link capacitance
 V_{dc} = voltage crossing DC-link capacitor
 S_I = switching device of active damping method
 D_I = free-wheeling diode of active damping method
 V_x = voltage crossing free-wheeling diode D_I
 r_{LA} = virtual resistance of active damping method
 d_{act} = duty cycle for S_I
 $V_{control}$ = amplitude of reference signal
 V_{tr} = amplitude of a triangular signal
 R_x = resistive load of buck converter x
 V_{ox} = output terminal voltage of buck converter x

V_{ox}^* = voltage command of buck converter x
 R_{dc} = resistive load connected from a DC bus
 S_{dx} = switching device of buck converter x
 D_m = freewheeling diode of buck converter
 V_{inx} = voltage crossing freewheeling diode D_m
 L_x = filter inductor of buck converter x
 C_x = filter capacitor of buck converter x
 d_x^* = duty cycle from controllers for buck converter x
 $K_{pv,x}$ = proportional gain of voltage loop for buck converter x
 $K_{iv,x}$ = integral gain of voltage for buck converter x
 $K_{pi,x}$ = proportional gain of current loop for buck converter x
 $K_{il,x}$ = integral gain of current loop for buck converter x
 $X_{v,x}$ = state-variable of voltage loop control for buck converter x
 $X_{i,x}$ = state-variable of current loop control for buck converter x

I. Introduction

Recently, power converters are widely used in many applications. Unfortunately, power converters when they are tightly controlled behave as constant power loads (CPLs) [1]-[3]. These loads can degrade the stability of their feeder systems [4]-[6]. Therefore, the stability study is very important for the system feeding the CPLs. As can be seen from the previous publications [6]-[11], the mathematical models were used to predict an unstable point via a basic control theory. The averaging

F. A. Author, S. B. Author, T. C. Author

techniques such as generalized state-space averaging (GSSA) method [12]-[14] and DQ method [15]-[17] can be used to derive the suitable dynamic model for stability analysis. However, the predicted results can provide only when system becomes unstable. In order to avoid the unstable operation, the mitigation techniques are required. There are two types of mitigation techniques. The first is the passive method [18] in which the higher values of resistance and capacitance or the lower inductance of DC-link filter are required. However, the passive techniques may increase the power losses and the large capacitor causes higher weight and cost. As a result, the second mitigation method called the active technique is widely used. The well-known active technique is the active damping method [19] which is simple and easy to implement. A virtual resistance is used to increase the damping of the filter circuit via adjusting the duty cycle of power converter. Unfortunately, this active stabilization technique has only been applied to DC-DC converters [19]-[27]. The application of active damping to AC-DC power system has not been reported in previous publications. Hence, the active damping stabilization for AC-DC power systems is presented. The proposed AC-DC power system employs an uncontrolled rectifier in which the DC output voltage cannot be adjusted. As a result, based on the concept of active damping, the switching device is added in to the DC-link that acts as an additional DC-DC conversion stage to control the output DC voltage. The virtual resistance can then be used to increase the filter damping via adjusting the duty cycle of added switching device. The stability study presented in the paper, using the eigenvalue theorem via the linearized model and phase-plane plot, confirms that the mitigated system is stable. Moreover, simulation and experimental results are also presented to verify that the proposed active damping

stabilization can eliminate the destabilizing effect of CPLs.

The paper is structured as follows; in section 2, the destabilizing effects of CPL on AC-DC power system is introduced. In section 3, the active damping stabilization for AC-DC power systems feeding CPLs is described. The explanation how to apply the active damping technique to AC-DC power systems, the derivation of mathematical model suitable for stability study, the system stability analysis via the eigenvalue theorem, phase-plane plot, and the simulation results are also addressed in Section 3. Furthermore, in Section 4, the experimental results are presented to verify that the proposed active damping stabilization can eliminate the destabilizing effect of CPLs. Finally, Section 5 concludes the benefits of the active damping technique for the AC-DC power system.

II. The Destabilizing Effect of Constant Power Load on an AC-DC Power System

The considered power system is depicted in Fig.1. It consists of balanced three-phase voltage, transmission line represented by R_{eq} , L_{eq} , and C_{eq} , three-phase diode rectifier, DC-link filters represented by r_L , L_{dc} , r_C , and C_{dc} , paralleled controlled buck converters, and resistive load R_{dc} . The cascade PI controllers were used to regulate the output DC voltage of buck converters in which the controllers for each of paralleled buck converters are identical. The details how to design the cascade PI controllers for buck converters can be found in [28]. The parameters of the system in Fig.1 are identified via the artificial intelligent technique [29] as given in Table I.

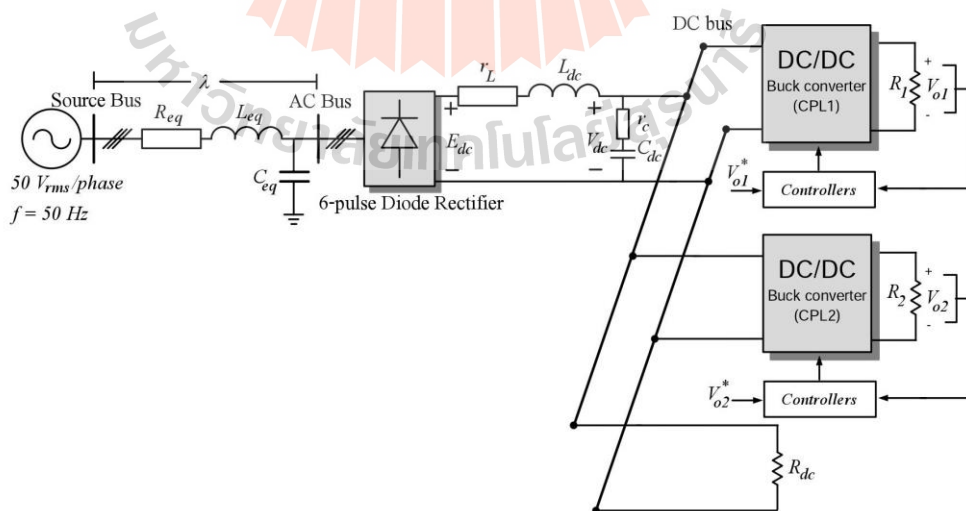


Fig.1 The considered power system

TABLE I
THE PARAMETERS OF THE SYSTEM IN FIG.1

Parameter	Value
V_s	50 V _{rms/phase}
ω	$2\pi \times 50$ rad/sec.
R_{eq}	0.1256 Ω
L_{eq}	0.21 mH
C_{eq}	2 nF
r_L	0.57 Ω
r_c	2.969 Ω
L_{dc} ($\Delta I_{dc} \leq 1.5$ A)	37.7 mH
C_{dc} ($\Delta V_{dc} \leq 50$ V)	237.35 μ F
R_{dc}	500 Ω
$L_1=L_2$ ($\Delta I_L \leq 0.5$ A)	15 mH
$C_1=C_2$ ($\Delta V_o \leq 50$ mV)	125 μ F
$R_1=R_2$	20 Ω
$K_{pv,1}=K_{pv,2}$	0.05
$K_{iv,1}=K_{iv,2}$	20
$K_{pi,1}=K_{pi,2}$	0.6819
$K_{ii,1}=K_{ii,2}$	1948

The paralleled buck converters behave as constant power loads (CPLs) that can degrade their feeder system via the DC-link filter [9]-[11]. Hence, the stability analysis is very important. From the previous publications, the DQ method [15]-[17] and the GSSA method [12]-[14] were applied to derive the system model suitable for stability study. The GSSA method was used to analyze the buck converter, while the DQ method was used to eliminate the switching action of uncontrolled AC-DC rectifier. As a result, the time-invariant model can be obtained. The eigenvalue theorem can then be applied to the linearized model for predicting the unstable point. Based on the procedure in [10], the system in Fig.1 with the parameters in Table I will be unstable when the total CPL ($P_{CPL1}+P_{CPL2}$) are equal to 350W ($P_{CPL1} = 250$ W and $P_{CPL2} = 100$ W) as shown in Fig.2.

To confirm the instability due to CPLs, the time-domain simulation using the exact topology model in MATLAB were used. The simulation results can then be given in Fig.3 in which a good agreement between the analysis and simulation is achieved. According to the results in Fig.2 and Fig.3, the paralleled buck converters behaving as CPLs can make the system become unstable at the total CPL equal to 350W. Therefore, the aim of this paper is to mitigate the instability by using the active damping method. After applying the proposed technique, the system is expected to be stable at the power level

350W. The details of the active damping will be illustrated in Section 3.

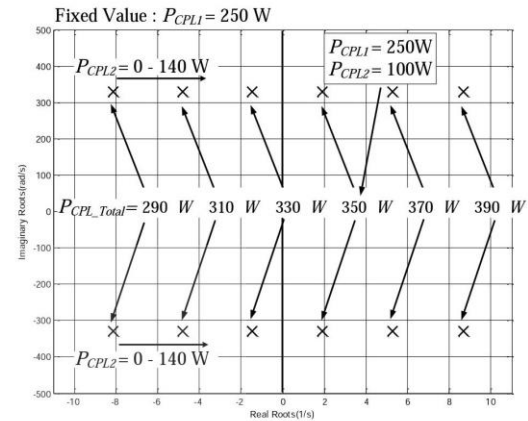


Fig.2 The stability results from the Eigenvalue theorem

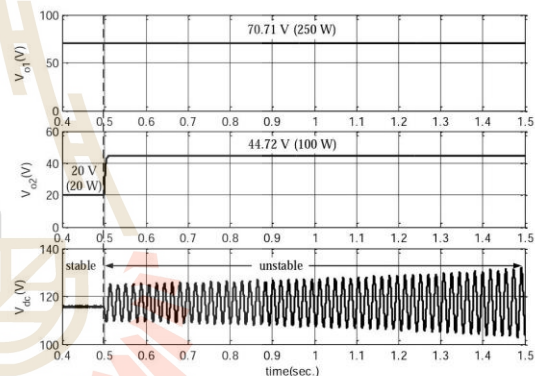


Fig.3 Time domain simulation results to validate the analytical result in Fig.2

III. Active Damping Stabilization of an AC-DC Power system Feeding Constant Power loads

In this section, the active damping technique will be applied to the AC-DC power system in Fig.1 to mitigate the effect of CPLs. The active damping method is simple and easy to implement. A virtual resistance is used to increase the damping of the DC-link filter circuit [19]. However, this technique has only been applied to DC-DC converters as illustrated in [19]. The control of output DC voltage can be allowed for DC-DC converters. Hence, the active damping technique can be conveniently applied to DC-DC converters by adjusting the duty cycle. In contrast, the uncontrolled rectifier is used for the AC-DC power system in this study in which the output DC voltage cannot be adjusted. Therefore, this study presents the controlled switch S_1 into the DC-link circuit. Based

F. A. Author, S. B. Author, T. C. Author

on the active damping concept, the output DC voltage can be controlled via switch S_1 by adjusting the duty cycle d_{act} . The AC-DC power system with the active damping stabilization is depicted in Fig.4. It can be seen in Fig.4 that the r_{LA} is the virtual resistance used to increase the damping of the filter. This virtual resistance, depending on the power level of CPLs, can be determined from the mathematical model with the eigenvalue theorem. The model describing the behavior of the system in Fig.4 can be derived from the combination between the DQ method and the GSSA method. The feeder system with an uncontrolled rectifier can be analyzed using the DQ method, while switch S_1 and paralleled buck converters can be analyzed using the GSSA method. After applying the DQ method, the uncontrolled rectifier can be treated as a transformer in

the dq-frame [10]. As a result, the equivalent circuit of the system in Fig.4, represented in the dq-frame, is depicted in Fig.5. The GSSA method is then used to eliminate the switching action of S_1 and switching devices of buck converters. Applying Kirchhoff's voltage law (KVL) and Kirchhoff's current law (KCL) to the circuit of Fig.5, with d_{act} given by (1), the nonlinear time-invariant model of the proposed AC-DC power system with the active damping stabilization under a continuous conduction mode is defined in (2a)-(2b).

$$d_{act} = \left(\frac{V_{control} - r_{LA} I_{dc}}{V_{tr}} \right) \tag{1}$$

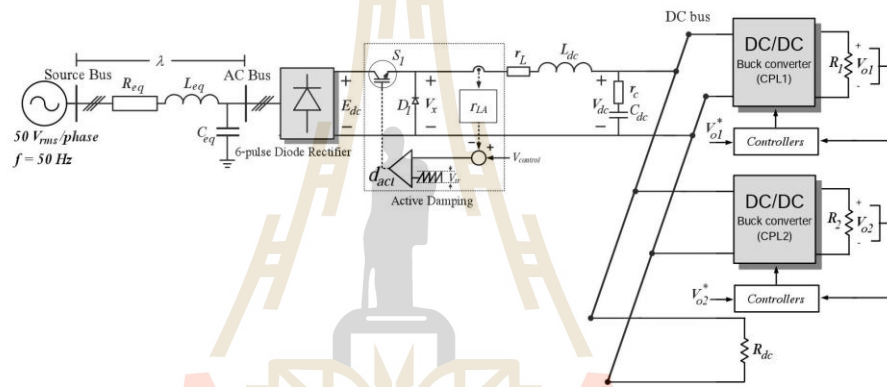


Fig.4 The AC-DC power system with the active damping stabilization

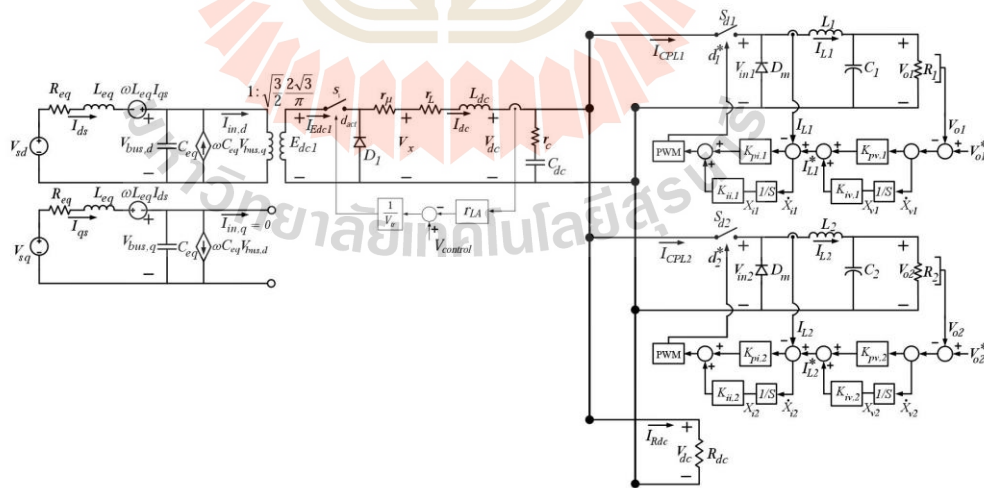


Fig.5 The equivalent circuit of the AC-DC power system with the active damping stabilization in the dq-frame

F. A. Author, S. B. Author, T. C. Author

$$\begin{cases}
 \dot{I}_{ds} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{busd} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
 \dot{I}_{qs} = -\omega I_{ds} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{busq} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
 \dot{V}_{busd} = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} + \omega V_{busq} + \\
 - \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} \frac{V_{tr} \cdot I_{dc}}{(V_{control} - r_{LA} I_{dc})} \\
 \dot{V}_{busq} = -\omega V_{busd} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\
 \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \left(\left(\frac{V_{control}}{V_{tr}} \right) V_{busd} - \left(\frac{r_{LA}}{V_{tr}} \right) V_{busd} I_{dc} \right) + \\
 - \frac{(r_{\mu} + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{(R_{dc} - r_c)}{L_{dc} R_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c K_{pi1}}{L_{dc}} I_{L1}^2 + \\
 - \frac{r_c K_{pv1} K_{pi1}}{L_{dc}} I_{L1} V_{o1} + \frac{r_c K_{iv1} K_{pi1}}{L_{dc}} I_{L1} X_{v1} + \\
 + \frac{r_c K_{ii1}}{L_{dc}} I_{L1} X_{\bar{1}} + \frac{r_c K_{pv1} K_{pi1}}{L_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* - \frac{r_c K_{pi2}}{L_{dc}} I_{L2}^2 + \\
 - \frac{r_c K_{pv2} K_{pi2}}{L_{dc}} I_{L2} V_{o2} + \frac{r_c K_{iv2} K_{pi2}}{L_{dc}} I_{L2} X_{v2} + \\
 + \frac{r_c K_{ii2}}{L_{dc}} I_{L2} X_{\bar{2}} + \frac{r_c K_{pv2} K_{pi2}}{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_{pi1}}{C_{dc}} I_{L1}^2 + \\
 + \frac{K_{pv1} K_{pi1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1} - \frac{K_{iv1} K_{pi1}}{C_{dc}} I_{L1} X_{v1} + \\
 - \frac{K_{ii1}}{C_{dc}} I_{L1} X_{\bar{1}} - \frac{K_{pv1} K_{pi1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* + \\
 - \frac{K_{pv1} K_{pi1}}{C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* + \frac{K_{pi2}}{C_{dc}} I_{L2}^2 + \\
 + \frac{K_{pv2} K_{pi2}}{C_{dc}} I_{L2} V_{o2} - \frac{K_{iv2} K_{pi2}}{C_{dc}} I_{L2} X_{v2} + \\
 - \frac{K_{ii2}}{C_{dc}} I_{L2} X_{\bar{2}} - \frac{K_{pv2} K_{pi2}}{C_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* + \\
 \dot{I}_{L1} = -\frac{K_{pi1}}{L_1} V_{dc} I_{L1} - \frac{K_{pv1} K_{pi1}}{L_1} V_{dc} V_{o1} + \\
 - \frac{V_{o1}}{L_1} + \frac{K_{iv1} K_{pi1}}{L_1} V_{dc} X_{v1} + \frac{K_{ii1}}{L_1} V_{dc} X_{\bar{1}} + \\
 + \frac{K_{pv1} K_{pi1}}{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}_{\bar{1}} = -I_{L1} - K_{pv1} V_{o1} + K_{iv1} X_{v1} + \\
 + K_{pv1} V_{o1}^* \\
 \dot{I}_{L2} = -\frac{K_{pi2}}{L_2} V_{dc} I_{L2} - \frac{K_{pv2} K_{pi2}}{L_2} V_{dc} V_{o2} + \\
 - \frac{V_{o2}}{L_2} + \frac{K_{iv2} K_{pi2}}{L_2} V_{dc} X_{v2} + \frac{K_{ii2}}{L_2} V_{dc} X_{\bar{2}} + \\
 + \frac{K_{pv2} K_{pi2}}{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}_{\bar{2}} = -I_{L2} - K_{pv2} V_{o2} + K_{iv2} X_{v2} + K_{pv2} V_{o2}^*
 \end{cases} \quad (2b)$$

It can be seen from (2a)-(2b) that the virtual resistance r_{LA} is presented in the system model. The effect of r_{LA} can be shown via a plot of the dominant eigenvalues. These eigenvalues were calculated from the linearization of (2a)-(2b). The system parameters for this plot are given in Table I with $V_{control} = 3V$, $V_{tr} = 3V$, $P_{CPL,Total} = 350W$ ($P_{CPL,1} = 250W$, $P_{CPL,2} = 100W$). The dominant eigenvalue plot when the r_{LA} is varied from 0 to 0.04Ω is shown in Fig.6. Referring to Fig.6, if $r_{LA} = 0\Omega$ (without active damping), the system is unstable. However, when the active damping is activated with $r_{LA} = 0.01\Omega$, the system becomes stable. The plot of Fig.6 can be used to determine the value of r_{LA} that is sufficient to mitigate the destabilizing effect due to the CPL. Large-signal stability analysis of the mitigated system via the phase-plane plot is also shown in Fig. 7. Initially, P_{CPL} is set at 200W. Consequently, P_{CPL} is increased to 350W. If $r_{LA} = 0$ (without mitigation), the unstable operation occurs as shown in the blue line of Fig.7. In contrast, if the active damping is applied with $r_{LA} = 0.01\Omega$, the system can become stable as shown by the green line in Fig.7. It can be seen from Fig.6 and Fig.7 that a good agreement between the eigenvalue plot and the phase-plane plot is achieved. Both studies confirm that the mitigated system with $r_{LA} = 0.01\Omega$ is stable. However, if P_{CPL} is increased, r_{LA} should be increased to ensure that the system can remain stable operation. The $r_{LA} = 0.01\Omega$ is not sufficient for the power level higher 350W. For example, if $P_{CPL} = 400W$ ($P_{CPL,1} = 250W$, $P_{CPL,2} = 150W$), r_{LA} should be equal to 0.06Ω for stable condition. It is confirmed via the eigenvalue plot in Fig.8 and the phase-plane plot in Fig.9. It can be seen in Fig. 9 that $r_{LA} = 0.01\Omega$ is not sufficient to mitigate the system with $P_{CPL} = 400W$. For this case, r_{LA} has to be increased equal to 0.06Ω . After that the system can maintain the stable operation.

F. A. Author, S. B. Author, T. C. Author

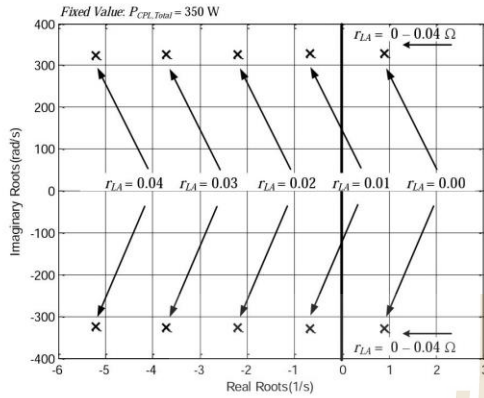


Fig.6 The dominant eigenvalue plot for $P_{CPL,Total} = 350W$ by varying r_{LA} from 0 to 0.04Ω

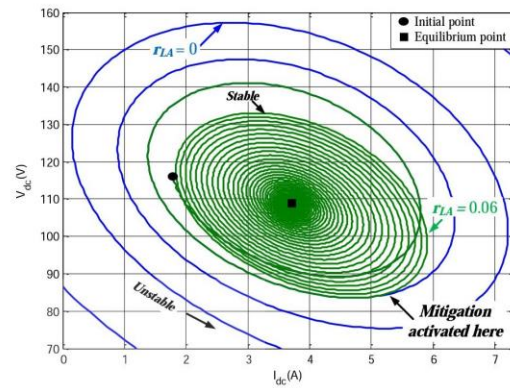


Fig.9 The phase-plane plot of the AC-DC power system with $r_{LA} = 0.06\Omega$ for $P_{CPL} = 400W$

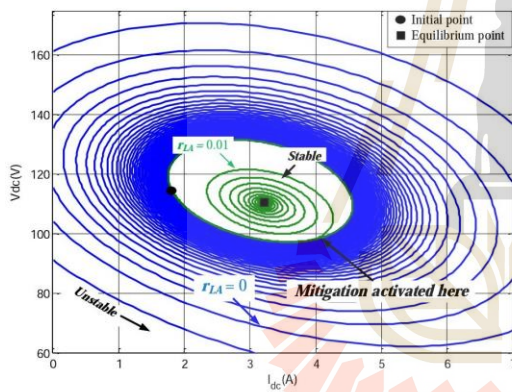


Fig.7 The phase-plane plot of the AC-DC power system with $r_{LA} = 0.01\Omega$ for $P_{CPL} = 350W$

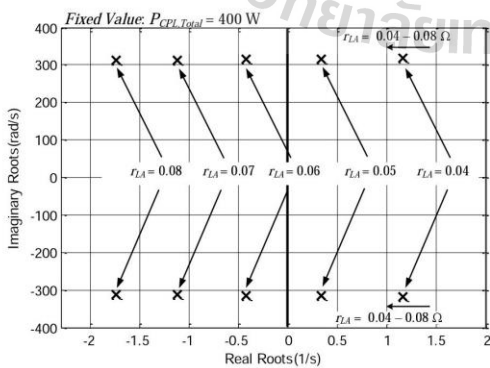


Fig.8 The dominant eigenvalue plot for $P_{CPL,Total} = 400W$ by varying r_{LA} from 0.04 to 0.08Ω

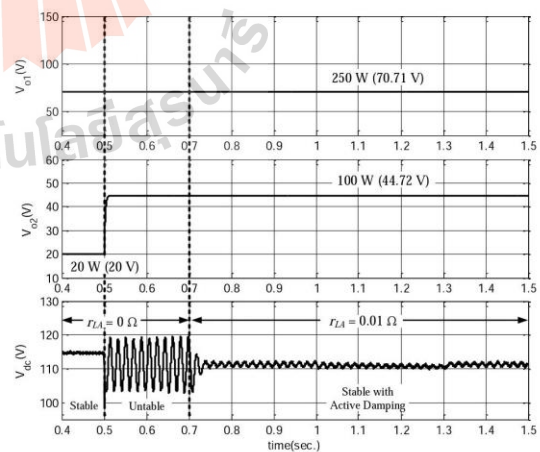


Fig.10 Time domain simulation results with the active damping stabilization for $r_{LA} = 0.01\Omega$

Time domain simulation results when the $P_{CPL,Total}$ is varied from 270W to 350W are depicted in Fig.10. It can be seen from Fig.10 that the system is initially stable between 0.4s and 0.5s with $P_{CPL,Total} = 270W$ (250W+20W) and $r_{LA} = 0\Omega$. At $t = 0.5s$, the P_{CPL2} is increased to 100W so as to achieve $P_{CPL,Total} = 350W$. As a result, the system becomes unstable. Once the active damping is activated with $r_{LA} = 0.01\Omega$ at $t = 0.7s$, the system becomes stable. Similarly, the simulation results for $P_{CPL,Total}$ varied from 270 to 400W are shown in Fig.11. It confirms that the $r_{LA} = 0.06\Omega$ is sufficient to make the system return to the stable operation at CPL equal to 400W. According to Fig.6 – Fig.11, a good agreement between the analytical results and simulation results is achieved.

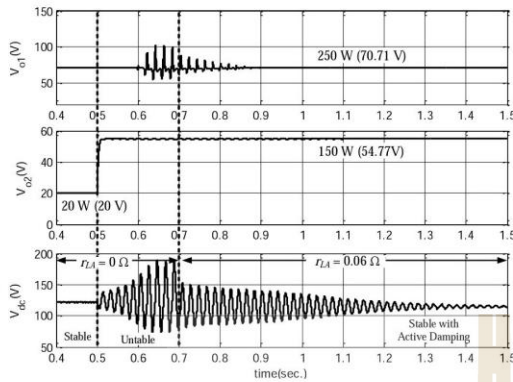


Fig.11 Time domain simulation results with the active damping stabilization for $r_{LA} = 0.06\Omega$

IV. Experimental Results

It has been described in the previous section that the proposed AC-DC power system in Fig. 1 becomes unstable when the $P_{CPL, Total} = 350W$. The proposed active damping stabilization has been analytically proven to mitigate the destabilizing effect via the eigenvalue theorem and the phase-plane plot as shown in Fig.6 - Fig.9 as well as the time domain simulations as depicted in Fig.10 and Fig.11. In this section, the experimental validation is presented in order to support the active damping concept for AC-DC power systems. The experimental rig is shown in Fig.12. The proposed active damping stabilization was implemented using an Atmega1280 microcontroller. This is highlighted by the number 3 in Fig.12.

The testing results for $r_{LA} = 0.01\Omega$ are depicted in Fig.13. It can be seen that the total CPL was initially set to 270W ($P_{CPL1} = 250W, P_{CPL2} = 20W$). At $t = 0.5s$, an additional load of 80W is added in the 2nd buck converter, as a result the total CPL becomes 350W. It can be seen from the experimental results that the system becomes unstable. At $t = 0.7s$ the proposed active damping stabilization with $r_{LA} = 0.01\Omega$ is activated and the system can become stable. Similarly, the experimental results for $r_{LA} = 0.06\Omega$ are shown in Fig.14. It can be seen that the system can be operated over 350W; here is 400W, if the r_{LA} of active damping is increased.

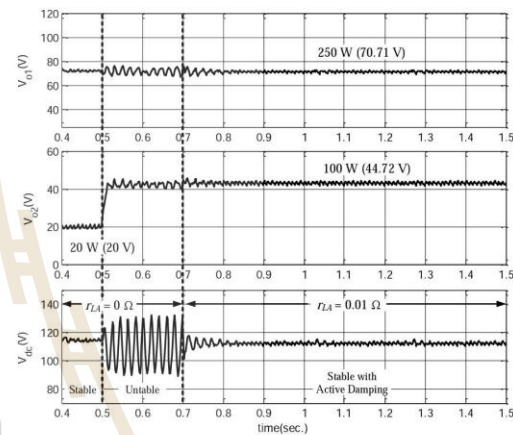
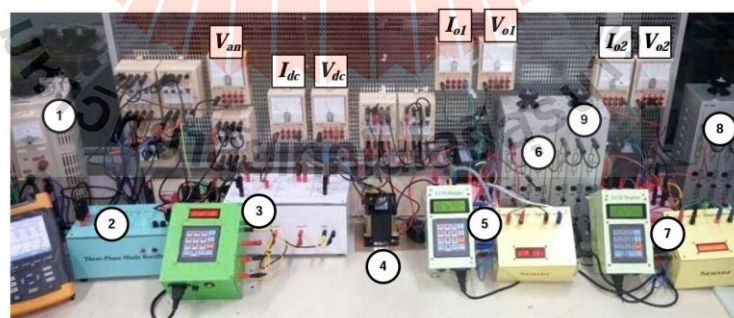


Fig.13 Experimental results for $r_{LA} = 0.01\Omega$



- 1. Three Phase Source
- 4. DC - Link Filter
- 7. DC-DC Buck converter_2
- 2. 6-pulse Diode Rectifier
- 5. DC-DC Buck converter_1
- 8. Resistance 300 W for Buck converter_2
- 3. Active Damping
- 6. Resistance 300 W for Buck converter_1
- 9. Resistance for 6-pulse Diode Rectifier

Fig.12 The testing rig based on the system in Fig.4

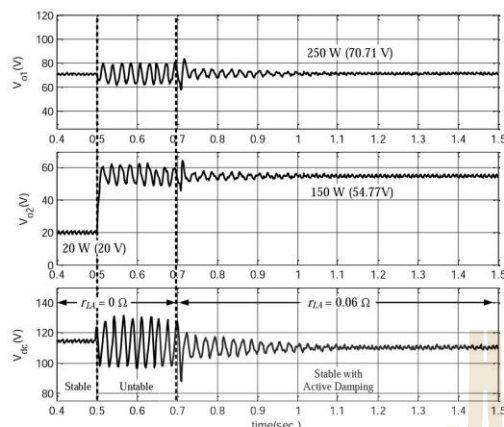


Fig.14 Experimental results for $r_{LA} = 0.06 \Omega$

Overall it can be concluded that there is a good match between the theoretical, simulation and experimental results during the same testing condition. The capability of the system to return to the stable operation by using the proposed active damping stabilization is clearly shown. However, if the power level of CPL is changed, the appropriate r_{LA} value can be determined by using the reported dynamic model. Moreover, the higher virtual resistance r_{LA} can make the system stable at higher power level of CPL.

V. Conclusions

In this paper, the active damping stabilization has been introduced. The proposed mitigation technique has been used to eliminate the destabilizing effect of CPLs. As a result, the AC-DC feeder system can return to stable operation when the proposed mitigation is activated. The theoretical results from the eigenvalue theorem and the phase-plane plot, simulations, and experimental results confirm that the AC-DC power system with the proposed active damping stabilization can return to the stable operation. A good agreement between theoretical, simulation, and experiment was achieved. However, the power level of CPL that can be mitigated is limited. This is because the higher r_{LA} results in the higher voltage drop. If the limited power level of CPL is beyond the rated power, the proposed technique is a suitable way to eliminate the destabilizing effect. The proposed technique is very simple and easy to implement. Overall, it has been shown that the proposed mitigation is very powerful and flexible method which can be used to mitigate AC-DC feeder system instability due to CPLs.

Acknowledgements

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT) and by the office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand.

References

- [1] Middlebrook R. D., "Input filter consideration in design and application of switching regulators," in *Proceeding of the IEEE Industry Application Society Annual Meeting.*, Chicago, IL, October 1967, pp. 366-382.
- [2] Grigore V., Hatonen J., Kyyra J., and Suntio T., "Dynamics of a buck converter with a constant power load," in *Proc. IEEE29th Power Electron. Spec. Conf.*, Japan, May 1998, pp. 72-78.
- [3] Rivetta C. H., Emadi A., Williamson G. A., Jayabalan R., and Fahimi B., "Analysis and control of a buck DC-DC converter operating with constant power load in sea and undersea vehicles," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 2, March-April 2006, pp. 559-572.
- [4] Rivetta C., Williamson G.A., and Emadi A., "Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Sea and Undersea Vehicles: Statement of the Problem and Comprehensive Large-Signal Solution," *Proc. IEEE Electric Ship Tech Symposium.*, July 2005, pp. 313-320.
- [5] Jusoh A.B., "The Instability Effect of Constant Power Loads," *National Power & Energy Conference (PECon).*, July 2005, pp. 175-179.
- [6] Emadi A., Khaligh A., Rivetta C. H., and Williamson G. A., "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: Definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 4, Jul. 2006, pp. 1112-1125.
- [7] Lipo T. A., and Krause P. C., "Stability Analysis of a Rectifier-Inverter Induction Motor Drive," *IEEE Trans. on Power Electronics.*, 1969, Vol. 88, no. 1, pp. 55-66.
- [8] Rahimi A. M. and Emadi A., "An analytical investigation of DC/DC power electronic converters with constant power loads in vehicular power systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 6, Jul. 2009, pp. 2689-2702.
- [9] Areerak K-N., WU T., Bozhko S.V., Asher G.M. and Thomas D. W. P., "Aircraft power system stability study including effect of voltage control and actuators dynamic," *IEEE Trans. Aerospace and electronic systems.*, vol. 47, no. 7, Oct 2011, pp. 2574-2589.
- [10] Sopapirm T., Areerak K-N., and Areerak K-L., "Stability analysis of AC distribution system with six-pulse diode rectifier and multi-converter power electronic loads," *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, vol. 6, no. 7 (Part A), Nov./Dec. 2011, pp. 2919-2928.
- [11] Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M., De lillo L., and Thomas D. W. P., "Stability study for a hybrid AC-DC more-electric aircraft power system," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic system.*, vol. 48, no. 1, Jan. 2012, pp. 329-347.
- [12] Mahdavi J., Emadi A., Bellar M.D., and Ehsani M., "Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach," *IEEE Trans. on Circuit and Systems.*, Aug 1997, vol. 44, no. 8, pp. 767-770.
- [13] Emadi A., "Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method," *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, vol. 51, No. 5, October 2004, pp. 992-1000.
- [14] Ngamkong P., Kochcha P., Areerak K-N., Sujitjorn S., and Areerak K-L., "Application of the generalized state-space averaging method to modeling of DC-DC Power Converters," *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems.*, vol. 18, no. 3, June 2012, pp. 243-260.
- [15] Rim C.T., Choi N.S., Cho G.C., and Cho G.H., "A Complete DC and AC Analysis of Three-Phase Controlled-Current PWM Rectifier Using Circuit D-Q Transformation," *IEEE Trans. on Power Electronics.*, vol.9, no. 4, Jul 1994, pp. 390-396.
- [16] Han S.B., Choi N.S., Rim C.T., and Cho, G.H., "Modeling and Analysis of Static and Dynamic Characteristics for Buck-Type Three-Phase PWM Rectifier by Circuit DQ Transformation," *IEEE Trans. on Power Electronics.*, August 2002, vol. 13, no. 2, pp. 323-336.
- [17] Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M., and Thomas D.W.P., "Stability analysis and modelling of AC-DCsystem with mixed load Using DQ-transformation method," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*, Cambridge, UK, June/Jul.2008, pp. 19-24.

F. A. Author, S. B. Author, T. C. Author

- [18] Cespedes M., Xing L. and Sun J. "Constant-power loads system stabilization by passive damping," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 7, Jul. 2011, pp. 1832-1836.
- [19] Rahimi A. M., and Emadi A., "Active damping in DC/DC power electronic converter: A novel method to overcome the problems of constant power loads," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no 5, May 2009, pp. 1428-1439.
- [20] Sulligoi G., Bosich D., Arcidiacono V., and Giadrossi G., "Considerations on the design of voltage control for multi-machine MVDC power systems on large ships," in *Proc. IEEE Elect. Ship Technol. Symp. (ESTS)*, Arlington, VA, USA, Apr. 22-24, 2013, pp. 314-319.
- [21] Bosich D., and Sulligoi G., "Voltage control on a refitted luxury yacht using hybrid electric propulsion and LVDC distribution," in *Proc. IEEE Ecol. 1 Veh. Renewable Energies Conf. (EVER)*, Monaco, Mar. 27-30, 2013, pp. 1-6.
- [22] Radwan A.A.A. and Mohamed Y.A.R.I. "Linear Active Stabilization of Converter-Dominated DC Microgrids," *IEEE Trans. On Smart Grid.*, vol. 3, no. 1, March 2012, pp. 203-216.
- [23] Ashourloo M., Khorsandi A., and Mokhtari H., "Stabilization of dc-microgrid with constant power loads by an active damping method," *4th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (ICEMS)*, 2013, pp. 1-4.
- [24] Magne P., Nahid-Mobarakeh B., and Pierfederici S., "Active Stabilization of dc microgrids without remote sensor for more electric aircraft," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 5, pp. 2352-2360.
- [25] Magne P., Nahid-Mobarakeh B., and Pierfederici S., "Dynamic Consideration of DC Microgrids With Constant Power Loads and Active Damping System—A Design Method for Fault-Tolerant Stabilizing System," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.*, vol. 2, no. 3, Sept 2014, pp. 562-570.
- [26] Shafiee Q., Dragicevic T., Vasquez J.C., and Guerrero J.M., "Modeling, stability analysis and active stabilization of multiple dc-microgrid clusters," *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, 2014, pp. 1284-1290.
- [27] Wu M., and Lu A D. D-C., "Novel Stabilization Method of LC Input Filter With Constant Power Loads Without Load Performance Compromise in DC Microgrids", *IEEE Transactions on Industrial Electronics.*, vol. 62, no 7, July 2015, pp. 4552-4562.
- [28] Tsang K.M., and Chan W.L., "Cascade controller for DC/DC buck converter," *IEE Electric Power Application*, vol. 152, no. 4, 2005, pp. 827-831.
- [29] Sopapirm T., Areerak K-N., and Areerak, K-L., "The Identification of AC-DC Power System Parameters Using an Adaptive Tabu Search Technique," *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E)*, Vol. 7, no 4, July-August. 2012, pp.4655-4662.

Authors' information

¹T. Sopapirm

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

²K-N. Areerak

School of Electrical Engineering Institute of Engineering Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, 30000, THAILAND, Corresponding author: kongpan@sut.ac.th

Tel: +66-44224520, Fax: +66-44224601

³K-L. Areerak

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



T. Sopapirm was born in Saraburi, Thailand, in 1988. He received the B.Eng. and M.Eng. degrees from Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2009 and 2011, respectively and the Ph.D. degree in electrical engineering. His main research interests include stability analysis, modeling of power electronic system, digital control, FPGA, and AI application.



K-N. Areerak received the B.Eng. M.Eng degrees from Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2000 and 2001, respectively and the Ph.D. degree from the University of Nottingham, Nottingham, UK., in 2009, all in electrical engineering. In 2002, he was a lecturer in the Electrical and Electronic Department, Rangsit University, Thailand. Since 2003, he has been a Lecturer in the School of Electrical Engineering, SUT. He received the Associate Professor in Electrical Engineering in 2015. His main research interests include system identifications, artificial intelligence applications, stability analysis of power systems with constant power loads, modeling and control of power electronic based systems, and control theory.



K-L. Areerak received the B.Eng. M.Eng. and Ph.D. degrees in electrical engineering from Suranaree University of Technology (SUT), Thailand, in 2000, 2003, and 2007, respectively. Since 2007, he has been a lecturer and Head of Power Quality Research Unit (PQRU) in the School of Electrical Engineering, SUT. He received the Associate Professor in Electrical Engineering in 2015. His main research interests include active power filter, harmonic elimination, artificial intelligence applications, motor drive, and intelligence control systems.

ประวัติผู้เขียน

นายเทพพนม โสกาเพิ่ม เกิดเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2531 ที่จังหวัดสระบุรี เริ่มการศึกษา ระดับประถมศึกษาที่ 1 – 6 ที่โรงเรียนบ้านหนองกะเบา ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 – 3 ที่โรงเรียนโคกกระทอนกิตติคุณวิทยา ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 4 – 6 ที่โรงเรียนเสนาให้ "วิมลวิทยานุกูล" สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ระดับปริญญาโทวิศวกรรม ศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2553 และ ปี พ.ศ. 2555 ตามลำดับ และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนัก วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาเอก ได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 2 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการ ระบบควบคุม (2) ปฏิบัติการการแปลงผันพลังงานทางกลไฟฟ้า โดยมีความสนใจในด้าน อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การควบคุมอัตโนมัติ และปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทำให้ ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจทางด้านการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นอย่างดี และมีผลการตีพิมพ์ปรากฏดังภาคผนวก ข. จำนวน 4 ฉบับ