

การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มี
โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้ตู้ป้อนไปหน้าร่วมกับ
วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว



นายรัฐพล โพธิ์สังข์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**STABILIZATION OF AC-DC SYSTEMS FEEDING
CONSTANT POWER LOADS BY USING
FEEDFORWARD LOOP WITH
ADAPTIVE TABU SEARCH METHOD**

Ratapon Phosung



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

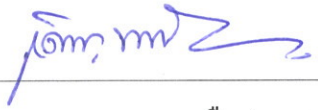
Suranaree University of Technology

Academic Year 2020

การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดัชนีที่มีโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัว
โดยใช้รูปแบบไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นหน่วยงานหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.กองพัน อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



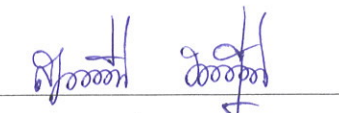
(อ. ดร.เทพพนม โสภะเพิ่ม)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

กรรมการ



(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รัฐพล โพธิ์สังข์ : การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลด
กำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้ลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว
(STABILIZATION OF AC-DC SYSTEMS FEEDING CONSTANT POWER LOADS
BY USING FEEDFORWARD LOOP WITH ADAPTIVE TABU SEARCH METHOD)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.กองพันธ์ อารีรักษ์, 221 หน้า.

วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่ง
โหลดดังกล่าวสามารถลดทอนเสถียรภาพของระบบโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นงานวิจัย
วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบ
บริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งขานกันด้วยวิธีแบบแอคทีฟ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2
แนวทางที่นิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน โดยแนวทางแรกคือ การห่่วงแบบแอคทีฟด้าน
แหล่งจ่าย แนวทางนี้ทำได้โดยการสร้างสัญญาณชดเชยป้อนไปยังตัวควบคุมด้านแหล่งจ่ายเพื่อเพิ่ม
ผลการห่่วงของระบบ แต่อย่างไรก็ตาม แนวทางดังกล่าวเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแส
ที่ไม่มีการควบคุมจำเป็นต้องเพิ่มวงจรช่วยเข้ามาในระบบ ซึ่งส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบ
และทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลง ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการห่่วง
แบบแอคทีฟด้านโหลดโดยใช้ลูปป้อนไปหน้า เนื่องจากแนวทางดังกล่าวไม่ก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสีย
ในระบบ อีกทั้งยังสามารถทำได้ง่ายโดยการแก้ไขอัลกอริทึมของตัวควบคุม แต่ถึงอย่างไรก็ตาม
การห่่วงแบบแอคทีฟด้านโหลดด้วยลูปป้อนไปหน้าได้มีการนำมาใช้งานกับวงจรแปลงผันกำลัง
ยังไม่มากนัก เนื่องจากวิธีการดังกล่าวจะไปลดทอนสมรรถนะการควบคุมของโหลดโดยตรง ด้วย
เหตุนี้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของลูปป้อนไปหน้าด้วย
วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้สมรรถนะการควบคุม
แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ ภายใต้เงื่อนไขระบบมีเสถียรภาพ สำหรับการยืนยันผล
การออกแบบจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการสร้างชุดทดสอบจริง เพื่อ
แสดงให้เห็นว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถกลับมามีเสถียรภาพได้ตลอด
ช่วงการทำงาน และยังคงให้ผลการตอบสนองของสัญญาณทางฝั่งเอาต์พุตที่ดี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา รัฐพล โพธิ์สังข์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา กองพันธ์ อารีรักษ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม เทพพนม ไร่มณี

RATAPON PHOSUNG : STABILIZATION OF AC-DC SYSTEMS
FEEDING CONSTANT POWER LOADS BY USING FEEDFORWARD
LOOP WITH ADAPTIVE TABU SEARCH METHOD. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D., 221 PP.

CONSTANT POWER LOADS (CPLs)/STABILITY ANALYSIS/INSTABILITY
MITIGATION/FEEDFORWARD LOOP/ ADAPTIVE TABU SEARCH METHOD

Tightly regulated closed-loop power converters behave as constant power loads (CPLs). These loads can significantly degrade power system stability margin and system performance. Therefore, this research thesis will study an instability mitigation of three-phase uncontrolled rectifier feeding paralleled buck converter loads. There are two well-known concepts in order to eliminate the destabilizing effect of CPLs. The first is feeder side active damping concept. In this case, the compensation signal on the feeder side is used to increase the damping effect of the power system. However, when this concept is applied to uncontrolled rectifier based AC-DC power systems, the system efficiency is decreased due to an auxiliary circuit. Thus, a second concept, namely CPL side active damping using feedforward loop is selected. This concept does not cause power loss in the system. Furthermore, it can also be done easily by modifying the control algorithm. However, CPL side active damping using feedforward loop is implemented with a few power converters because this approach will directly degrade the load performance. Hence, in the thesis, the feedforward loop parameters will be designed using the adaptive tabu search method via the considered mathematical model. The aim of the proposed design method is to provide the best possible output performance. Moreover, the system is always stable.

The simulation and experimental results are used to validate the theoretical results.
The results show that the unstable system can become stable under all operating conditions with a good performance.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature อัฐพล โพธิ์สงฆ์

Advisor's Signature เกษม อดิศักดิ์

Co-Advisor's Signature เทพนภา โรตาคม

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธุ์ อารีรักษ์และอาจารย์ ดร.เทพพนม โสภะเพิ่ม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อ งานวิจัย รวมทั้งยังได้ช่วยสละเวลาเพื่อตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนกระทั่งมี ความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นกำลังใจและเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน ให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

คณาจารย์ ผู้ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และเลขานุการ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ การติดต่อประสานงาน และข้อคิด ในด้านต่าง ๆ อย่างดียิ่งเสมอมา

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน การใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งขอขอบคุณพี่น้อง บัณฑิตศึกษาในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกลและการควบคุมทุกท่านที่ให้ คำปรึกษาในด้านวิชาการ ด้านการดำเนินชีวิต และคอยให้กำลังใจกับผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ นายพิธิ – นางรัตนา โพธิ์สังข์ บิดาและมารดาของผู้วิจัย ซึ่งถือได้ว่าเป็นอาจารย์คนแรก รวมถึงญาติ พี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในด้านการศึกษา อย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

รัฐพล โพธิ์สังข์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	

1	บทนำ.....	1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	4
1.3	ข้อตกลงเบื้องต้น.....	5
1.4	ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	6
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	6
1.6	จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	7
1.7	การจัดรูปแบบรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	7
2	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1	บทนำ.....	9
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ.....	9
2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	11
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า.....	14
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและ งานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	17
2.6	สรุป.....	22

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นาคันกรณีที่ไม่มีการควบคุม	23
3.1	บทนำ	23
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นาคันกรณีที่ไม่มีการควบคุม	23
3.2.1	การแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transform)	25
3.2.2	การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ มายังแกน dq	26
3.2.3	วิธีการแปลงของปาร์ก (Park's Transform)	27
3.2.4	วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป	28
3.2.5	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป	29
3.2.6	การคำนวณค่าในสถานะคงตัว	46
3.2.7	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้น	47
3.3	สรุป	51
4	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นาคันกรณีที่มีการควบคุม	52
4.1	บทนำ	52
4.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นาคันกรณีที่มีการควบคุม	52
4.2.1	การทำให้เป็นเชิงเส้น	56
4.2.2	การคำนวณค่าในสถานะคงตัว	60
4.2.3	การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นาคัน	61
4.2.4	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้น	66
4.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นาคัน	69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	สรุป	72
5	การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกันโดยใช้ลูปป้อนไปหน้า	74
5.1	บทนำ.....	74
5.2	การบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ลูปป้อนไปหน้า.....	74
5.2.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ โดยใช้ลูปป้อนไปหน้า.....	74
5.2.2	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณา การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า	76
5.2.3	การทำให้เป็นเชิงเส้น	80
5.2.4	การคำนวณค่าในสถานะคงตัว	84
5.2.5	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้น	85
5.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาด เสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า	88
5.4	การออกแบบลูปป้อนไปหน้าด้วยวิธีแบบดั้งเดิม	91
5.4.1	การออกแบบตัวกรองผ่านแถบ	91
5.4.2	การออกแบบค่าอัตราขยาย K_f	92
5.5	สรุป	95
6	การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกันโดยใช้ลูปป้อนไปหน้าร่วมกับ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	96
6.1	บทนำ.....	96
6.2	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ ลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	96
6.3	การออกแบบลูปป้อนไปหน้าด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	97
6.3.1	หลักการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	98

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3.2	กระบวนการออกแบบลูปป้อนไปหน้า	101
6.3.3	ผลการออกแบบลูปป้อนไปหน้า.....	105
6.3.4	การยืนยันผลการออกแบบของวิธี ATS ด้วยการจำลอง สถานการณ์บนคอมพิวเตอร์	113
6.4	สรุป	119
7	การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า ร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	120
7.1	บทนำ.....	120
7.2	การสร้างชุดทดสอบ	120
7.2.1	ชุด CHROMA programmable AC source	122
7.2.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์	123
7.2.3	ชุดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแบบพีไอ	125
7.2.4	ชุดวงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	129
7.3	ผลการทดสอบการสร้างเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	141
7.3.1	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง	141
7.3.2	การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า	147
7.3.3	การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า ร่วมกับวิธีการแบบดั้งเดิม	153
7.3.4	การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า ร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	156
7.4	สรุป	162
8	สรุปและข้อเสนอแนะ	164
8.1	สรุป	164
8.2	สรุปจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์	169
8.3	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	170

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

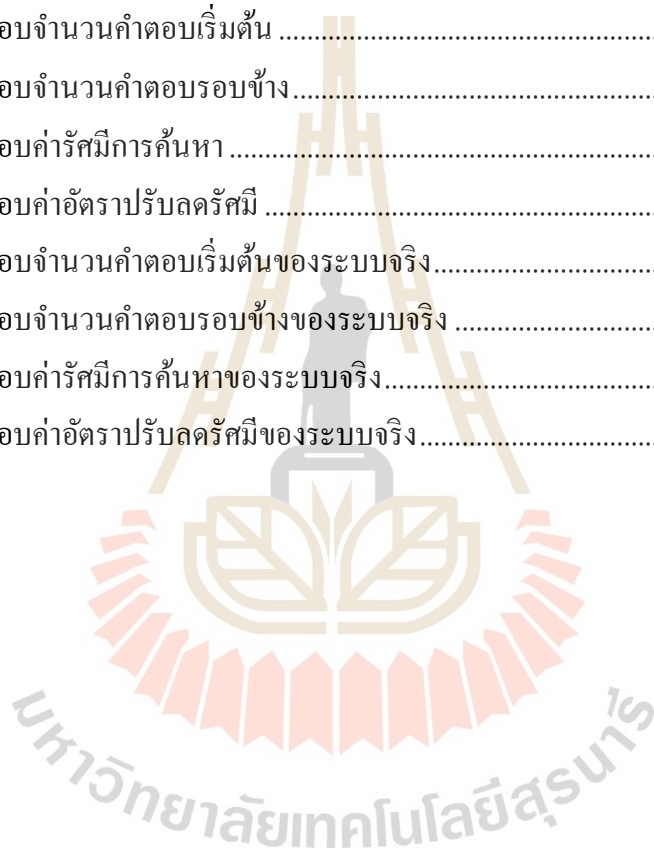
รายการอ้างอิง	171
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณ ค่า λ ด้วยการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราฟสัน	176
ภาคผนวก ข. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB	180
ภาคผนวก ค. ผลการจำลองสถานการณ์หลักการทำงานของอุปกรณ์ไปหน้า ด้วยโปรแกรม MATLAB	183
ภาคผนวก ง. ตารางผลการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหา สำหรับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์	186
ภาคผนวก จ. รายละเอียดการโปรแกรมตัวควบคุมพีไอที่มีอุปกรณ์ไปหน้า สำหรับการสร้างเสถียรภาพโดยใช้บอร์ด Arduino Mega2560	193
ภาคผนวก ฉ. บทความวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา	198
ประวัติผู้เขียน	221

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ.....	10
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	12
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า	14
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า.....	18
3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1	48
4.1 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1	66
5.1 พารามิเตอร์ของตัวกรองผ่านแถบสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1	85
6.1 การปรับตั้งค่าโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 1 และชดที่ 2	102
6.2 พารามิเตอร์ของ ATS	104
6.3 ขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของลูบป้อนไปหน้า.....	104
6.4 ค่าพารามิเตอร์ของลูบป้อนไปหน้าที่ได้จากการออกแบบด้วย ATS	113
6.5 ตารางการเปรียบเทียบสมรรถนะของ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 34.64 V เป็น 42.43 V	116
6.6 ตารางการเปรียบเทียบสมรรถนะของ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 42.43 V เป็น 45.83 V	116
6.7 ตารางการเปรียบเทียบสมรรถนะของ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 45.83 V เป็น 48.99 V	117
6.8 ตารางการเปรียบเทียบสมรรถนะของ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 48.99 V เป็น 51.96 V	117
6.9 ตารางการเปรียบเทียบสมรรถนะของ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 51.96 V เป็น 54.77 V	117
7.1 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง	143
7.2 พารามิเตอร์ของตัวกรองผ่านแถบสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 7.26.....	148
7.3 การปรับตั้งค่าโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 1 และชดที่ 2 ของระบบจริง	156
7.4 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม ATS สำหรับระบบจริง	157

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
7.5	ขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของรูปแบบไปหน้าของระบบจริง..... 158
7.6	ค่าพารามิเตอร์ของรูปแบบไปหน้าที่ได้จากการออกแบบด้วย ATS ของระบบจริง..... 160
ง.1	การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น 187
ง.2	การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง..... 188
ง.3	การทดสอบค่ารัศมีการค้นหา 188
ง.4	การทดสอบค่าอัตราปรับลดรัศมี 189
ง.5	การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นของระบบจริง..... 190
ง.6	การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างของระบบจริง 191
ง.7	การทดสอบค่ารัศมีการค้นหาของระบบจริง..... 191
ง.8	การทดสอบค่าอัตราปรับลดรัศมีของระบบจริง..... 192



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพสรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า 16
2.2	แผนภาพสรุปการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า.....21
3.1	ระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งกัน กรณีที่ไม่มีการควบคุม 24
3.2	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน $\alpha\beta$ 25
3.3	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq 26
3.4	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน dq 27
3.5	ตัวต้านทานอนุกรมตัวเหนี่ยวนำในสายส่ง 29
3.6	วงจรสมมูลตัวต้านทานอนุกรมตัวเหนี่ยวนำของสายส่งบนแกนดีคิว 30
3.7	ตัวเก็บประจุของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส 31
3.8	วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุบนแกนดีคิว 31
3.9	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีความต้านทานปรับค่าได้ 32
3.10	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ 33
3.11	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์บนแกนหมุนดีคิว 35
3.12	แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว 36
3.13	วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว 37
3.14	วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว 38
3.15	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันทั้ง 2 ชุด 38
3.16	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 40
3.17	สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส 46
3.18	ผลการตอบสนอง เมื่อ ค่าวัฏจักรหน้าที่ d_1 และ $d_2 = 30\%$ 49
3.19	ผลการตอบสนอง เมื่อ ค่าวัฏจักรหน้าที่ d_1 และ $d_2 = 40\%$ 50
4.1	ระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งกัน กรณีที่มีการควบคุม.....53
4.2	วงจรสมมูลบนแกนดีคิว เมื่อ กำหนดให้ $\phi = \phi_1$ 54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	แผนภาพสำหรับออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 1..... 62
4.4	แผนภาพสำหรับออกแบบตัวควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 1..... 64
4.5	ผลตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ที่มีการเปลี่ยนแปลง v_{o1}^* และ v_{o2}^* จาก 15 V ไปเป็น 20 V ตามลำดับ..... 67
4.6	ผลตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ที่มีการเปลี่ยนแปลง v_{o1}^* และ v_{o2}^* จาก 25 V ไปเป็น 30 V ตามลำดับ..... 68
4.7	ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ..... 70
4.8	ค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ..... 70
4.9	ผลการจำลองสถานการณ์การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1..... 72
5.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยอุปกรณ์ไปหน้า..... 75
5.2	วงจรสมมูลบนแกนดีคิวที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยอุปกรณ์ไปหน้า..... 77
5.3	ผลตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 ที่มีการเปลี่ยนแปลง v_{o1}^* และ v_{o2}^* โดยที่ $K_f = 0.25$ 86
5.4	ผลตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 ที่มีการเปลี่ยนแปลง v_{o1}^* และ v_{o2}^* โดยที่ $K_f = 0.75$ 87
5.5	ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_f เมื่อกำหนดให้ $P_{CPL,Total} = 280$ W..... 88
5.6	ผลการจำลองสถานการณ์ V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_f 90
5.7	ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_f เมื่อกำหนดให้ $P_{CPL,Total} = 600$ W..... 93
5.8	ผลการจำลองสถานการณ์ I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม..... 94
6.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยอุปกรณ์ไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว..... 97

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2	98
6.3	99
6.4	99
6.5	100
6.6	100
6.7	101
6.8	105
6.9	106
6.10	107
6.11	107
6.12	108
6.13	109
6.14	110
6.15	110
6.16	111
6.17	112
6.18	114
6.19	114
6.20	115
6.21	115
6.22	116

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.23 ผลการจำลองสถานการณ์ I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS.....	118
7.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับการสร้างชุดทดสอบ	121
7.2 ชุดทดสอบสำหรับระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยอุปกรณ์ไปหน้า.....	122
7.3 ชุด CHROMA programmable AC source.....	122
7.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์	123
7.5 ตัวเก็บประจุสำหรับกรองแรงดันบัสดีซี.....	124
7.6 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรองกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส	124
7.7 มอดูลไดโอด 3 เฟส รุ่น VS-36MT160.....	125
7.8 ชุดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมแบบพีไอ	125
7.9 วงจรแปลงผันแบบบักก์	126
7.10 วงจรรักษาระดับแรงดัน	127
7.11 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า.....	128
7.12 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า.....	128
7.13 แผนภาพการคำนวณหาสัญญาณควบคุม d_{xi} ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR.....	129
7.14 แผนภาพการต่อวงจรทางด้านแอนะล็อก.....	130
7.15 ชุดวงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยอุปกรณ์ไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว.....	131
7.16 วงจรตรวจจับแรงดันบัสดีซี.....	131
7.17 ตัวกรองผ่านแถบ	132
7.18 ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA2560.....	135
7.19 ชุดบอร์ด ET- MINI MCP4922 DAC.....	138
7.20 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย	139
7.21 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ	140

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.22 วงจรขับเคลื่อนหรือวงจรแยกโคคัสสัญญาณ.....	141
7.23 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	143
7.24 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง.....	145
7.25 การยืนยันผลการขาดเสถียรภาพของระบบจริง.....	146
7.26 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการหน่วงแบบแอกทีฟด้วยลูปย้อนไปหน้า.....	147
7.27 ผลการคำนวณค่าเจาะจงเด่นที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพโดยกำหนดให้ ผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเป็น 320 W.....	149
7.28 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ค่า K_f เท่ากับ 0.15.....	150
7.29 ผลการคำนวณค่าเจาะจงเด่นที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพโดยกำหนดให้ ผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเป็น 360 W.....	151
7.30 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ค่า K_f เท่ากับ 0.2.....	152
7.31 ผลการคำนวณค่าเจาะจงเด่นที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ณ ค่าพิกัดที่ตั้งไว้.....	154
7.32 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ค่าพิกัดของระบบ เมื่อ K_f มีค่าคงที่เท่ากับ 0.5.....	155
7.33 การลู่เข้าหาคำตอบ W ของระบบจริง.....	158
7.34 ค่าเจาะจงในกระบวนการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H ของระบบจริง เมื่อ $P_{CPL,Total} = 600$ W.....	159
7.35 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้วิธีการค้นหา แบบตามูเชิงปรับตัว.....	161
ข.1 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB สำหรับ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณากรณีไม่มีการควบคุม.....	181
ข.2 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB สำหรับ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณากรณีมีการควบคุม.....	181
ข.3 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB สำหรับ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปย้อนไปหน้า.....	182
ค.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาหลักการทำงานของลูปย้อนไปหน้า.....	184
ค.2 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB.....	184

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

ก.3	ผลการจำลองสถานการณ์ของ V_{dc} , V_{stab} , V_{o1}^* , V_{ref1} และ V_{o1} เมื่อกำหนดให้ $K_f = 1.0$	185
-----	--	-----



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นที่นิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น อากาศยาน ยานยนต์ รถไฟฟ้า เรือดำน้ำ หรือระบบควบคุมในสายการผลิตของภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น โดยส่วนใหญ่โหลดของระบบดังกล่าวมักจะเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน ได้แก่ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเอชเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอช และเอชเป็นเอช เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย ไม่ซับซ้อน มีประสิทธิภาพสูง และมีการดูแลบำรุงรักษาที่ต่ำ ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมมักจะแสดงพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power loads : CPL) ซึ่งโหลดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบ (negative impedance) (Middlebrook R.D., 1967; Rivetta C.H., Geoffrey A., Williamson G.A. and Emadi A., 2005; Areerak K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas D.W.P., 2008) และเมื่อนำโหลดมาต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการขาดเสถียรภาพนั้นอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังหรือส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาและการตรวจสอบเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อโหลดวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อคาดเดาจุดที่จะทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพและหลีกเลี่ยงการทำงานของระบบ ณ จุดดังกล่าว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความสำคัญ โดยทั่วไปการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time varying model) อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจร ซึ่งจะทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องหาวิธีในการพิสูจน์แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) ซึ่งมีอยู่ 3 วิธีที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายคือ วิธีที่ 1 เรียกว่า วิธีดีคิว (DQ method) (Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M. and Thomas D.W.P., 2008; Chaijarumudomrung K., Areerak K-N., and Areerak K-L., 2010) เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส มีความยืดหยุ่นสูงสามารถนำไปใช้ร่วมกับวิธีการอื่นได้ง่าย และนำไปใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนได้เช่น วงจรเรียงกระแสสามเฟส หรือระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน วิธีที่ 2 คือ วิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear average-value method) (Uan-Zo-li A., Burgos R.P., Lacaux F., Wang F. and Boroyevich D., 2004) วิธีการนี้เป็น

วิธีที่ง่ายและแบบจำลองที่ได้ไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือ แบบจำลองที่ได้มีความไม่ยืดหยุ่นและต้องพิจารณาเป็นกรณี ๆ ไป ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดได้ง่าย วิธีที่ 3 คือ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method: GSSA) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายสำหรับการหาแบบจำลองของระบบส่งจ่ายแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (Mahdavi J., Emaadi A., Bellar M. D. and Ehsani M., 1997; Emadi A., Ehsani M. and Miller J.M., 2004) อีกทั้งยังสามารถใช้กับวงจรเรียงกระแสที่มีการควบคุมเฟสและไม่มีการควบคุมเฟสในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส (Emadi A. 2004) ได้อีกด้วย แต่เมื่อนำวิธีนี้มาใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสจะทำให้แบบจำลองที่ได้มีความซับซ้อน ขาดต่อการวิเคราะห์วงจร ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งเหมาะสมกับการกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์และนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไป

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นิยมใช้ในปัจจุบันสามารถจำแนกออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีที่ 1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal stability analysis) จะดำเนินการเปลี่ยนแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ การวิเคราะห์เสถียรภาพประกอบด้วย 2 แนวทางที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพบนระนาบ S ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theory) (Areerak K-N., Wu T., Bozhko S.V., Asher G.M., and Thomas D.W.P., 2011) และการวิเคราะห์เสถียรภาพบนโดเมนความถี่ด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูค (Middlebrook's criteria) (Feng X., Liu J., and Lee F.C., 2002) โดยทั้ง 2 แนวทางนี้เป็น การวิเคราะห์เสถียรภาพที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพจะมีความถูกต้องในช่วงการเปลี่ยนแปลงจุดทำงานที่แคบเท่านั้น (small range operation) วิธีที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ (large-signal stability analysis) ไม่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการทำให้เป็นเชิงเส้นก็สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพได้โดยตรง จะประกอบไปด้วย 2 แนวทางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย นั่นคือ แนวทางที่ 1 การวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase plane analysis) (Griffio A., Wang J., and Howe D., 2008) เป็นวิธีการทางกราฟิกซึ่งจะสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบบนระนาบที่ขึ้นอยู่ด้วยตัวแปรสถานะ (state variables) 2 ตัว การวิเคราะห์ระนาบเฟสเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และได้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำ แต่ข้อเสียของการวิเคราะห์ระนาบเฟสคือ สามารถใช้กับระบบที่มีอันดับไม่เกิน 2 ถ้าอันดับของระบบเกิน 2 จำเป็นที่จะต้องทำการแปลงรูปแบบให้เป็นกลุ่มของระบบอันดับ 2 ซึ่งจะมีความยุ่งยากซับซ้อนหรือทำให้ผลการวิเคราะห์เกิดความผิดพลาดได้ แนวทางที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method) (Weijing Du., Junming

Zhang., Yang Zhang., and Zhoamong Qian., 2011; Griffio, A., and Wang, J. 2012) เป็นแนวทางที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพราะนอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้วยังสามารถที่จะประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม แนวทางนี้จำเป็นต้องคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณาหลังจากนั้นนำฟังก์ชันที่ได้ไปตรวจสอบเสถียรภาพตามทฤษฎีการมีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ซึ่งข้อเสียของแนวทางนี้คือ ไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟและในทางปฏิบัติการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก อีกทั้งยังมีข้อจำกัดสำหรับระบบที่มีโครงสร้างซับซ้อน จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดเดาแนวโน้มการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างชัดเจน

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอข้างต้นทำให้สามารถคาดเดาจุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่ไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและทำงานในพิกัดที่สูงขึ้นได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งจากการศึกษาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันได้มีการนำเสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ แบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการคือ วิธีที่ 1 วิธีแบบพาสซีฟ (Cespedes M., Xing L., and Sun J., 2011) (Liu X., and Ma S., 2015) จะอาศัยการปรับเปลี่ยนวงจรกรอง (hardware modifications) ด้วยการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุหรือลดค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองดีซี รวมถึงการเพิ่มอุปกรณ์พาสซีฟ ได้แก่ การนำตัวต้านทานมาต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า หรือตัวเหนี่ยวนำเข้าไปในวงจรกรอง เพื่อเพิ่มการหน่วงให้กับระบบ ซึ่งส่งผลทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น วิธีแบบพาสซีฟเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการออกแบบและการนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติ แต่มีข้อเสียคือ ทำให้ขนาด น้ำหนัก และราคาของระบบโดยรวมมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้น อีกทั้งทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นในระบบ ในขณะที่ วิธีที่ 2 วิธีแบบแอคทีฟเป็นวิธีการที่อาศัยการสร้างตัวชดเชยที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพในโครงสร้างการควบคุม (control structures modifications) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูงมากกว่าวิธีแบบพาสซีฟเนื่องจากไม่มีการปรับเปลี่ยนวงจรกรอง โดยวิธีการนี้สามารถแบ่งได้ 2 แนวทางคือ แนวทางที่ 1 การหน่วงแบบแอคทีฟด้านแหล่งจ่าย (Feeder Side Active Damping) (Rahimi A.M. and Emadi A., 2009; Rahimi A.M., Williamson G.A. and Emadi A., 2010; Wu M., and Lu D.D.C, 2015) และแนวทางที่ 2 การหน่วงแบบแอคทีฟด้านโหลด (CPL Side Active Damping) (Mohamed Y.A-R.I., Radwan A.A.A. and Lee T.K., 2012 Wu M., and Lu D.D.C, 2015) สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการหน่วงแบบแอคทีฟด้านโหลดด้วยวิธีลูบป้อน

ไปหน้า (Feedforward loop) เนื่องจากไม่ต้องการทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการเพิ่มวงจรช่วย (Active Damping Using Auxiliary Circuits) (Zhang X., Ruan X., Kim H., and Tse C. K., 2013; Areerak K-N, Sopapirm T., Bozhko S., Hill C.I., Suyapan A., and Areerak K-L., 2018) ระหว่างด้านแหล่งจ่ายที่เป็น วงจรเรียงกระแสที่ไม่มีการควบคุม (diode rectifier) กับด้านโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นานที่มีการควบคุม แต่ถึงอย่างไรก็ตาม แนวทางการห้วงแบบแอกทีฟด้านโหลดจะทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดลดลง ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอการออกแบบค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน (proportional gain) และตัวกรองผ่านแถบ (bandpass filter) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของลูปไปหน้าที่ส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมแรงดันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์โดยอาศัยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search; ATS) (Puangdownreong D., Areerak K-N., Sujitjorn S. and Kulworawanichpong T., 2004; Sopapirm T., Areerak K-N., and Areerak K-L., 2012; Pakdeeto J., Chanpittayagit R., Areerak K-N and Areerak K-L., 2017) ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดดีกว่าเมื่อเทียบกับการออกแบบผ่านวิธีการแบบดั้งเดิม ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพ ซึ่งวิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับทฤษฎีค่าเจาะจง เนื่องจากแบบจำลองที่ได้จะกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตซ์ในระบบ ทำให้เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จะลดความยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังเหมาะสมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น สำหรับการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและผลการออกแบบจะดำเนินการโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม MATLAB รวมถึงการสร้างชุดทดสอบจริง เพื่อแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการที่เสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีสมรรถนะที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมและทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานได้จริง ซึ่งเป็นงานวิจัยต่อยอดจากในอดีตจนถึงปัจจุบัน และยังไม่มียานวิจัยใด ๆ ดำเนินการในลักษณะเช่นนี้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นานรวมถึงการห้วงแบบแอกทีฟด้านโหลด สำหรับรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องได้นำเสนอรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 เป็นลำดับถัดไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษา ค้นคว้า และสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.2.2 เพื่อศึกษา ค้นคว้า และสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบได้

1.2.3 เพื่อศึกษา ค้นคว้า และสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

1.2.4 เพื่อคิดค้น พัฒนา และสร้างองค์ความรู้ใหม่สำหรับการห้วงแบบแอททิฟด้านโหลดโดยใช้ลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

1.2.5 เพื่อศึกษาและดำเนินการสร้างชุดทดสอบสำหรับใช้ยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ และการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวกับวิธีการแบบดั้งเดิม

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกัน

1.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พิสูจน์จากวิธีดีคิวผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

1.3.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ 2 ลูปต่อกันแบบคาสเคดสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ได้ใช้วิธีการแบบดั้งเดิมที่อาศัยความรู้จากทฤษฎีระบบควบคุม

1.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

1.3.5 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์จะอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blockset) ร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

1.3.6 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาพิจารณาระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

1.3.7 การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกันจะทำการห้วงแบบแอททิฟด้านโหลดด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวที่ค่าพิกัดของระบบ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะการห้วงแบบแอคทีฟด้านโหลดและการสร้างเสถียรภาพที่ไม่มีการปรับตัวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก้านกันโดยใช้รูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบดาบเชิงปรับตัวเท่านั้น

1.4.2 การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบจะพิจารณาเฉพาะภายใต้พิกัดการทำงาน of ระบบเท่านั้น

1.4.3 การทำงานของวงจรแปลงผันในระบบจะพิจารณาในย่านโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง (continuous conduction mode: CCM) เท่านั้น

1.4.4 การทำให้เป็นเชิงเส้นจะอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) อันดับหนึ่ง

1.4.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะอาศัยแบบจำลองที่ทำให้เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีค่าเฉพาะ

1.4.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ในขณะที่การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการสร้างชุดทดสอบจริง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.5.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการผสมผสานระหว่างวิธีคิวกกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก้านกัน

1.5.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก้านกันด้วยรูปป้อนไปหน้า

1.5.4 ได้แนวทางและองค์ความรู้ใหม่สำหรับทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันของโหลดลดลงน้อยที่สุดโดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

1.5.5 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอ 2 รูปต่อกันแบบคาสเคดสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคก

1.5.6 ได้ชุดทดสอบของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก้านกัน ซึ่งสามารถใช้สำหรับยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ การบรรเทาการขาด

เสถียรภาพ และการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมด้านโหลดที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวกับวิธีการแบบดั้งเดิม

1.5.7 ได้บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ

1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.6.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการผสมผสานระหว่างวิธีคิวกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นานกัน

1.6.2 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ต่อยอดและพัฒนาให้กับการห้วงแบบแอกทิฟด้านโหลดด้วยการใช้ลูปป้อนไปหน้านำมาประยุกต์ใช้กับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสำหรับใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของลูปป้อนไปหน้าเพื่อให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดดีที่สุดเมื่อเทียบกับการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบเสถียรภาพของระบบในขณะเดียวกัน ซึ่งพบว่าตั้งแต่ในอดีตถึงปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยใด ๆ ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ดำเนินการในลักษณะเช่นนี้กับการห้วงแบบแอกทิฟด้านโหลด

1.6.3 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ยืนยันผลการออกแบบลูปป้อนไปหน้าที่ได้จากวิธีแบบดั้งเดิมและวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสำหรับใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นานกันด้วยชุดทดสอบของจริง

1.7 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รูปเล่มรายงานวิทยานิพนธ์มีส่วนประกอบจำนวน 8 บท โดยในแต่ละบทได้นำเสนอรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของการวิจัย

บทที่ 2 นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อเสถียรภาพ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพ และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

บทที่ 3 นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นานกันกรณียังไม่มีตัวควบคุม

บทที่ 4 นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งนํานกันกรณีมีตัวควบคุม โดยอาศัยการต่อยอดและพัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 3 และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

บทที่ 5 นำเสนอการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งนํานกันโดยใช้ลูปป้อนไปหน้า

บทที่ 6 นำเสนอการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งนํานกันโดยใช้ลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

บทที่ 7 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งนํานกัน โดยใช้ลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

บทที่ 8 นำเสนอบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีอยู่ด้วยกัน 6 ส่วน ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณค่า λ ด้วยการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราฟสัน ภาคผนวก ข ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ภาคผนวก ค ผลการจำลองสถานการณ์หลักการทำงานของลูปป้อนไปหน้าด้วยโปรแกรม MATLAB ภาคผนวก ง แสดงรายละเอียดตารางผลการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาสำหรับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ภาคผนวก จ แสดงรายละเอียดการโปรแกรมตัวควบคุมพีไอที่มีลูปป้อนไปหน้าสำหรับการสร้างเสถียรภาพโดยใช้บอร์ด Arduino Mega2560 ภาคผนวก ฉ แสดงรายการบทความวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการสร้างเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอชีเป็นดีชีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกซ์นานกัน ซึ่งในอดีตที่ผ่านมามีงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้มีผู้ทำการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ด้วยเหตุผลดังกล่าวในบทที่ 2 จึงนำเสนอการศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง รวมถึงงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในงานวิทยานิพนธ์นี้ โดยแบ่งรายละเอียดออกเป็น 4 หัวข้อดังที่อธิบายไว้ข้างต้น โดยในแต่ละหัวข้อได้นำเสนองานวิจัยตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของงานวิจัยนั้นพร้อมทั้งสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องในแต่ละงานไว้พอสังเขป เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ

ปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้รับความนิยมนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน และเมื่อนำวงจรดังกล่าวมาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรอง จะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพนั้นอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมหรืออาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบได้ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยจึงเริ่มศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ โดยปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ ตามที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1976	Middlebrook, R.D.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้าโดยรวม ซึ่งโหลดในลักษณะนี้จะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งนอกจากจะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบแล้ว ยังส่งผลทำให้ระบบเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้น ระบบไฟฟ้าที่มีโหลดลักษณะดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เสถียรภาพ เพื่อหลีกเลี่ยงการขาดเสถียรภาพที่อาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายได้
2004	Jusoh, A.B.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบของการขาดเสถียรภาพที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวรวมถึงทฤษฎีการออกแบบวงจรกรองและการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า
2005	Rivetta, C.H., Williamson, G.A., and Emadi, A.	บทความนี้เสนอวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังและวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีการควบคุมที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ รวมถึงการขาดเสถียรภาพเนื่องจากอิมพีแดนซ์เชิงลบในระบบกำลังไฟฟ้าของเรือดำน้ำ
2006	Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A.	บทความนี้เสนอโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากอิมพีแดนซ์เชิงลบในระบบยานยนต์
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas D.W.P.	บทความนี้เสนอการขาดเสถียรภาพของอิมพีแดนซ์เชิงลบ ด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีเพิ่มมากขึ้นในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน
2011	Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas D.W.P.	บทความนี้เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินและศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและพลวัตขับเคลื่อนที่มีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในตารางที่ 2.1 พบว่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังที่เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน ในสถานะคงตัวโหลดดังกล่าวจะมีค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบ ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดในลักษณะนี้จะมีลักษณะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบต่อระบบโดยรวม โดยทั่วไปโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมจะต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบของโหลดชนิดนี้จะไปลดทอนค่าความต้านทานของวงจรกรอง (damping) เมื่อความต้านทานของวงจรกรองลดลงจะทำให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณที่สูงขึ้น หากสัญญาณที่กระเพื่อมนั้นเกิดการลู่ออกจากจุดการทำงานเดิมจะเรียกสถานะนี้ว่า ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งการขาดเสถียรภาพนั้นอาจทำให้เกิดผลเสียหลายประการ เช่น สูญเสียการควบคุมทั้งระบบ สมรรถนะในการทำงานของระบบควบคุมลดลง รวมถึงอุปกรณ์สวิตช์เสียหาย เป็นต้น และนอกจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบที่ได้กล่าวไปในข้างต้นแล้ว ยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้น นั่นคือทำให้ระบบเป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อโหลดวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจึงมีความจำเป็นอย่างมาก

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแนวทางการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน การดำเนินงานวิจัยในส่วนนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษางานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับแนวทางการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรแปลงผันให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา เนื่องจากแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาหากนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยตรงจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก สำหรับงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1993	Sudhoff, S. D., and Wasynczuk, O.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันที่มีโหลดเป็นเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัส
1994	Rim, C.T., Choi, N.S., Cho, G.C., and Cho, G.H.	บทความนี้นำเสนอการแปลงวงจรไปอยู่บนแกนดีคิวสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ใช้เทคนิคการควบคุมการจ่ายกระแสด้วยพีดับเบิลยูเอ็ม
1997	Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D., and Ehsano, M.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2004	Emadi, A.	บทความนี้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสซึ่งมีโหลดตัวต้านทานขนานกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยแบบจำลองของวงจรได้อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปและวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีค่าเจาะจง
2004	Uan-Zo-li, A., Burgos, R.P., Lacaux, F., Wang, F., and Boroyevich, D.	บทความนี้เสนอการหาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสแบบหกและสิบสองพัลส์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	บทความนี้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมด้วยพีดับเบิลยูเอ็ม โดยใช้วิธีการแปลงดีคิวและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีค่าเจาะจง พร้อมทั้งแสดงผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกับตัวต้านทาน โดยวิธีการแปลงดีคิว และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีค่าเจาะจง พร้อมทั้งศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบอีกด้วย
2009	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., de Lillo, L., Asher, G.M., Thomas, D.W.P., Watson, A., and Wu, T.	บทความนี้แนะนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินซึ่งมีแหล่งจ่ายเป็นแหล่งจ่ายเอชี่สามเฟส โดยคำนึงถึงพลวัตที่เกิดขึ้นเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยวิธีการแปลงดีคิวโดยระบบที่พิจารณาประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรอง รวมถึงความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง และ โหลดมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรที่มีการควบคุมความเร็ว การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอาศัยวิธีค่าเจาะจง การแสดงผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากการทดลอง
2011	Chaijarurnudomrung, K., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้วิธีดีคิวในระบบไฟฟ้ากำลังเอชี่เป็นดัชนีที่ควบคุมเฟสซึ่งมีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
2014	Chanpittayagit, R., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	บทความนี้แนะนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์-บูสต์ด้วยวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังดังตารางที่ 2.2 ซึ่งมีจุดประสงค์หลักคือ เพื่อหาแนวทางในการเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาไปเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งพบว่าวิธีการที่มีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสคือวิธีคิวและวิธีการที่เหมาะสมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงคือวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พิจารณาจากระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนาน พบว่ามีส่วนประกอบทั้งระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน อีกทั้งยังเหมาะสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอีกด้วย สำหรับรายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้นำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ปัจจุบันได้มีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นแบบจำลองไม่ขึ้นอยู่กับเวลามาทำการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ทั้งนี้เพื่อลดความยุ่งยากการทำงานของโหลดดังกล่าวที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และหลีกเลี่ยงผลเสียต่อระบบดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.3

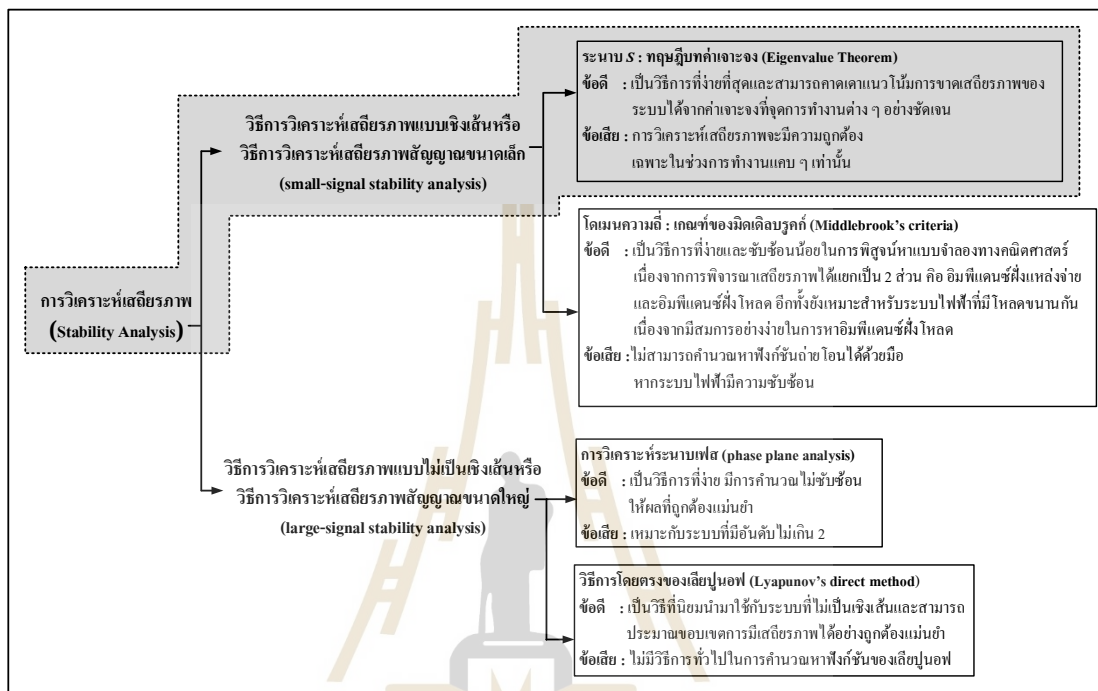
ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1969	Lipo, T. A., and Krause, P. C.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากแผนภาพในควิสต์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับวงจรอินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
2002	Feng, X., Liu, J., and Lee, F.C.	บทความนี้เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดขนานกัน โดยใช้แผนภาพในควิสต์และวิธีการของมิดเดิลบรูก์

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2003	Wang, X., Yao, R., and Rao, F.	บทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กโดยพิจารณาจากอินพุต-เอาต์พุต อิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชีเป็นดีซี
2008	Griffio, A., Wang, J., and Howe, D.	บทความนี้เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติด้วยวิธีการระนาบเฟสและวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ พร้อมทั้งประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีเบรย์ทันและมอเซอร์
2011	Weijing, Du., Junming, Zhang., Yang, Zhang., and Zhoamong, Qian.	บทความนี้เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้าในรถยนต์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสและวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ พร้อมทั้งประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟกำลังสอง
2011	Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินและศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและพลวัตการขับเคลื่อนที่มีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
2012	Griffo, A., and Wang, J.	บทความนี้เสนอการวิเคราะห์สัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชีเป็นดีซีในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน ภายใต้การรบกวนขนาดใหญ่ โดยมุ่งเน้นการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้โดยอาศัยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์

จากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวที่ 2.3 ซึ่งสามารถแสดงสรุปเป็นแผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพสรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

จากแผนภาพในรูปที่ 2.1 จะพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีการ คือ การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นและการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยวิธีการแรกการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น จะประกอบด้วย 2 แนวทางที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน คือ การวิเคราะห์เสถียรภาพบนระนาบ S ด้วยทฤษฎีบทค่าเฉพาะและการวิเคราะห์เสถียรภาพบนโดเมนความถี่ด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูค ซึ่งทั้ง 2 แนวทางเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพจะมีความถูกต้องในช่วงการทำงานที่แคบเท่านั้น (small range operation) เนื่องจากการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal) ในขณะที่วิธีการที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพได้ในช่วงการทำงานที่กว้าง (large range operation) เนื่องจากการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ (large-signal) ซึ่งประกอบด้วย 2 แนวทางคือ การวิเคราะห์ระนาบเฟสและการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยตรงของเลียปูนอฟ โดยแนวทางแรกเป็นวิธีการทางกราฟฟิกซึ่งจะสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ 2 ตัว การวิเคราะห์

ระนาบเฟสนี้เป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และได้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำ แต่ข้อเสียของการวิเคราะห์ระนาบเฟสคือ สามารถใช้กับระบบที่มีอันดับไม่เกิน 2 ถ้าอันดับของระบบเกิน 2 จำเป็นที่จะต้องทำการแปลงรูปแบบให้เป็นกลุ่มของระบบอันดับ 2 ซึ่งจะมีความยุ่งยากซับซ้อนหรือทำให้ผลการวิเคราะห์เกิดความผิดพลาดได้ สำหรับแนวทางที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยตรงของเลียปูนอฟเป็นแนวทางที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพราะนอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้วยังสามารถที่จะประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม แนวทางนี้จำเป็นต้องคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณาหลังจากนั้นนำฟังก์ชันที่ได้ไปตรวจสอบเสถียรภาพตามทฤษฎีการมีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ซึ่งข้อเสียของแนวทางนี้คือ ไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟและในทางปฏิบัติการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการที่ง่ายที่สุดนั่นคือ วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง แต่ถึงอย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพดังกล่าวทำได้เพียงคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพเท่านั้น แต่ไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเพื่อกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ สามารถคาดเดาจุดการทำงานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ แต่ไม่สามารถทำให้ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดในระดับกำลังที่สูงขึ้นจนถึงค่าพิกัดที่ตั้งไว้ได้ โดยไม่ประสบปัญหาจากการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า พร้อมทั้งหาแนวการต่อและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันสามารถแสดงเป็นปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2005	Liu, X.Y., and Forsyth, A.J.	บทความนี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวควบคุมการสร้างเสถียรภาพระบบไม่เป็นเชิงเส้นในการควบคุมความเร็วของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบ BLDC
2007	Liu, X.Y., Forsyth, A.J., and Cross, A.M.	บทความนี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยค่าความต้านทานอินพุตเชิงลบในการควบคุมความเร็วของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบ BLDC
2008	Usman Iftikhar, M., Godoy, E., Lefranc, P., Sadarnac, D., and Karimi, C.	บทความนี้เสนอการควบคุมตำแหน่งโพลเด่นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่เชื่อมต่อวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีผ่านวงจรกรองสัญญาณดิซี
2009	Rahimi, A.M., and Emadi, A.	บทความนี้เสนอวิธีการหนึ่งแบบแยกที่ไฟในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย
2009	Weaver, W.W., and Krein, P.T.	บทความนี้เสนอวิธีการควบคุมวงจรบัฟเฟอร์กำลังให้เหมาะสมที่สุดสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
2010	Rahimi, A.M., Williamson, G.A., and Emadi, A.	บทความนี้ได้นำเสนอวิธีดูดยกเลิกในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการกำจัดค่าอิมพีแดนซ์คิคลบ
2011	Cespedes, M., Xing, L., and Sun, J.	บทความนี้เสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีแบบพาสซีฟสำหรับวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี

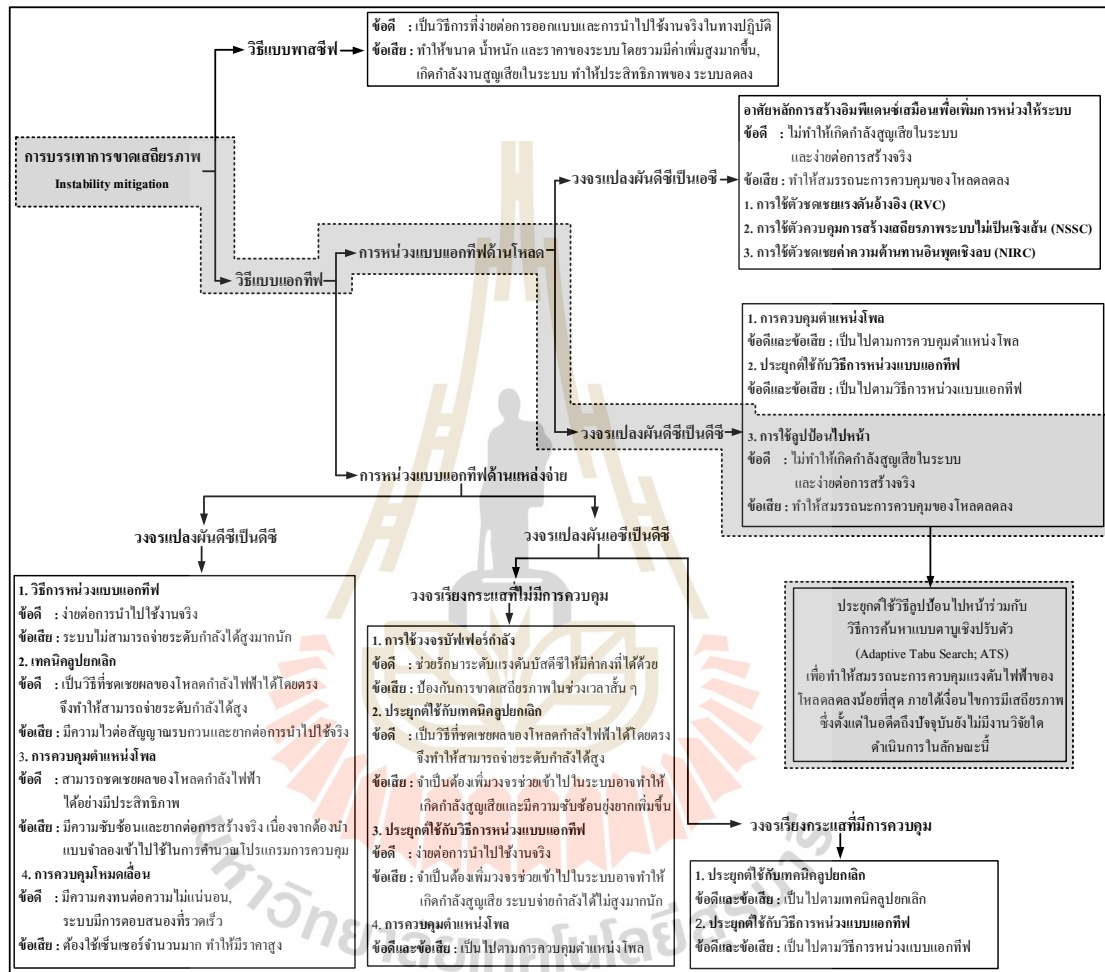
ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Kim, S., and Williamson, S. S.	บทความนี้นำเสนอการควบคุมตำแหน่งชั่วคราว จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายเพื่อทำ การชดเชยค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ
2012	Zhang, X., Ruan, X., and Kim, H.	บทความนี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพของวงจร แปลงกำลังผันดิซเป็นดิซโดยอาศัยวงจรแปลงผัน กำลังดิซเป็นดิซเป็นวงจรช่วย นอกจากนี้ยังได้มี การยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพของระบบ ดังกล่าวด้วยชุดทดสอบ
2012	Inoue, K., Kato, T., and Inoue, M.	บทความนี้นำเสนอการควบคุมตำแหน่งชั่วคราว ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่เชื่อมต่อโหลด กำลังไฟฟ้าคงตัวผ่านวงจรกรองสัญญาณดิซโดย อาศัยวงจรช่วยที่เป็นวงจรแปลงผันกำลังดิซเป็น ดิซ
2012	Magne, P., Marx, D., Nahid-Mobarakkeh, B., and Pierfederic, S.	บทความนี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยการ หั่นวงแบบแอททีฟด้านโหลด โดยอาศัยตัวเก็บ ประจุเสมือนเพื่อเติมการหั่นวงในวงจรกรอง สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ สามเฟส
2012	Mohamed, Y.A-R.I., Radwan, A.A.A., and Lee, T.K.	บทความนี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วย วิธีการหั่นวงแบบแอททีฟได้ในการควบคุม ความเร็วของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสสลับสามเฟสแบบ PMSM
2014	Zhao, Y., Qiao, W., and Ha, D.	บทความนี้นำเสนอการควบคุมโหมดการเลื่อน สำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่เชื่อมต่อโหลด กำลังไฟฟ้าคงตัวเพื่อทำการชดเชยค่าอิมพีแดนซ์ ติดลบ

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2015	Wu, M., and D. D. C., Lu.	บทความนี้นำเสนออุปสรรคไปหน้าในการสร้างเสถียรภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่เชื่อมต่อวงจรแปลงผันแบบบักก์ผ่านวงจรกรองสัญญาณคิซี พร้อมทั้งได้วิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้แผนภาพในควิสต์และวิธีการของมิดเดิลบรูก์ นอกจากนี้ยังได้ยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพของระบบดังกล่าวด้วยชุดทดสอบ
2016	Sopapirm, T., Areerak K-N., and Areerak K-L.	บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการหน่วงแบบแอกทีฟในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นคิซีที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมทั้งวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการวิเคราะห์แบบระนาบเฟส นอกจากนี้ยังได้ยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบดังกล่าวด้วยชุดทดสอบจากห้องปฏิบัติการ
2018	Areerak, K-N., Sopapirm, T., Bozhko, S.V., Hill, C. I., Suyapan, A., and Areerak, K-L	บทความนี้ได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีอุปยกเล็กที่มีการปรับตัวได้สำหรับระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้าเอซีเป็นคิซีที่ไม่มีการควบคุม พร้อมทั้งวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการวิเคราะห์แบบระนาบเฟส นอกจากนี้ยังได้มีการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบดังกล่าวด้วยชุดทดสอบจากห้องปฏิบัติการ
2018	Sopapirm, T.	บทความนี้เสนอการประยุกต์ใช้วิธีการหน่วงแบบแอกทีฟในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพทางฝั่งโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นคิซีที่จ่ายวงจรแปลงผันแบบบักก์

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบดังตารางที่ 2.4 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ารวมถึงการนำวิธีการที่ได้นำเสนอไว้ในอดีตมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพสรุปการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

จากแผนภาพในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการคือ วิธีแบบพาสซีฟ และวิธีแบบแอคทีฟ โดยวิธีแบบพาสซีฟจะอาศัยการปรับเปลี่ยนวงจรกรองด้วยการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุหรือลดค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองดิซซี รวมถึงการเพิ่มอุปกรณ์พาสซีฟ ได้แก่ ตัวต้านทาน หรือตัวต้านทานมาต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า หรือต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำเข้าไปในระบบ เพื่อเพิ่มการหน่วงให้กับระบบ ซึ่งส่งผลทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังสามารถจ่ายโหลดได้เพิ่มมากขึ้น นั่นคือระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น โดยวิธีการดังกล่าวเป็น

วิธีการที่ง่ายต่อการออกแบบและการนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติ แต่มีข้อเสียคือ ทำให้ขนาดน้ำหนัก และราคาของระบบโดยรวมมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้น อีกทั้งทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นในระบบ ในขณะที่วิธีแบบแอกทิฟเป็นวิธีการที่อาศัยการสร้างตัวชดเชยที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพในโครงสร้างการควบคุม ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือมากกว่าวิธีแบบพาสซีฟ เนื่องจากการไม่มีการปรับเปลี่ยนวงจรกรอง โดยวิธีการนี้สามารถแบ่งได้ 2 แนวทางคือ แนวทางที่ 1 การหั่นแบบแอกทิฟด้านแหล่งจ่ายและแนวทางที่ 2 การหั่นแบบแอกทิฟด้านโหลด สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการหั่นแบบแอกทิฟด้าน โหลดด้วยลูปป้อนไปหน้าเนื่องจากไม่ต้องการทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น อันเนื่องจากการเพิ่มวงจรช่วยระหว่างด้านแหล่งจ่ายที่เป็นวงจรเรียงกระแสที่ไม่มีการควบคุมกับด้านโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบัลค์ขนานที่มีการควบคุม แต่ถึงอย่างไรก็ตาม แนวทางการหั่นแบบแอกทิฟด้าน โหลดจะทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดลดลง ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการออกแบบค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วนและตัวกรองผ่านแถบ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของลูปป้อนไปหน้าที่ส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมแรงดันอย่างมีนัยสำคัญ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่าวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดดีที่สุดเมื่อเทียบกับการออกแบบผ่านวิธีการแบบดั้งเดิม ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีงานวิจัยใด ๆ ดำเนินการในลักษณะเช่นนี้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอชไอเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัลค์ขนานรวมถึงการหั่นแบบแอกทิฟด้านโหลดเหมือนงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยรายละเอียดต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพ และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาได้นำเสนอไว้ในลำดับถัดไป

2.6 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญเกี่ยวกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงที่มีต่อระบบไฟฟ้า แนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และที่มาสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบ ซึ่งองค์ความรู้เหล่านี้ทำให้สามารถต่อยอดและพัฒนาลูปป้อนไปหน้าในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอชไอเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัลค์ขนานให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังไม่มีงานวิจัยในอดีตประยุกต์ใช้วิธีการดังกล่าวในลักษณะเช่นนี้อีกด้วย

บทที่ 3

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มี โหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งนานครึ่งที่ไม่มีการควบคุม

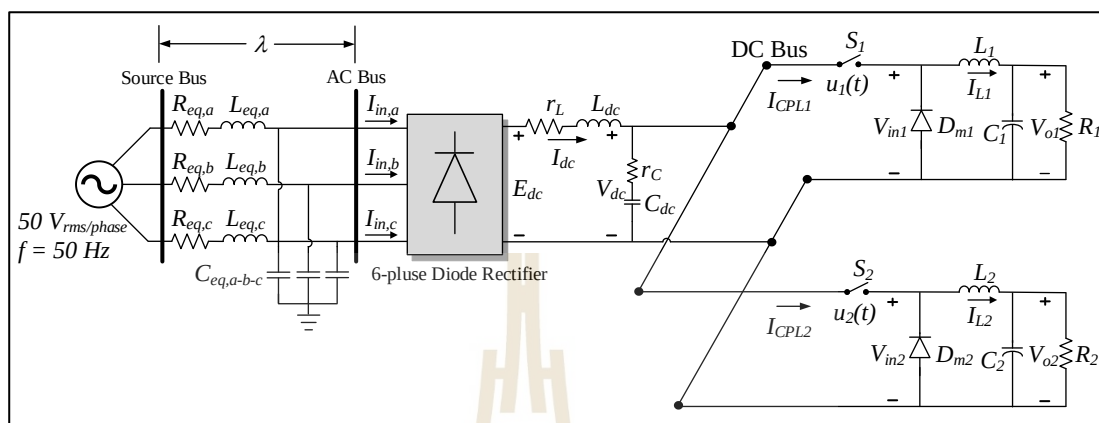
3.1 บทนำ

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งนานครึ่งให้มีความถูกต้องแม่นยำสูง มีความสำคัญอย่างยิ่งในการนำไปใช้ต่อยอดและพัฒนาเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ และการออกแบบอุปกรณ์ไปหน้าด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ทำให้ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีสมรรถนะลดลงน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ทฤษฎีพื้นฐานการแปลงแกนดีคิวด้วยวิธีการแปลงของปาร์ก ซึ่งวิธีการแปลงแกนดีควินี้มีข้อดีคือเป็นวิธีที่สามารถลดความซับซ้อนของระบบไฟฟ้าสามเฟสสมมูลได้เป็นอย่างดี ผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปที่มีความเหมาะสมกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี นอกจากนี้ยังนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นในบทนี้ เนื้อหาในบทที่ 3 จะเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งนานครึ่งที่มีการควบคุม ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งนานครึ่งที่ไม่มีการควบคุม

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะประกอบไปด้วย 5 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสสมมูล ทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายผ่านสายส่งกำลังให้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 2 สายส่งกำลังทางดำนเอซี ส่วนที่ 3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่ 4 วงจรกรองสัญญาณดีซี ทำหน้าที่ลดกระแสสลับ (ripple current) และแรงดันพลิว (ripple voltage) ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ตามลำดับ ส่วนที่ 5

วงจรแปลงผันแบบบัคกัซนานที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณคิซีให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้

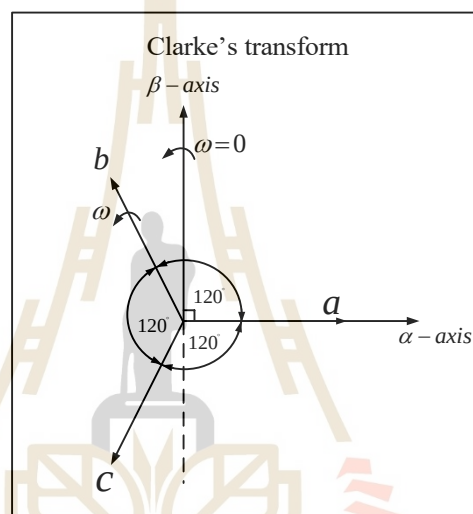


รูปที่ 3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นคิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกัซนานกันกรณีที่ไม่มีการควบคุม

พิจารณาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 พบว่าเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time varying model) อันเนื่องมาจากผลการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์และวงจรแปลงผันแบบบัคกัซนานกัน ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีคิควผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยในส่วนแรกจะใช้วิธีคิควสำหรับพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์รวมทั้งสายส่งกำลังฝั่งเอซี และในส่วนที่สองจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการกำจัดสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคกัซนานทั้ง 2 ชุด ซึ่งทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time invariant model) และทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบมีความง่ายมากขึ้นสำหรับรายละเอียดทฤษฎีพื้นฐานที่จะนำมาใช้สำหรับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 และ 3.2.4 เป็นลำดับถัดไป

3.2.1 การแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transform)

การแปลงของคลาร์กเป็นการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ โดยวิธีการแปลงของคลาร์ก แสดงได้ด้วยแผนภาพเวกเตอร์ดังรูปที่ 3.2 ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณาการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสที่มีส่วนประกอบลำดับเฟสบวก (positive sequence) ซึ่งมีมุมห่างกัน 120 องศา หรือ $2\pi/3$ เรเดียน และแกน $\alpha\beta$ จะต้องทำมุมตั้งฉากกัน โดยกำหนดให้แกน α วางตัวในแนวเดียวกันกับเฟส a สำหรับสมการการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ แสดงได้ดังสมการที่ (3-1)



รูปที่ 3.2 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน $\alpha\beta$

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

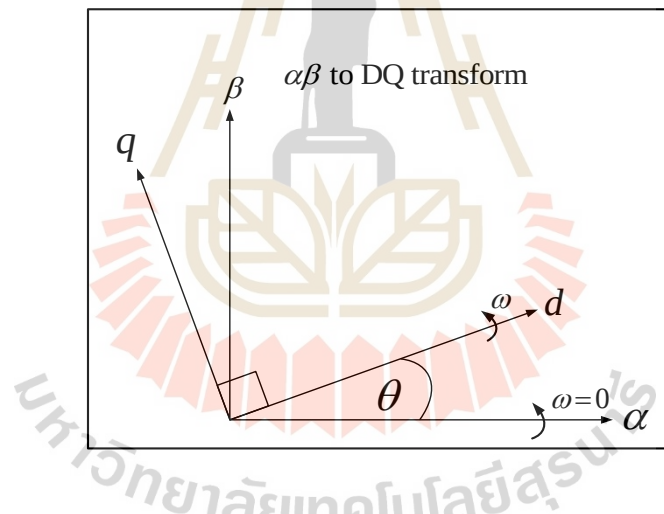
เมื่อ k คือ ตัวปรับคูณการแปลง งานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ตัวปรับคูณตามข้อตกลงแบบค่ากำลังคงที่ (power conserving convention) ซึ่งมีค่า $k = \sqrt{2/3}$ (Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M., and Thomas D.W.P., 2008)

สมการอินเวอร์สการแปลงของคลาร์กที่ใช้ในการแปลงปริมาณบนแกน $\alpha\beta$ มายังแกน abc แสดงได้ดังสมการที่ (3-2)

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

3.2.2 การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ มายังแกน dq

การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ (stationary frame) ไปอยู่บนแกน dq (rotating frame) จะพิจารณาโดยใช้แผนภาพเวกเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของสมการระหว่างแกน $\alpha\beta$ และแกน dq เป็นดังสมการที่ (3-3) เมื่อ θ คือ มุมการหมุนสำหรับการแปลงดีคิว ซึ่งมีค่าเท่ากับ ωt



รูปที่ 3.3 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq

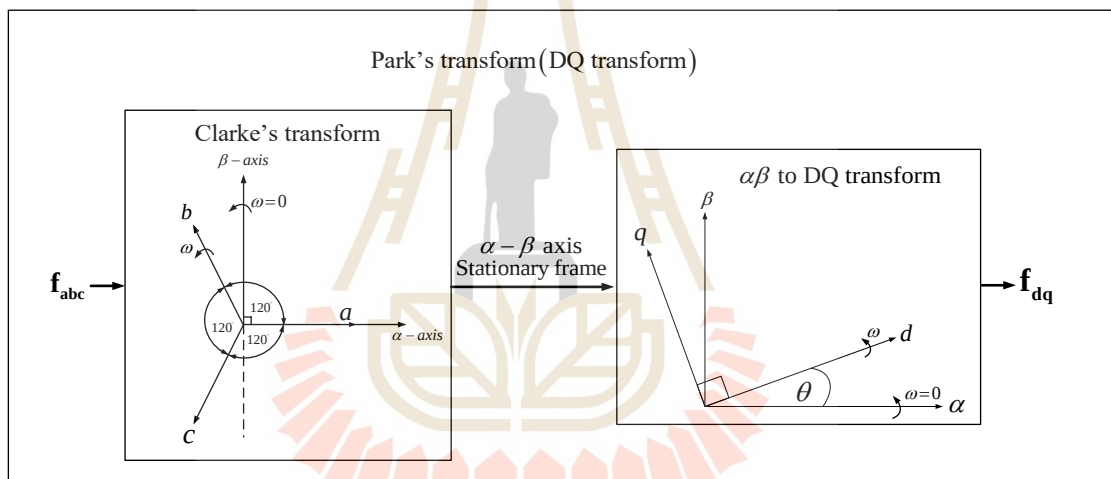
$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

สมการอินเวอร์สการแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq แสดงได้ดังสมการที่ (3-4)

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

3.2.3 วิธีการแปลงของปาร์ค (Park's Transform)

การแปลงของปาร์คเป็นวิธีการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน dq โดยการแปลงของปาร์คแสดงได้ด้วยแผนภาพเวกเตอร์ดังรูปที่ 3.4 จากรูปอธิบายได้ว่าแกน d จะตั้งฉากกับแกน q เป็นมุม 90 องศาหรือ $\pi/2$ เรเดียน สมการการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน dq พิจารณาจากสมการที่ (3-5) และอินเวอร์สการแปลงของปาร์คแสดงดังสมการที่ (3-6)



รูปที่ 3.4 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน dq

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

เมื่อ θ คือ มุมการหมุนสำหรับการแปลงดีคิว ซึ่งมีค่าเท่ากับ ωt

3.2.4 วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่ามีอุปกรณ์สวิตช์ปรากฏอยู่ในวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุด ซึ่งผลของอุปกรณ์สวิตช์จะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นจึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการกำจัดสัญญาณการสวิตช์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา สำหรับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมีหลักการพื้นฐานที่สำคัญคือ จะใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนของตัวแปรสถานะของวงจร (complex Fourier coefficients) ไปเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ซึ่งอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

โดยทั่วไป สัญญาณ $f(t)$ ใดๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบเป็น T สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (Gamelin T.W, 2000) ได้ดังสมการที่ (3-7)

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k e^{jk\omega t} \quad (3-7)$$

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

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จะใช้ $\langle x \rangle_k(t)$ ของสัญญาณแทนตัวแปรสถานะของระบบ ซึ่งสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (3-8)

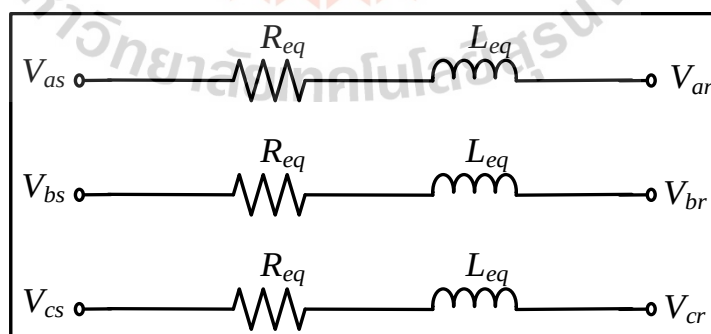
$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega t} dt \quad (3-8)$$

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์การพิจารณาแบบจำลองของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีจะไม่พิจารณาผลของฮาร์โมนิกในอันดับมากกว่าศูนย์ เนื่องจากไม่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงใช้การประมาณอันดับศูนย์ (zero-order approximation) ของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (Mahdavi J., Emaadi A., Bellar M. D. and Ehsani M., 1997) เพื่อหาเพียงสัมประสิทธิ์ที่ความถี่มูลฐาน โดยการกำหนดค่า k ของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนให้มีค่าเท่ากับศูนย์

3.2.5 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ขนานกันจะอาศัยทฤษฎีการแปลงดีคิวของปาร์กผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับการเวลา อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการเวลา ซึ่งสามารถพิจารณาแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนทางด้านแหล่งจ่ายจะใช้วิธีดีคิวและส่วนทางด้านโหลดจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

พิจารณาทางด้านแหล่งจ่ายจากรูปที่ 3.1 จะประกอบไปด้วย วงจรสมมูลสายส่งที่มีตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ รวมถึงวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ในขั้นแรกพิจารณาวงจรสมมูลสายส่งที่มีตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์ดังกล่าวได้ดังสมการที่ (3-9) และสามารถแปลงให้สมการอยู่บนแกนดีคิวโดยอาศัยสมการการแปลงของปาร์กและอินเวอร์สการแปลงของปาร์กได้ดังสมการที่ (3-10) (เทพพนม โสภะเพิ่ม, 2554, จักรกริช ภัคดีโต, 2557)

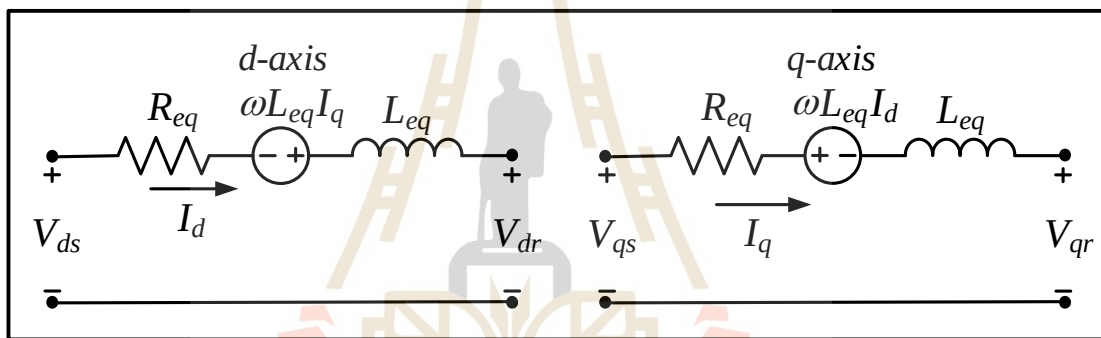


รูปที่ 3.5 ตัวต้านทานอนุกรมตัวเหนี่ยวนำในสายส่ง

$$\Delta V_{\text{drop,abc}} = R_{eq} \mathbf{I}_{abc} + L_{eq} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{abc} \quad (3-9)$$

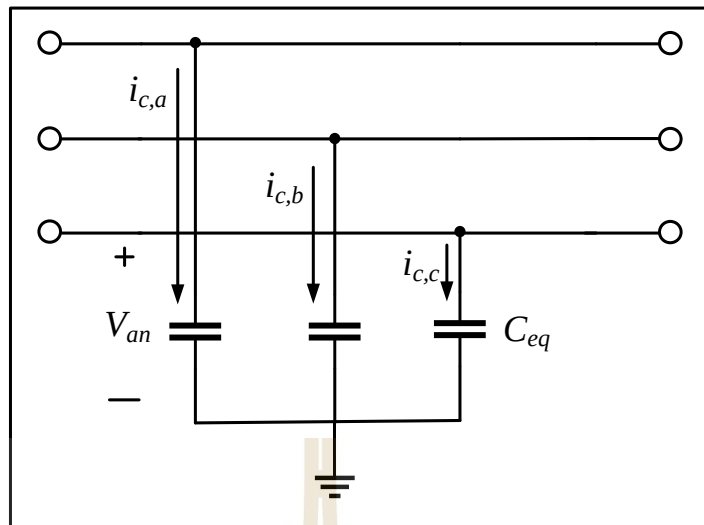
$$\begin{cases} \Delta V_d = R_{eq} I_d - \omega L_{eq} I_q + L_{eq} \frac{d}{dt} I_d \\ \Delta V_q = R_{eq} I_q + \omega L_{eq} I_d + L_{eq} \frac{d}{dt} I_q \end{cases} \quad (3-10)$$

จากสมการที่ (3-10) สามารถใช้ในการสร้างวงจรสมมูลอนุกรมของตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสที่อยู่บนแกนดีคิวได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลตัวต้านทานอนุกรมตัวเหนี่ยวนำของสายส่งบนแกนดีคิว

ในลักษณะเดียวกันสามารถพิจารณาวงจรสมมูลขนานของตัวเก็บประจุของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งสามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของสายส่งได้ดังสมการที่ (3-11) และสามารถแปลงให้สมการอยู่บนแกนดีคิวโดยอาศัยสมการการแปลงของปาร์กและอินเวอร์สการแปลงของปาร์กได้ดังสมการที่ (3-12) (เทพพนม โสภะเพิ่ม, 2554, จักรกริช ภักดีโต, 2557)

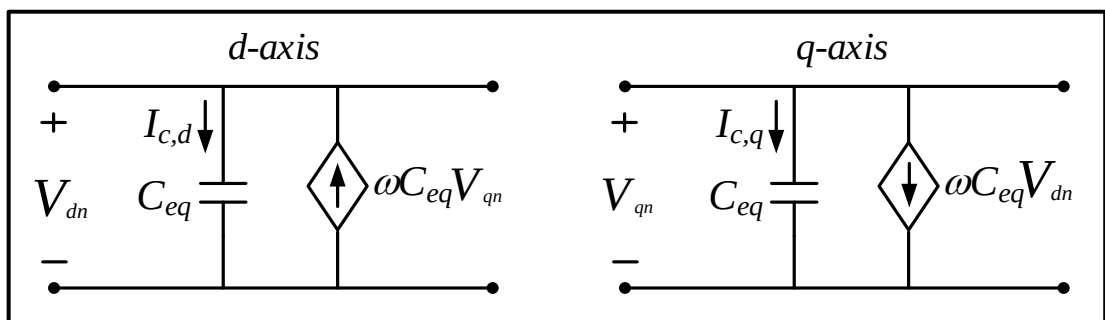


รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส

$$\mathbf{I}_{c,abc} = C_{eq} \frac{d}{dt} \mathbf{V}_{abc} \quad (3-11)$$

$$\begin{cases} I_{c,d} = -\omega C_{eq} V_q + C_{eq} \frac{d}{dt} V_d \\ I_{c,q} = \omega C_{eq} V_d + C_{eq} \frac{d}{dt} V_q \end{cases} \quad (3-12)$$

จากสมการที่ (3-12) สามารถใช้ในการสร้างวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสที่อยู่บนแกนดิกิว ได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุบนแกนดิกิว

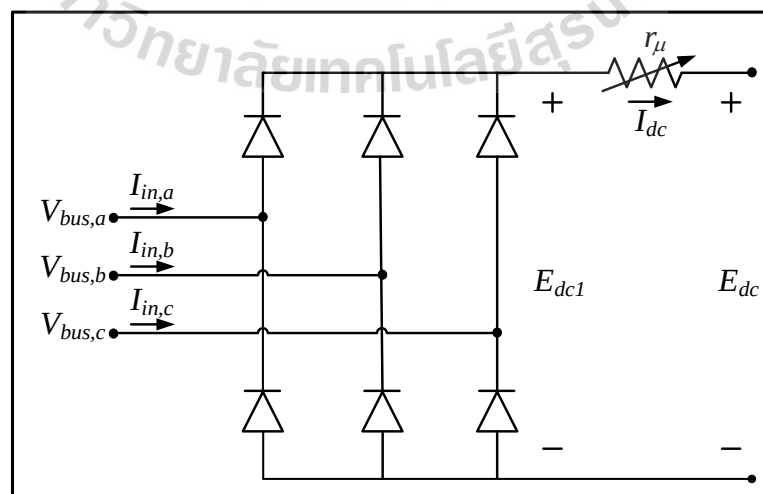
ในลำดับต่อมาจะเป็นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตช์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำหลักการในการแปลงดีคิวของปาร์กเพื่อใช้กำจัดสัญญาณการสวิตช์ของไดโอดในวงจรเรียงกระแส ซึ่งสามารถทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา โดยจะต้องอยู่ภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้

1. แอมพลิจูดของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสต้องมีค่าคงที่และสมดุล
2. ไม่พิจารณาฮาร์โมนิก (harmonics) ที่เกิดขึ้นในระบบ
3. มุมเหลื่อม (overlap angle) μ มีค่าน้อยกว่า 60 องศา
4. วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์พิจารณาในช่วงโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง (continuous conduction mode : CCM)

พิจารณาผลจาก L_{eq} ในสายส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งส่งผลกระทบทำให้เกิดมุมเหลื่อมและทำให้แรงดันเอาต์พุตตก ผลกระทบเหล่านี้สามารถพิจารณาแทนได้ด้วยการใส่ตัวต้านทานปรับค่าได้ r_μ ทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส โดยแสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งค่าความต้านทานปรับค่า r_μ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-13)

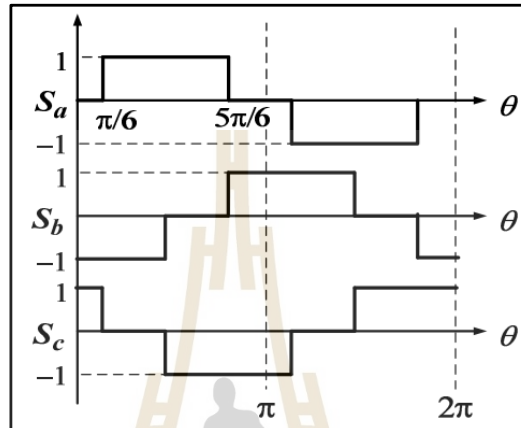
$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (3-13)$$

เมื่อ ω คือ ความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่ายไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีความต้านทานปรับค่าได้

จากรูปที่ 3.9 E_{dc1} แทนแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโดยไม่พิจารณาผลของมุมเหลื่อม ในขณะที่ E_{dc} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่พิจารณาผลของมุมเหลื่อม เมื่อพิจารณาผลกระทบดังกล่าวให้อยู่ทางด้านกระแสดตรง ทำให้สามารถวิเคราะห์หาสัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบจากมุมเหลื่อม แสดงดังในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

จากสัญญาณการสวิตช์ S_{abc} ในรูปที่ 3.10 จะอาศัยอนุกรมฟูริเยร์ ซึ่งพิจารณาที่เฉพาะความถี่มูลฐานมาดำเนินการวิเคราะห์ เนื่องจากฮาร์โมนิกจะไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้น จะได้สัญญาณการสวิตช์สามเฟส แสดงได้ดังสมการที่ (3-14)

$$\mathbf{S}_{abc} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\sin(\omega t + \phi) \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi\right) \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \phi\right) \right]^T \quad (3-14)$$

เมื่อ ϕ คือ มุมเฟสที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ

จากสัญญาณการสวิตช์ในสมการที่ (3-14) ทำการแปลงสัญญาณการสวิตช์ให้อยู่บนแกนดีคิวโดยใช้สมการที่ (3-5) และ (3-6) จะได้

$$\mathbf{S}_{dq} = \mathbf{K} \mathbf{S}_{abc}$$

$$\mathbf{S}_{dq} = \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi - \theta) \\ \cos(\omega t + \phi - \theta) \end{bmatrix}$$

เมื่อ กำหนดให้ $\theta = \omega t - \frac{\pi}{2} + \phi_1$ จะได้สัญญาณการสวิตช์ที่อยู่บนแกนดีควดดังสมการที่ (3-15)

$$\mathbf{S}_{dq} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi - \phi_1) \\ \sin(\phi - \phi_1) \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

เมื่อ ϕ_1 คือ มุมเฟสที่ใช้ในการหมุนแกน dq

พิจารณาหาความสัมพันธ์แรงดันและกระแสไฟฟ้าระหว่างเอาต์พุตและอินพุตของ วงจรเรียงสามเฟสแบบบริดจ์จะได้ดังสมการที่ (3-16) และ (3-17) ตามลำดับ

$$\mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{S}_{abc} I_{dc} \quad (3-16)$$

$$E_{dc,1} = \mathbf{S}_{abc}^T \mathbf{V}_{bus,abc} \quad (3-17)$$

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

ทำการแปลงสมการที่ (3-16) ให้อยู่บนแกนดีคว โดยใช้สมการที่ (3-5) จะได้ สมการความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่อยู่บนแกนดีควดังสมการที่ (3-18)

$$\mathbf{KI}_{in,abc} = \mathbf{KS}_{abc} I_{dc}$$

$$\begin{cases} I_{in,d} = S_d I_{dc} \\ I_{in,q} = S_q I_{dc} \end{cases} \quad (3-18)$$

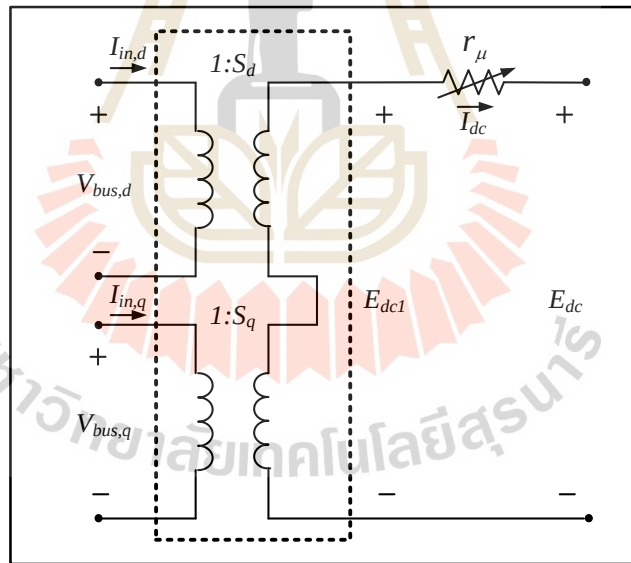
ทำการแปลงสมการที่ (3-17) ให้อยู่บนแกนดีคิว โดยใช้สมการที่ (3-5) จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่อยู่บนแกนดีคิวดังสมการที่ (3-19)

$$E_{dc,1} = [\mathbf{K}^{-1} \mathbf{S}_{dq}]^T [\mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}_{bus,dq}]$$

$$E_{dc,1} = \mathbf{S}_{dq}^T [\mathbf{K}^{-1}]^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}_{bus,dq}$$

$$E_{dc,1} = S_d V_{bus,d} + S_q V_{bus,q} \quad (3-19)$$

จากสมการที่ (3-18) และ (3-19) สามารถเขียนวงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสสามเฟสบนแกนดีคิวในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์บนแกนหมุนดีคิว

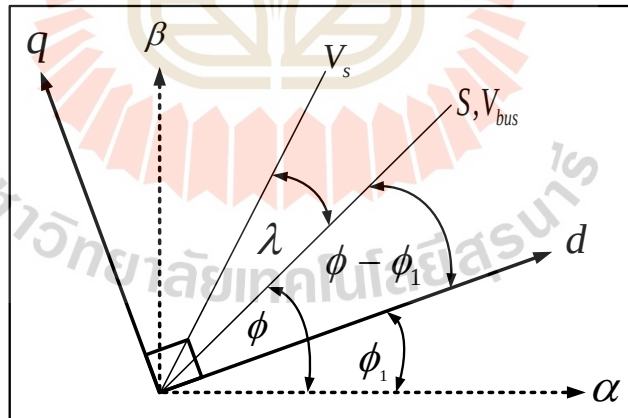
ในลำดับถัดไปจะเป็นการแปลงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้เป็นแหล่งจ่ายบนแกนดีคิวโดยพิจารณาจากสมการของแหล่งจ่ายดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{s,a} \\ V_{s,b} \\ V_{s,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \sin(\omega t) \\ V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

ทำการแปลงสมการที่ (3-20) ให้อยู่บนแกนดีคิว โดยใช้สมการที่ (3-5) จะได้สมการแหล่งจ่ายบนแกนดีคิว ดังสมการที่ (3-21)

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} V_m \cos(\lambda + \phi - \phi_1) \\ V_m \sin(\lambda + \phi - \phi_1) \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

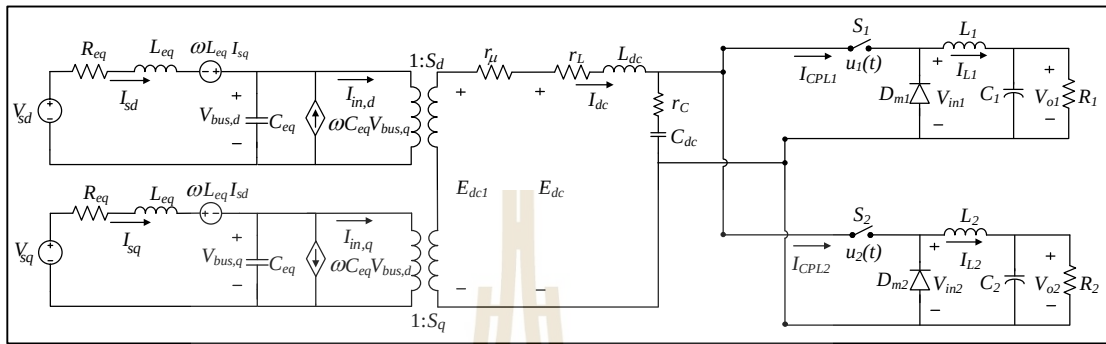
จากสมการที่ (3-15) และ (3-21) เป็นสมการการแปลงให้สัญญาณการสวิตช์ของไดโอดและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้อยู่บนแกนหมุนดีคิว ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของสมการดังกล่าวได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว

จากระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกัน ในรูปที่ 3.1 พบว่าทางฝั่งแหล่งจ่ายที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อแปลงให้อยู่บนแกนดีคิว โดยอาศัยสมการการแปลงของปาร์กและอินเวอร์สการแปลงของปาร์กในสมการที่ (3-5) และ สมการที่(3-6) จะทำให้ได้วงจรสมมูลบนแกนดีคิวที่เป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งง่ายต่อ

การวิเคราะห์ห้วงจรด้วยทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน อีกทั้งยังสามารถกำจัดสัญญาณการสวิตช์ของไดโอดเรียงกระแสสามเฟสซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้การวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าจะทำได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่เวลา



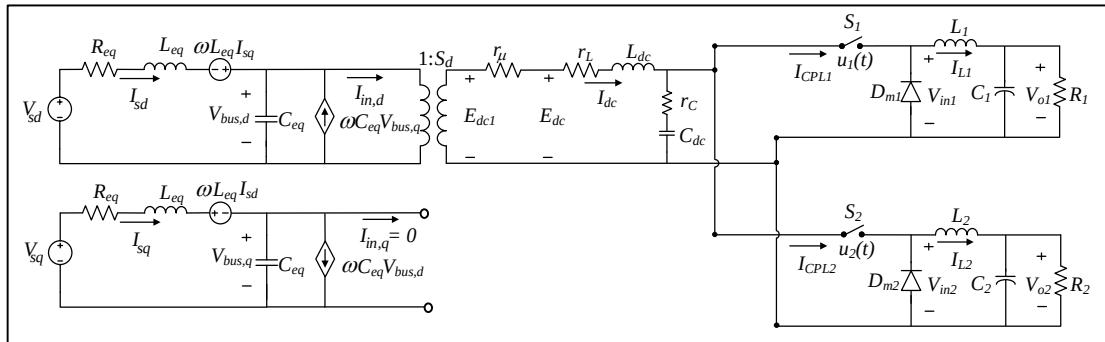
รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว

จากสมการที่ (3-15) และสมการที่ (3-21) สามารถทำให้วงจรสมมูลบนแกนดีคิวที่แสดงในรูปที่ 3.13 อยู่ในรูปวงจรง่ายด้วยการกำหนดให้ $\phi_1 = \phi$ และจากการกำหนดค่าตัวแปรดังกล่าวสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (3-22) และ (3-23)

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} V_m \cos(\lambda) \\ V_m \sin(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

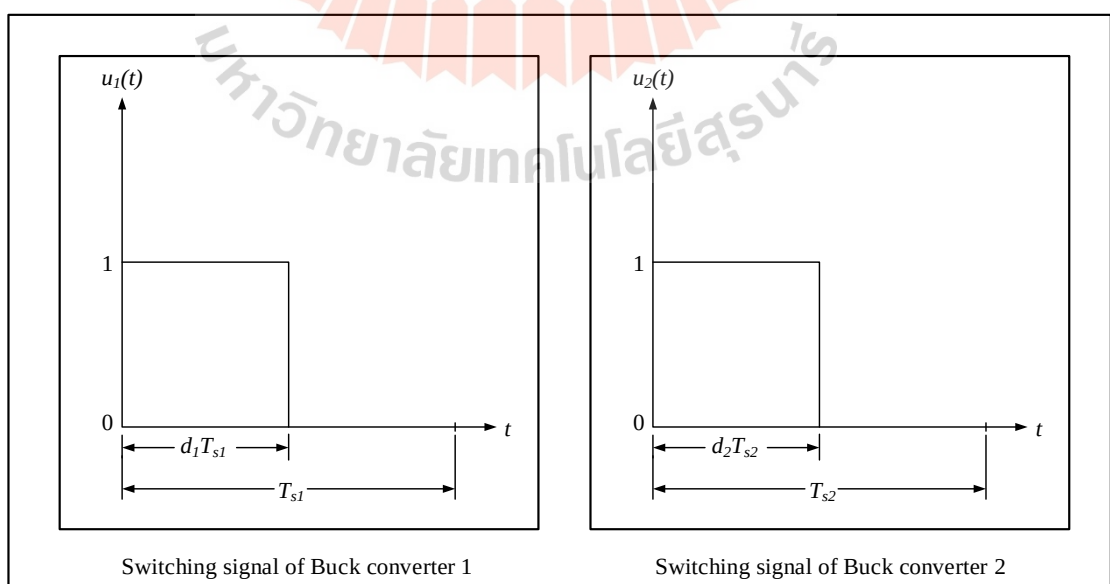
จากสมการที่ (3-22) และ (3-23) จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนหม้อแปลงบนแกนดีคิว (S_q) มีค่าเท่ากับศูนย์ และมุมของฟังก์ชันสำหรับการแปลงแหล่งจ่ายบนแกนดีและแกนคิวจะเหลือเพียง λ เป็นผลให้วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าบนแกนดีคิวที่ได้จากสมการดังกล่าวเป็นวงจรสมมูลอย่างง่าย ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว

จากรูปที่ 3.14 แสดงให้เห็นว่าทางฝั่งโหลดนั้นคือ วงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กัเวลา อันเนื่องมาจากผลของการสวิตช์ S_1 และ S_2 ดังนั้นจึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการกำจัดสัญญาณการสวิตช์ที่ขึ้นอยู่กัเวลาให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.4 ที่ผ่านมา

ในลำดับต่อไปจะพิจารณาสัญญาณการสวิตช์ในวงจรแปลงผันทั้ง 2 ชุด ซึ่งมีลักษณะการทำงานในโหมดการนำกระแสและหยุดนำกระแสในหนึ่งคาบการสวิตช์ (T_{s1} , T_{s2}) แสดงได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันทั้ง 2 ชุด

จากรูปที่ 3.15 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันทั้ง 2 ชุด แสดงดังสมการที่ (3-24) และ (3-25)

$$u_1(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < d_1 T_{s1} \\ 0, & d_1 T_{s1} < t < T_{s1} \end{cases} \quad (3-24)$$

$$u_2(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < d_2 T_{s2} \\ 0, & d_2 T_{s2} < t < T_{s2} \end{cases} \quad (3-25)$$

โดยที่ d_1 และ d_2 คือ วัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของอุปกรณ์สวิตช์ S_1 และ S_2 ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.14 พิจารณาวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งทั้ง 2 ชุด เมื่อ สวิตช์ S_1 และ S_2 ปิด จะทำให้ $I_{CPL1} = I_{L1}$, $I_{CPL2} = I_{L2}$, $V_{in1} = V_{dc}$ และ $V_{in2} = V_{dc}$ เมื่อ สวิตช์ S_1 และ S_2 เปิด จะทำให้ $I_{CPL1} = I_{CPL2} = 0$ และ $V_{in1} = V_{in2} = 0$ (สมมติให้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด D_{m1} และ D_{m2} มีค่าเท่ากับ 0 V เมื่อไดโอดนำกระแส) จากความสัมพันธ์ของ I_{CPL1} กับ I_{L1} และ I_{CPL2} กับ I_{L2} สามารถเขียนสมการที่อยู่ในรูป $u_1(t)$ และ $u_2(t)$ แสดงดังสมการที่ (3-26)

$$\begin{cases} I_{CPL1} = u_1(t) I_{L1} \\ I_{CPL2} = u_2(t) I_{L2} \end{cases} \quad (3-26)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ของ V_{in1} กับ V_{dc} และ V_{in2} กับ V_{dc} สามารถเขียนสมการที่อยู่ในรูป $u_1(t)$ และ $u_2(t)$ แสดงดังสมการที่ (3-27)

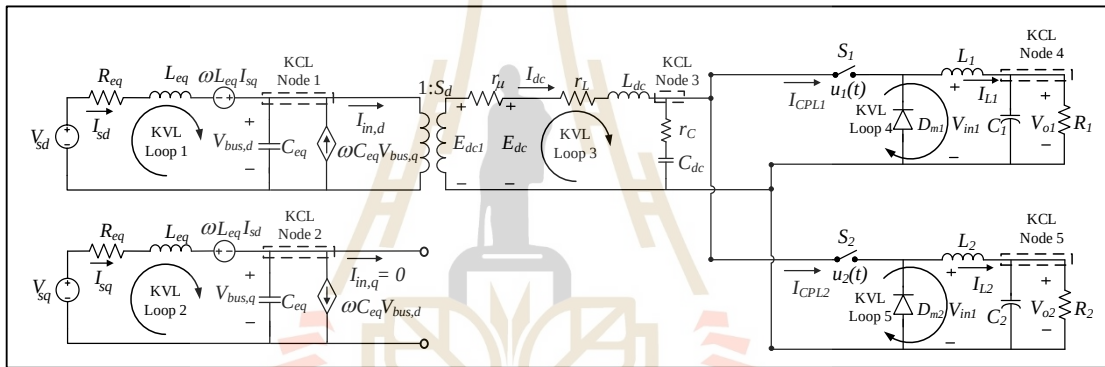
$$\begin{cases} V_{in1} = u_1(t) V_{dc} \\ V_{in2} = u_2(t) V_{dc} \end{cases} \quad (3-27)$$

จากสมการที่ (3-26) และ (3-27) จะพบว่า มีสัญญาณการสวิตช์ปรากฏอยู่ สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของ $u_1(t)$ และ $u_2(t)$ ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาเพียงการประมาณอันดับศูนย์เท่านั้น แสดงได้ดังสมการที่ (3-28) และ (3-29)

$$\langle u_1 \rangle_0(t) = \frac{1}{T_{s1}} \int_0^{d_1 T_{s1}} u_1(t) e^0 dt = d_1 \quad (3-28)$$

$$\langle u_2 \rangle_0(t) = \frac{1}{T_{s2}} \int_0^{d_2 T_{s2}} u_2(t) e^0 dt = d_2 \quad (3-29)$$

ดังนั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าจะอาศัยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law) ในการวิเคราะห์วงจรสมมูลอย่างง่ายในรูปที่ 3.16 แสดงได้ดังสมการที่ (3-30) ถึง (3-39)



รูปที่ 3.16 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- พิจารณา Loop 1 ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$-V_{sd} + R_{eq} I_{sd} + L_{eq} \dot{I}_{sd} - \omega L_{eq} I_{sq} + V_{bus,d} = 0$$

$$\dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \quad (3-30)$$

- พิจารณา Loop 2 ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned}
 -V_{sq} + R_{eq} I_{sq} + L_{eq} \dot{I}_{sq} + \omega L_{eq} I_{sd} + V_{bus,q} &= 0 \\
 \dot{I}_{sq} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \omega I_{sd} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda)
 \end{aligned} \tag{3-31}$$

- พิจารณา Node 1 ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned}
 I_{sd} - C_{eq} \dot{V}_{bus,d} + \omega C_{eq} V_{bus,q} - I_{in,d} &= 0 \\
 \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc}
 \end{aligned} \tag{3-32}$$

- พิจารณา Node 2 ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$\begin{aligned}
 I_{sq} - C_{eq} \dot{V}_{bus,q} - \omega C_{eq} V_{bus,d} - I_{in,q} &= 0 \\
 \dot{V}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d}
 \end{aligned} \tag{3-33}$$

- พิจารณา Loop 3 ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$-E_{dc1} + I_{dc}(r_\mu + r_L) + L_{dc} \dot{I}_{dc} + V_{r_c} + V_{dc} = 0$$

แยกพิจารณาระหว่างโหมดยการนำกระแสและโหมดยคชุนำกระแสของสวิตช์ใน
วงจรแปลงผันแบบบักกจะได้ว่า

$$V_{r_c} = r_c(I_{dc} - I_{L1}u_1(t) - I_{L2}u_2(t))$$

$$\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_c}{L_{dc}} I_{L1} u_1(t) + \frac{r_c}{L_{dc}} I_{L2} u_2(t)$$

หาค่าสัมประสิทธิ์ที่การประมาณค่าอันดับศูนย์ได้จากสมการที่ (3-28) และ (3-29) ดังนั้นจะได้ $\dot{I}_{dc}$ แสดงดังสมการที่ (3-34)

$$\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_c d_1}{L_{dc}} I_{L1} + \frac{r_c d_2}{L_{dc}} I_{L2} \quad (3-34)$$

- พิจารณา Node 3 ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$I_{dc} - C_{dc} \dot{V}_{dc} - I_{L1} u_1(t) - I_{L2} u_2(t) = 0$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{d_1}{C_{dc}} I_{L1} - \frac{d_2}{C_{dc}} I_{L2} \quad (3-35)$$

- พิจารณา Loop 4 ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$-V_{dc} u_1(t) + L_1 \dot{I}_{L1} + V_{o1} = 0$$

$$\dot{I}_{L1} = \frac{d_1}{L_1} V_{dc} - \frac{1}{L_1} V_{o1} \quad (3-36)$$

- พิจารณา Node 4 ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$I_{L1} - C_1 \dot{V}_{o1} - \frac{V_{o1}}{R_1} = 0$$

$$\dot{V}_{o1} = \frac{1}{C_1} I_{L1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1} \quad (3-37)$$

- พิจารณา Loop 5 ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$-V_{dc} u_2(t) + L_2 \dot{I}_{L2} + V_{o2} = 0$$

$$\dot{I}_{L2} = \frac{d_2}{L_2} V_{dc} - \frac{1}{L_2} V_{o2} \quad (3-38)$$

- พิจารณา Node 4 ใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$I_{L2} - C_2 \dot{V}_{o2} - \frac{V_{o2}}{R_2} = 0$$

$$\dot{V}_{o2} = \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{R_2 C_2} V_{o2} \quad (3-39)$$

จากการพิสูจน์สมการทั้งหมดที่ผ่านมาสามารถวิเคราะห์วงจรสมมูลบนแกนดีคิว
ในรูปที่ 3.16 เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (3-40)

$$\begin{cases}
\dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\
\dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
\dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} \\
\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_c d_1}{L_{dc}} I_{L1} + \frac{r_c d_2}{L_{dc}} I_{L2} \\
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{d_1}{C_{dc}} I_{L1} - \frac{d_2}{C_{dc}} I_{L2} \\
\dot{I}_{L1} = \frac{d_1}{L_1} V_{dc} - \frac{1}{L_1} V_{o1} \\
\dot{V}_{o1} = \frac{1}{C_1} I_{L1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1} \\
\dot{I}_{L2} = \frac{d_2}{L_2} V_{dc} - \frac{1}{L_2} V_{o2} \\
\dot{V}_{o2} = \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{R_2 C_2} V_{o2}
\end{cases} \quad (3-40)$$

จากสมการที่ (3-40) สามารถเขียนสมการเป็นแบบจำลองสถานะได้ดังนี้

$$\begin{cases}
\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u} \\
\mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u}
\end{cases} \quad (3-41)$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ คือ $\mathbf{x} = [I_{sd} \quad I_{sq} \quad V_{bus,d} \quad V_{bus,q} \quad I_{dc} \quad V_{dc} \quad I_{L1} \quad V_{o1} \quad I_{L2} \quad V_{o2}]^T$
ตัวแปรอินพุต คือ $\mathbf{u} = [V_m]$
ตัวแปรเอาต์พุต คือ $\mathbf{y} = [I_{dc} \quad V_{dc} \quad V_{o1} \quad V_{o2}]^T$

และรายละเอียดของ $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ ในสมการที่ (3-42) แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} & \frac{r_c d_1}{L_{dc}} & 0 & \frac{r_c d_2}{L_{dc}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & -\frac{d_1}{C_{dc}} & 0 & -\frac{d_2}{C_{dc}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d_1}{L_1} & 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d_2}{L_2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix}_{10 \times 10}$$

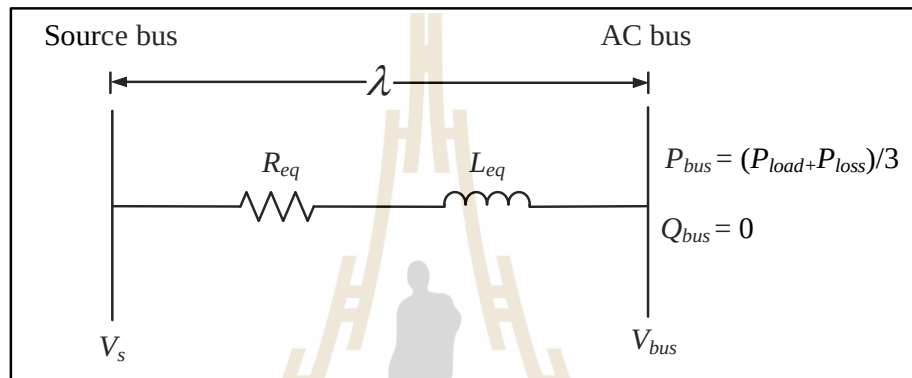
$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(\lambda) \\ \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\lambda) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{10 \times 1}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 10}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{4 \times 1} \quad (3-42)$$

3.2.6 การคำนวณค่าในสถานะคงตัว

การคำนวณค่าในสถานะคงตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-42) มีความจำเป็น เนื่องจากในเมตริกซ์มีพารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่าอยู่นั้นคือ λ หรือค่าความต่างเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสเอช ซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว โดยพิจารณาให้เป็นสายส่งหนึ่งเฟสเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ และไม่พิจารณาความจุไฟฟ้าของสายส่งเนื่องจากมีค่าน้อยมาก ดังนั้นระบบที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 3.17 สามารถเขียนขั้นตอนการพิสูจน์หาสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังนี้

จาก $S = VI^* = P_{bus} + jQ_{bus}$

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

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

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

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

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

ดังนั้น สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (3-43)

$$\begin{cases} \frac{V_{bus} V_s \cos(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \cos(\gamma)}{Z} = P_{bus} \\ \frac{V_{bus} V_s \sin(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \sin(\gamma)}{Z} = Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-43)$$

เมื่อ V_{bus} คือ แรงดันเฟสที่บัสเอช λ คือ มุมต่างเฟสระหว่าง V_s และ V_{bus} และ Z คือ ขนาดอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยที่ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่พิจารณาที่บัสเอช จะได้ดังสมการที่ (3-44)

$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{1}{3} \left(\frac{V_{o1}^2}{R_1} + \frac{V_{o2}^2}{R_2} + P_{loss} \right) \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-44)$$

จากสมการที่ (3-44) สามารถคำนวณหาผลเฉลยได้โดยใช้วิธีการเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน-ราฟสัน ดูได้จากภาคผนวก ก.1 ซึ่งทำให้ได้ค่า λ เพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

3.2.7 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้น

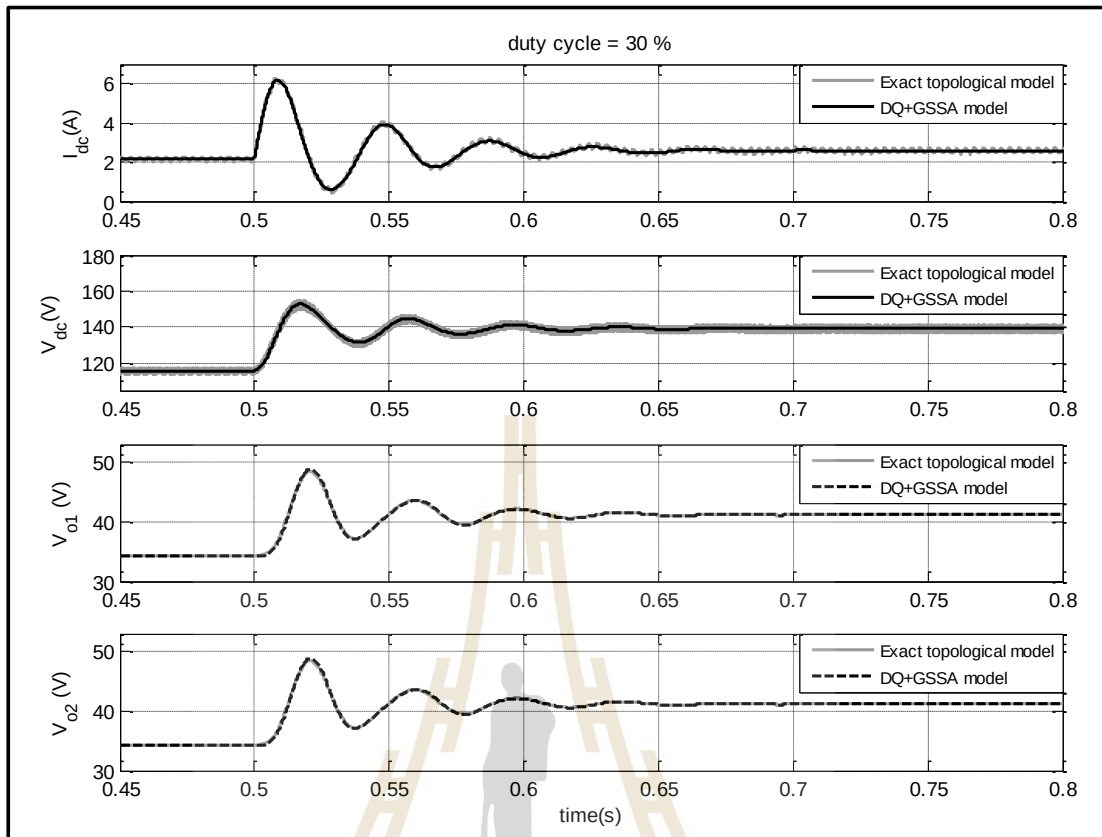
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-41) กับการ

จำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ในภาคผนวก ข.1 เพื่อพิจารณาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบในเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ของระบบ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 3.1

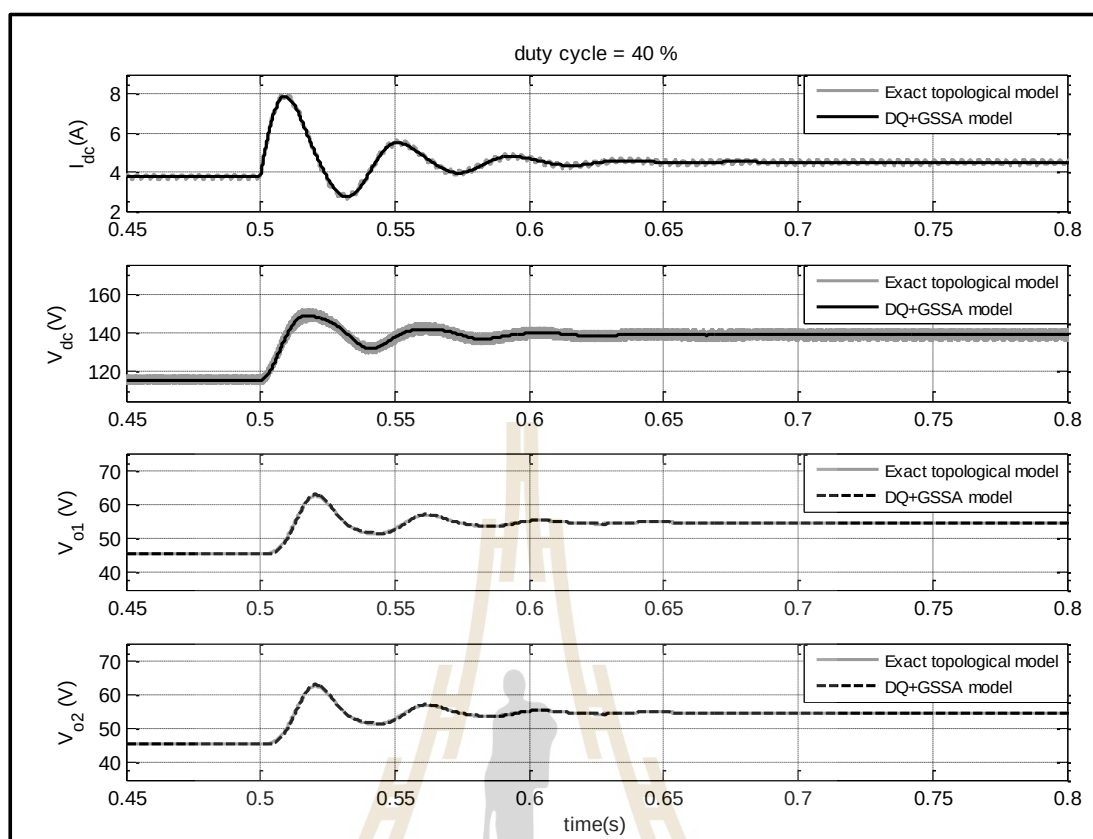
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	50 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	24 μ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
r_L	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_{dc}	30 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_c	0.4 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_{dc}	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$L_I = L_2$ ($\Delta I_L \leq 0.2$ A)	15 mH	ความเหนี่ยวนำของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักค์
$C_I = C_2$ ($\Delta V_C \leq 2.8$ mV)	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักค์
$R_I = R_2$	10 Ω	ความต้านทานของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักค์

จากรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 แสดงผลการตอบสนองของ I_{dc} V_{dc} V_{o1} และ V_{o2} สำหรับการเปรียบเทียบรูปสัญญาณระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปกับรูปสัญญาณที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 โดยผลการตรวจสอบความถูกต้องได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันอินพุตจาก 50 V_{rms} ไปเป็น 60 V_{rms} ที่เวลา 0.5 วินาที ซึ่งในรูปที่ 3.18 ได้ปรับ $d_1 = d_2 = 30$ % และรูปที่ 3.19 ได้ปรับ $d_1 = d_2 = 40$ % โดยที่ d_1 และ d_2 คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักค์ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 ผลการตอบสนอง เมื่อ ค่าวัฏจักรหน้าที่ d_1 และ $d_2 = 30\%$



รูปที่ 3.19 ผลการตอบสนอง เมื่อ ค่าวัฏจักรหน้าที่ d_1 และ $d_2 = 40\%$

จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถให้ผลการตอบสนองที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB ทั้งในส่วนของการตอบสนองในสถานะชั่วคราวและในสถานะคงตัว ดังนั้น แบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีการผสมผสานระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปที่อธิบายไว้ในบทนี้ สามารถนำไปใช้ได้จริง และยังสามารถนำไปพัฒนาเป็นแบบจำลองของระบบที่มีตัวควบคุมเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ และการออกแบบลูปป้อนไปหน้าที่ใช้สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

3.3 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง เอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งนานกั้นที่ไม่มีการควบคุม โดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานการแปลงดีควด้วยวิธีการของปาร์ค ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองกับระบบไฟฟ้าสามเฟส รวมถึงพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแบบจำลองมีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB ทั้งสถานะชั่วครู่ และในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นในบทนี้เป็นแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำไปต่อยอดและพัฒนาเป็นแบบจำลองของระบบที่มีตัวควบคุม ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพบรรเทาการขาดเสถียรภาพ และออกแบบลูปป้อนไปหน้าสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่จะกล่าวในบทต่อไป



บทที่ 4

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มี โหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกัขนานกันกรณีที่มีการควบคุม

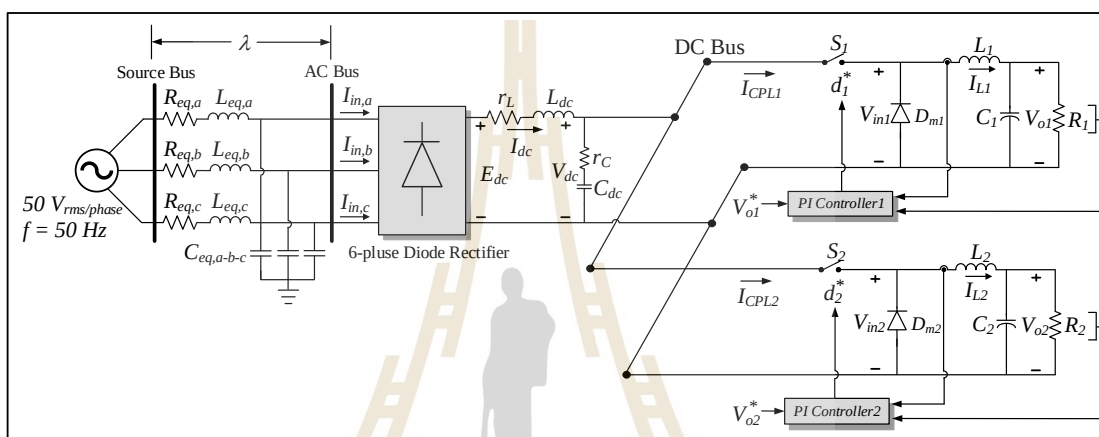
4.1 บทนำ

วงจรแปลงผันกำลังที่ใช้งานในปัจจุบันมีหลายชนิด ทั้งแปลงจากเอซีเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี และเอซีเป็นเอซี สำหรับการใช้งานโดยส่วนใหญ่จะต้องควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังเพื่อใช้งานในพิกัดที่ต้องการ งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกัขนานกันที่มีการควบคุม สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือพฤติกรรมการทำงานและพลวัตของระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมนั้นจะมีพฤติกรรมเหมือน โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเมื่อเชื่อมต่อผ่านวงจรกรองจะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง (Emadi A., Khaligh A., Rivetta C.H and Williamson G.A., 2006) ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง หรือส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ ดังนั้น เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกัขนานกันที่มีการควบคุมโดยใช้วิธีคิดผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งต้องอาศัยองค์ความรู้ในการสร้างแบบจำลองที่ได้จากบทที่ 3 ที่ผ่านมา และยังนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคกั ลำดับสุดท้ายในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งดำเนินการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เนื้อหาในบทที่ 4 นี้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการนำไปใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการออกแบบลูบป้อนไปหน้าด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจะนำเสนอในบทที่ 5 และ ในบทที่ 6 ต่อไป

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกัขนานกันกรณีที่มีการควบคุม

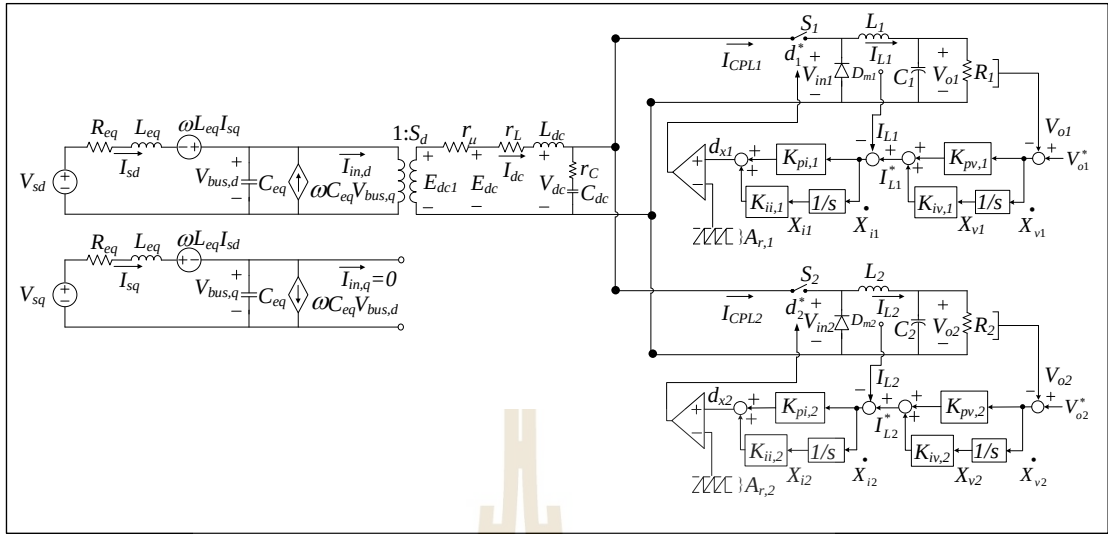
การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงแบบบัคกัขนานกันในกรณีที่มีการควบคุมจะต่อยอดและพัฒนาจากแบบจำลองที่ได้รับ

การพิสูจน์ในบทที่ 3 ซึ่งจะเพิ่มเติมในส่วนของตัวควบคุมในวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้ง 2 ชุด เพื่อใช้สำหรับควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทานให้คงที่ ตัวควบคุมที่ใช้งานในปัจจุบันมีหลากหลายประเภทโดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะนำเสนอตัวควบคุมพีไอ 2 คู่ต่อกันแบบคาสเคด ซึ่งเหมาะสมและเพียงพอสำหรับการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้ง 2 ชุดที่ใช้จริง เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความเรียบง่ายและให้ประสิทธิภาพการควบคุมที่ดี



รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ขนานกัน
กรณีที่มีการควบคุม

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสผ่านวงจรสายส่งกำลังด้านเอซีต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรแปลงผันแบบบัก์ทั้ง 2 ชุดที่มีการควบคุม เมื่อพิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์สามารถหาข้อเท็จจริงในการแปลงดีคิวด้วยวิธีการของปาร์กในบทที่ 3 หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ให้อยู่บนแกนดีคิว โดยสามารถกำหนดมุมเฟสการหมุนของสัญญาณการสวิตช์ ($\phi = \phi_1$) ดังนั้น จะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายที่แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลบนแกนดีคิว เมื่อ กำหนดให้ $\phi = \phi_1$

พิจารณาในส่วนของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมทั้ง 2 ชุดในรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า เป็นตัวควบคุมพีไอที่มีโครงสร้างภายในของตัวควบคุมแบ่งเป็น 2 ลูป คือ ลูปควบคุมแรงดัน เอาต์พุตเป็นลูปนอกและลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นลูปใน สำหรับการ สร้างสัญญาณการควบคุม (Control signal) กำหนดให้เป็น d_{x1} และ d_{x2} นำมาเปรียบเทียบกับ สัญญาณสามเหลี่ยม (Sawtooth compare signal) เพื่อสร้างสัญญาณฟีดแบ็คเบิกลูเอม โดยมีพารามิเตอร์ ของตัวควบคุมพีไอทั้ง 2 ชุด คือ $K_{pv,1}$, $K_{iv,1}$, $K_{pi,1}$, $K_{ii,1}$, $K_{pv,2}$, $K_{iv,2}$, $K_{pi,2}$, และ $K_{ii,2}$ ตามลำดับ สำหรับใน ส่วนของตัวควบคุมในรูปที่ 4.2 สามารถวิเคราะห์หาค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์ d_1^* และ d_2^* ที่เกิด จากกระบวนการของตัวควบคุมพีไอ ได้ดังสมการที่ (4-1)

$$\begin{cases} d_1^* = -\frac{K_{pi,1}I_{L1}}{A_{r,1}} - \frac{K_{pv,1}K_{pi,1}V_{o1}}{A_{r,1}} + \frac{K_{iv,1}K_{pi,1}X_{v1}}{A_{r,1}} + \frac{K_{ii,1}X_{i1}}{A_{r,1}} + \frac{K_{pv,1}K_{pi,1}V_{o1}^*}{A_{r,1}} \\ d_2^* = -\frac{K_{pi,2}I_{L2}}{A_{r,2}} - \frac{K_{pv,2}K_{pi,2}V_{o2}}{A_{r,2}} + \frac{K_{iv,2}K_{pi,2}X_{v2}}{A_{r,2}} + \frac{K_{ii,2}X_{i2}}{A_{r,2}} + \frac{K_{pv,2}K_{pi,2}V_{o2}^*}{A_{r,2}} \end{cases} \quad (4-1)$$

เมื่อ $A_{r,1}$ และ $A_{r,2}$ คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยมของตัวควบคุมพีไอชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 ตามลำดับ

พิจารณาเฉพาะในส่วนของตัวเองควบคุมทั้ง 2 ชุด จะเห็นได้ว่า X_{v1} , X_{v2} ของรูปแรงดัน และ X_{i1} , X_{i2} ของรูปกระแส จะกำหนดให้เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และสามารถดำเนินการหาแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบักซ์นารันกันที่มีการควบคุมได้โดยการแทนค่า d_1 และ d_2 ในสมการที่ (3-40) ในบทที่ 3 ด้วย d_1^* และ d_2^* ตามลำดับ จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 4.1 ที่ได้รับการพิสูจน์จากวิธีดีคิวผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ (4-2)

$$\begin{cases}
 \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\
 \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} \\
 \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1}^2 \\
 \quad - \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} V_{o1} + \frac{r_c K_{iv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} X_{v1} + \frac{r_c K_{ii,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} X_{i1} \\
 \quad + \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* - \frac{r_c K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2}^2 - \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} V_{o2} \\
 \quad + \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} X_{v2} + \frac{r_c K_{ii,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} X_{i2} + \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \\
 \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1}^2 + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} V_{o1} - \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} X_{v1} - \frac{K_{ii,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} X_{i1} \\
 \quad - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* + \frac{K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2}^2 + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} V_{o2} \\
 \quad - \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} X_{v2} - \frac{K_{ii,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} X_{i2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \\
 \dot{I}_{L1} = -\frac{K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} I_{L1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} V_{o1} - \frac{1}{L_1} V_{o1} + \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} X_{v1} \\
 \quad + \frac{K_{ii,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} X_{i1} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} V_{o1}^*
 \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \dot{V}_{o1} = \frac{1}{C_1} I_{L1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1} \\
 \dot{X}_{v1} = -V_{o1} + V_{o1}^* \\
 \dot{X}_{i1} = -I_{L1} - K_{pv,1} V_{o1} + K_{iv,1} X_{v,1} + K_{pv,1} V_{o1}^* \\
 \dot{I}_{L2} = -\frac{K_{pi,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} I_{L2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} V_{o2} - \frac{1}{L_2} V_{o2} + \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} X_{v2} \\
 \quad + \frac{K_{ii,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} X_{i2} + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} V_{o2}^* \\
 \dot{V}_{o2} = \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{R_2 C_2} V_{o2} \\
 \dot{X}_{v2} = -V_{o2} + V_{o2}^* \\
 \dot{X}_{i2} = -I_{L2} - K_{pv,2} V_{o2} + K_{iv,2} X_{v,2} + K_{pv,2} V_{o2}^*
 \end{array} \right. \quad (4-2)$$

จากสมการที่ (4-2) จะสังเกตเห็นว่า เมื่อพิจารณาตัวควบคุมของวงจรแปลงผันทั้ง 2 ชุด แบบจำลองที่ได้จะเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น และมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุม รวมถึงตัวแปรสถานะ X_{v1} , X_{v2} , X_{i1} และ X_{i2} ที่เพิ่มเข้ามาในแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ในบทที่ 3 ดังนั้นการทำให้เป็นเชิงเส้นจึงมีความสำคัญอย่างมาก สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบผ่านทฤษฎีบทค่าเจาะจงเพื่อคาดเดาจุดการทำงานที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพและหลีกเลี่ยงการทำงาน of ระบบ ณ จุดดังกล่าว ดังนั้น แบบจำลองในสมการที่ (4-2) สามารถใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) อันดับที่หนึ่ง ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของการทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นในหัวข้อที่ 4.2.1

4.2.1 การทำให้เป็นเชิงเส้น

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองในสมการที่ (4-2) เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้ได้แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีเจาะจง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นในการทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่ง ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองที่ทำให้เป็นเชิงเส้นได้จากสมการที่ (4-2) แสดงดังสมการที่ (4-3)

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix}
-\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{eq}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} & a(5,7) & -\frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} L_{dc}} & \frac{r_c K_{iv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} L_{dc}} & \frac{r_c K_{ii,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} L_{dc}} & a(5,11) & -\frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} L_{dc}} & \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} L_{dc}} & \frac{r_c K_{ii,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} L_{dc}} \\
0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & a(6,7) & \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} C_{dc}} & \frac{K_{iv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} C_{dc}} & \frac{K_{ii,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} C_{dc}} & a(6,11) & \frac{K_{pv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} C_{dc}} & \frac{K_{iv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} C_{dc}} & \frac{K_{ii,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} C_{dc}} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & -\frac{K_{pi,1} V_{dc,o}}{A_{r,1} L_1} & -\frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{dc,o} + A_{r,1}}{A_{r,1} L_1} & \frac{K_{iv,1} K_{pi,1} V_{dc,o}}{A_{r,1} L_1} & \frac{K_{ii,1} V_{dc,o}}{A_{r,1} 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}}{A_{r,2} L_2} & -\frac{K_{pv,2} K_{pi,2} V_{dc,o} + A_{r,2}}{A_{r,2} L_2} & \frac{K_{iv,2} K_{pi,2} V_{dc,o}}{A_{r,2} L_2} & \frac{K_{ii,2} V_{dc,o}}{A_{r,2} 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} \quad 14 \times 14$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 14}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 3}$$

(4-4)

4.2.2 การคำนวณค่าในสถานะคงตัว

การคำนวณค่าในสถานะคงตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการที่ (4-3) มีความสอดคล้องสำหรับการคำนวณค่า $V_{dc,o}$, λ_o , $V_{o1,o}$, $V_{o2,o}$, $I_{L1,o}$, $I_{L2,o}$, $X_{v1,o}$, $X_{v2,o}$, $X_{i1,o}$ และ $X_{i2,o}$ โดยจะเริ่มพิจารณาค่าในสถานะอยู่ตัวทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ คือ V_{dc} และ λ_o ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการพิสูจน์ไว้ในบทที่ 3 แสดงดังสมการที่ (4-5)

$$\begin{cases} \frac{V_{bus} V_s \cos(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \cos(\gamma)}{Z} = P_{bus} \\ \frac{V_{bus} V_s \sin(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \sin(\gamma)}{Z} = Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (4-5)$$

เมื่อ V_{bus} คือ แรงดันเฟสที่บัสเอช λ คือ มุมต่างเฟสระหว่าง V_s และ V_{bus} และ Z คือ ขนาดอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยที่ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟพิจารณาที่บัสเอช แสดงได้ดังสมการที่ (4-6)

$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{1}{3} \left(\frac{V_{o1}^{*2}}{R_1} + \frac{V_{o2}^{*2}}{R_2} + P_{loss} \right) \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (4-6)$$

เมื่อ V_{o1}^* และ V_{o2}^* คือ แรงดันอ้างอิงที่ต้องการของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุด และ P_{loss} คือ กำลังสูญเสียเนื่องจาก r_μ และ r_L โดย Q_{bus} ถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ เนื่องจากสมมติฐานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์พิจารณากระแสอินพุต ($I_{in,abc}$) มีเฟสเดียวกันกับแรงดันอินพุต ($V_{bus,abc}$)

จากสมการที่ (4-5) ทำให้สามารถคำนวณค่า $V_{dc,o}$ และ λ_o ที่สถานะคงตัวได้ ซึ่งค่าดังกล่าวจะใช้สำหรับคำนวณค่าในสถานะคงตัวที่สอดคล้องกับแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4-3) โดยอาศัยหลักการที่กล่าวไว้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่จุดปฏิบัติงานมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งหมายถึงอนุพันธ์ของตัวแปรสถานะทุกตัวที่จุดปฏิบัติงานมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (4-7)

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dc,o} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{bus,o}) - (r_\mu + r_L)I_{dc,o} \\ V_{o1,o} = V_{o1}^*, \quad V_{o2,o} = V_{o2}^* \\ I_{L1,o} = \frac{V_{o1,o}}{R_1}, \quad I_{L2,o} = \frac{V_{o2,o}}{R_2} \\ X_{v1,o} = \frac{I_{L1,o}}{K_{iv,1}}, \quad X_{v2,o} = \frac{I_{L2,o}}{K_{iv,2}} \\ X_{i1,o} = \frac{V_{o1,o}A_{r,1}}{K_{ii,1}V_{dc,o}}, \quad X_{i2,o} = \frac{V_{o2,o}A_{r,2}}{K_{ii,2}V_{dc,o}} \end{array} \right. \quad (4-7)$$

เมื่อ

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

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

จากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (4-3) และการคำนวณค่าในสถานะคงตัวในสมการที่ (4-7) จะสังเกตเห็นว่าสมการดังกล่าวมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอทั้ง 2 ชุด ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้สมรรถนะการควบคุมที่ดี ซึ่งได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 4.2.3

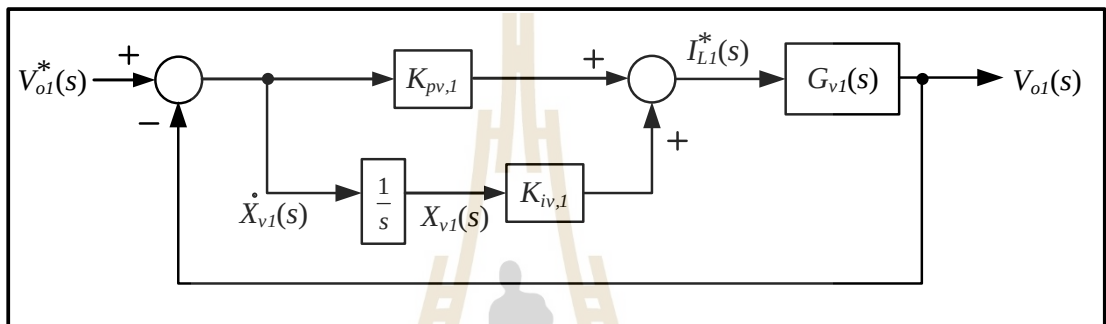
4.2.3 การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักก์ขนานกัน

การออกแบบตัวควบคุมพีไอจะอาศัยวิธีการแบบดั้งเดิม (Pakdeeto J., Chanpittayagit R., Areerak K-N and Areerak K-L., 2017) เนื่องจากเป็นวิธีที่ให้ผลการตอบสนองที่ดีและมีขั้นตอนการออกแบบที่เรียบง่ายด้วยวิธีการเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์สมการมาตรฐานของระบบอันดับสองโดยการออกแบบในหัวข้อนี้จะแสดงขั้นตอนการพิสูจน์หาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 เท่านั้น เนื่องจากขั้นตอนการพิสูจน์หาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมสำหรับ

วงจรแปลงผันแบบบัคค์ชูดที่ 2 จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชูดที่ 1 จะเห็นว่าตัวควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ตัวควบคุมลูปรแรงดันไฟฟ้าและตัวควบคุมลูปรกระแสไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 ส่วนจะได้รับการนำเสนอต่อไปนี้

การออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต

แผนภาพของตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุตสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชูดที่ 1 ในรูปที่ 4.2 สามารถแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพสำหรับออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชูดที่ 1

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ คือ $I_{L1}^*(s)$ และมีสัญญาณป้อนกลับ คือ $V_{o1}(s)$ ดังนั้นจึงต้องหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง I_{L1} กับ V_{o1} โดยกำหนดให้มีฟังก์ชันการถ่ายโอนเป็น $G_{v1}(s)$ ซึ่งหาได้จากสมการตัวแปรสถานะของแรงดันเอาต์พุตชูดที่ 1 แสดงดังสมการที่ (4-8)

$$\dot{V}_{o1} = \frac{1}{C_1} I_{L1}(t) - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1}(t) \quad (4-8)$$

ทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (4-8) จะได้สมการความสัมพันธ์ในโดเมนเอสแสดงดังสมการที่ (4-9)

$$sV_{o1}(s) = \frac{1}{C_1} I_{L1}(s) - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1}(s) \quad (4-9)$$

จากสมการที่ (4-9) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_{v1}(s)$ แสดงดังสมการที่ (4-10)

$$G_{v1}(s) = \frac{V_{o1}(s)}{I_{L1}(s)} = \frac{R_1}{sR_1C_1 + 1} \quad (4-10)$$

เพราะฉะนั้นจากรูปที่ 4.3 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ดังสมการที่ (4-11)

$$T_{v1}(s) = \frac{V_{o1}(s)}{V_{o1}^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{pv,1}s + K_{pi,1}}{s} \right) \cdot G_{v1}(s)}{1 + \left(\frac{K_{pv,1}s + K_{pi,1}}{s} \right) \cdot G_{v1}(s)} \quad (4-11)$$

$$T_{v1}(s) = \frac{\left(\frac{K_{pv,1}s + K_{pi,1}}{C_1} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_{pv,1}R_1 + 1}{R_1C_1} \right)s + \left(\frac{K_{iv,1}}{C_1} \right)} \quad (4-12)$$

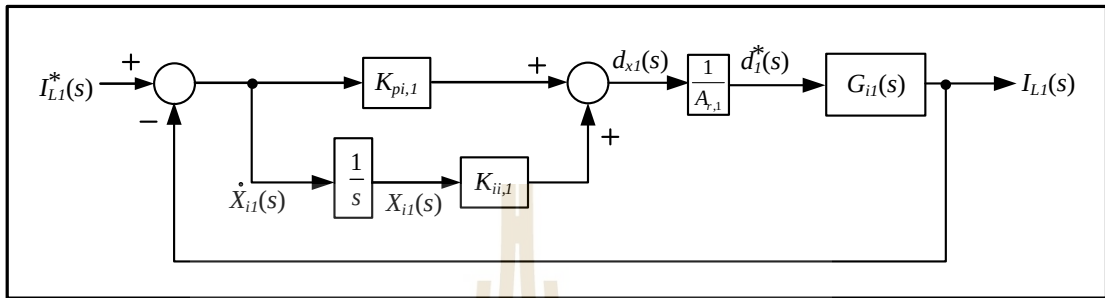
ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวหารของ $T_{v1}(s)$ กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสองในสมการที่ (4-13) จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตดังแสดงในสมการที่ (4-14) และ (4-15)

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4-13)$$

$$K_{pv,1} = \frac{2\zeta_{v,1}\omega_{nv,1}R_1C_1 - 1}{R_1} \quad (4-14)$$

$$K_{iv,1} = \omega_{nv,1}^2 C_1 \quad (4-15)$$

การออกแบบตัวควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
 แผนภาพของตัวควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสำหรับวงจรแปลงผัน
 แบบบักซ์ชุดที่ 1 ในรูปที่ 4.2 สามารถแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพสำหรับออกแบบตัวควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของ
 วงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่ 1

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ คือ $d_{x1}(s)$ ซึ่งจะถูกปรับคูณด้วย $1/A_{r,i}$ ได้เป็นค่าวัฏจักรการทำงาน $d_i^*(s)$ และมีสัญญาณการป้อนกลับ คือ $I_{L1}(s)$ ดังนั้นจึงต้องหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของ $I_{L1}(s)/d_i(s)$ โดยกำหนดให้เป็น $G_{il}(s)$ ซึ่งหาได้จากสมการตัวแปรสถานะของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ แสดงดังสมการที่ (4-16)

$$\dot{I}_{L1}(t) = \frac{d_1(t)}{L_1} V_{dc} - \frac{1}{L_1} V_{o1}(t) \quad (4-16)$$

ทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (4-16) จะได้สมการความสัมพันธ์ในโดเมนเอสแสดงดังสมการที่ (4-17)

$$sI_{L1}(s) = \frac{d_1(s)}{L_1} V_{dc} - \frac{1}{L_1} V_{o1}(s) \quad (4-17)$$

จากสมการที่ (4-17) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_{il}(s)$ โดยพิจารณาให้ $V_{o1}(s)$ เท่ากับศูนย์ แสดงดังสมการที่ (4-18)

$$G_{i1}(s) = \frac{I_{L1}(s)}{d_1(s)} = \frac{V_{dc}}{sL_1} \quad (4-18)$$

เพราะฉะนั้นจากรูปที่ 4.4 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ได้ดังสมการที่ (4-19)

$$T_{i1}(s) = \frac{I_{L1}(s)}{I_{L1}^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{pi,1}s + K_{ii,1}}{s} \right) \cdot \left(\frac{G_{i1}(s)}{A_{r,1}} \right)}{1 + \left(\frac{K_{pi,1}s + K_{ii,1}}{s} \right) \cdot \left(\frac{G_{i1}(s)}{A_{r,1}} \right)} \quad (4-19)$$

$$T_{i1}(s) = \frac{\left(\frac{K_{pi,1}s + K_{ii,1}}{A_{r,1}L_1} \right) V_{dc}}{s^2 + \left(\frac{K_{pi,1}V_{dc}}{A_{r,1}L_1} \right) s + \left(\frac{K_{ii,1}V_{dc}}{A_{r,1}L_1} \right)} \quad (4-20)$$

ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวหารของ $T_{i1}(s)$ กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสองในสมการที่ (4-13) จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับรูปควบคุมกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำดังแสดงในสมการที่ (4-21) และ (4-22)

$$K_{pi,1} = \frac{2\zeta_{i,1}\omega_{ni,1}A_{r,1}L_1}{V_{dc}} \quad (4-21)$$

$$K_{ii,1} = \frac{\omega_{ni,1}^2 A_{r,1}L_1}{V_{dc}} \quad (4-22)$$

ตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปกระแสไฟฟ้าและลูปแรงดันไฟฟ้า สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (4-14), (4-15), (4-21) และ (4-22) ตามลำดับ ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของระบบ คือ อัตราส่วนการหน่วงของลูปแรงดันไฟฟ้า ($\zeta_{v,i}$) และ ลูปกระแสไฟฟ้า ($\zeta_{i,i}$), ความถี่ธรรมชาติของลูปแรงดันไฟฟ้า ($\omega_{nv,i}$) และลูปกระแสไฟฟ้า ($\omega_{ni,i}$) สำหรับรายละเอียดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุด แสดงดังตารางที่ 4.1 ในหัวข้อที่ 4.2.4

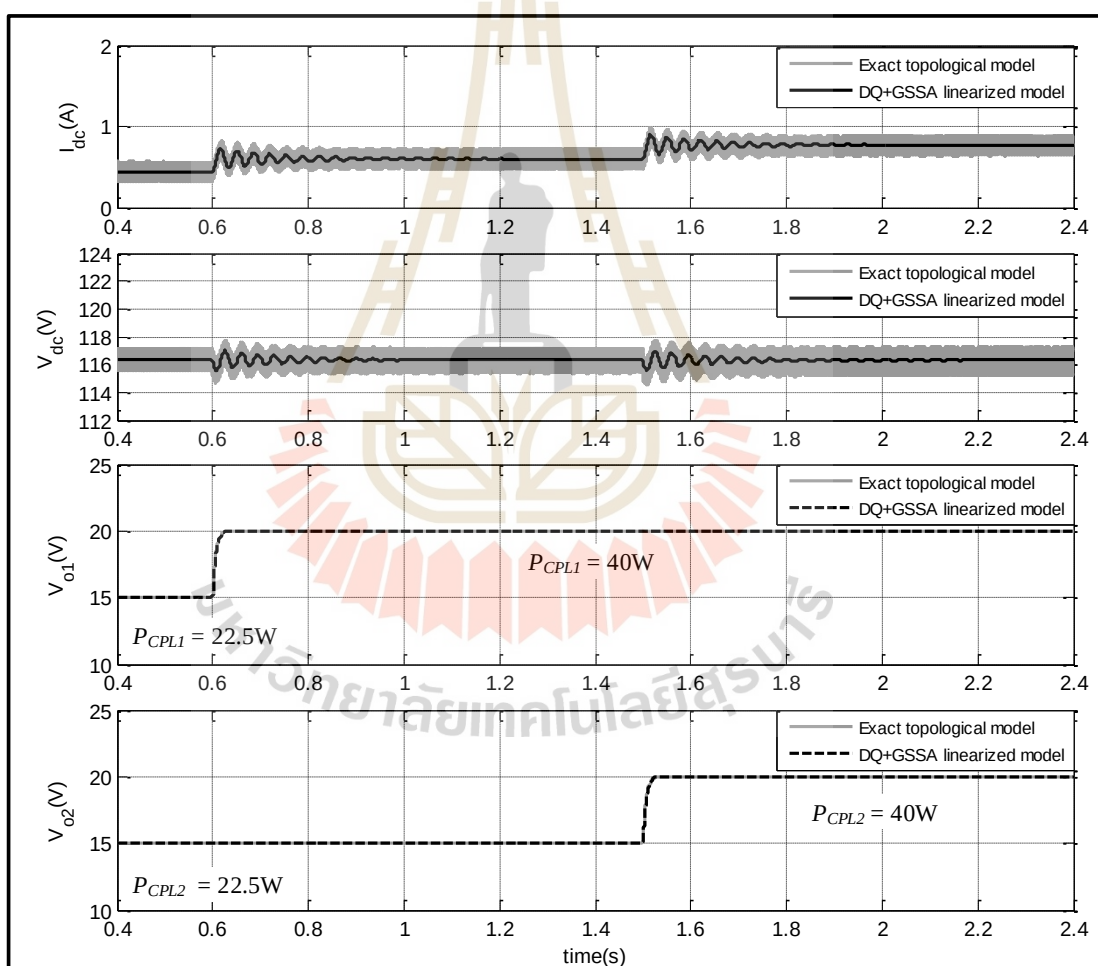
4.2.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้น

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-3) กับการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ในภาคผนวก ข.2 เพื่อพิจารณาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบในเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ของระบบ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังตารางที่ 3.1 ในบทที่ 3 และมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่มีการพิจารณาเพิ่มเติมจากระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 ในบทที่ 3 แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

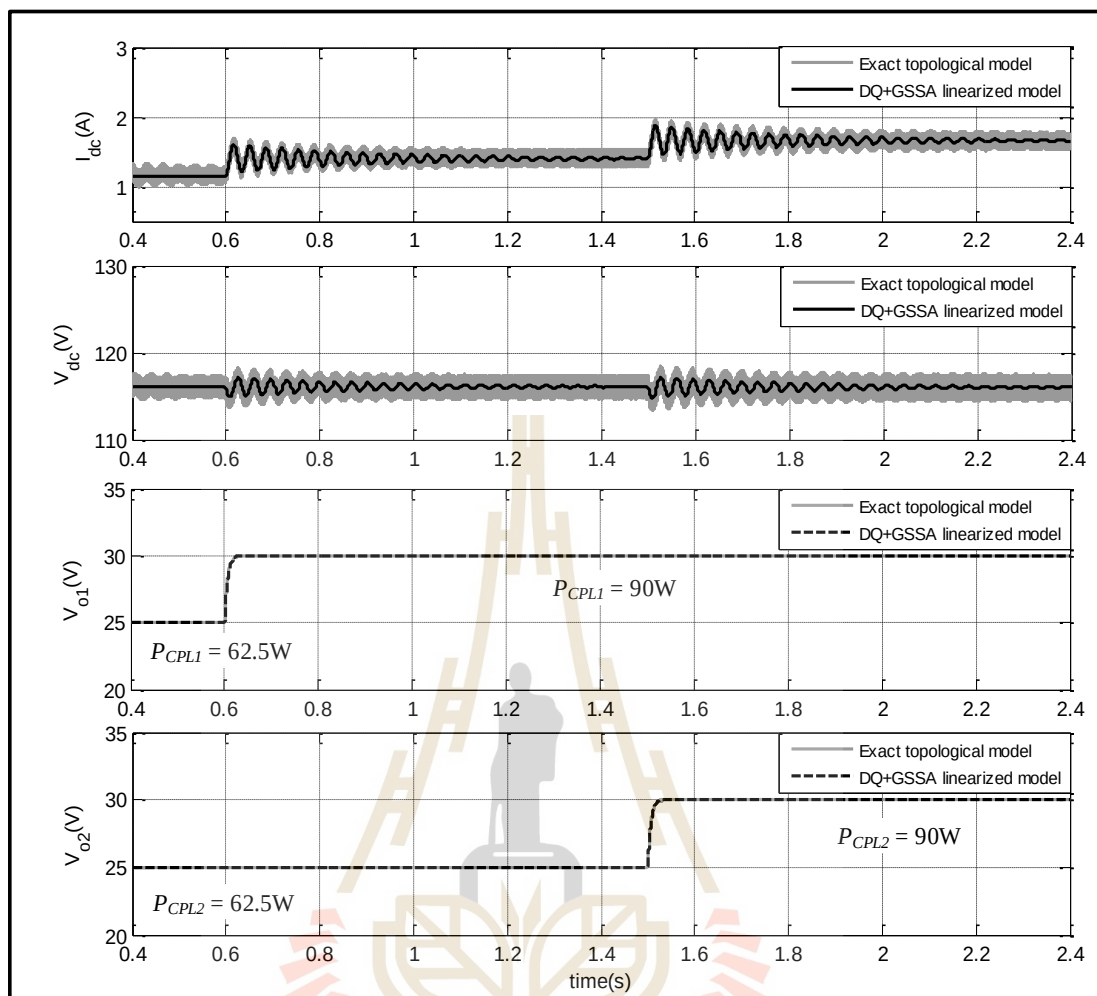
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$A_{r,1}=A_{r,2}$	10	ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยมสำหรับตัวควบคุมพีไอทั้ง 2 ชุด
$K_{pv,1}=K_{pv,2}$	0.1513	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีของลูปแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ ($\zeta_{v,1}=\zeta_{v,2}=1.0$, $\omega_{nv,1}=\omega_{nv,2}=2\pi \times 20$ rad/s)
$K_{iv,1}=K_{iv,2}$	15.7914	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมไอของลูปแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ ($\zeta_{v,1}=\zeta_{v,2}=1.0$, $\omega_{nv,1}=\omega_{nv,2}=2\pi \times 20$ rad/s)
$K_{pi,1}=K_{pi,2}$	2.2564	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีของลูปกระแสไฟฟ้าสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ ($\zeta_{i,1}=\zeta_{i,2}=0.7$, $\omega_{ni,1}=\omega_{ni,2}=2\pi \times 200$ rad/s)
$K_{ii,1}=K_{ii,2}$	2025.3	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมไอของลูปกระแสไฟฟ้าสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก์ ($\zeta_{i,1}=\zeta_{i,2}=0.7$, $\omega_{ni,1}=\omega_{ni,2}=2\pi \times 200$ rad/s)

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการตอบสนองของกระแสเอาต์พุตดีซี (I_{dc}) แรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) แรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งชุดที่ 1 (V_{o1}) และ แรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งชุดที่ 2 (V_{o2}) โดยมีการเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงที่ต้องการของวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งชุดที่ 1 (V_{o1}^*) และชุดที่ 2 (V_{o2}^*) จาก 15 V ไปเป็น 20 V ที่เวลา 0.6 วินาที และ จาก 15 V ไปเป็น 20 V ที่เวลา 1.5 วินาที ตามลำดับ ในส่วนของรูปที่ 4.6 จะแสดงผลการตอบสนองในลักษณะเดียวกับรูปที่ 4.5 โดยมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงที่ต้องการของวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งชุดที่ 1 (V_{o1}^*) และ ชุดที่ 2 (V_{o2}^*) จาก 25 V ไปเป็น 30 V ที่เวลา 0.6 วินาที และ จาก 25 V ไปเป็น 30 V ที่เวลา 1.5 วินาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ผลตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_{o1}^* และ V_{o2}^* จาก 15 V ไปเป็น 20 V ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_{o1}^* และ V_{o2}^* จาก 25 V ไปเป็น 30 V ตามลำดับ

จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นตามรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 พบว่าแบบจำลองสามารถให้ผลการตอบสนองที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB ทั้งในส่วนของการตอบสนองในสถานะชั่วครู่และในสถานะคงตัว ดังนั้น แบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีการผสมผสานระหว่างวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปที่อธิบายไว้ในบทนี้ สามารถนำไปใช้ได้จริง และยังสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.3 ต่อไป

4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งขนานกัน

จากรูปที่ 4.1 โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งทั้ง 2 ชุดจะลดทอนเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเอซีเป็นดิซีสโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจทำให้สมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมลดลงหรือทำให้ระบบเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการคาดเดาจุดการทำงานของโหลดดังกล่าวที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบจึงมีความจำเป็นอย่างมาก ซึ่งต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่ง ในสมการที่ (4-3) ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix) $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ดังสมการที่ (4-23)

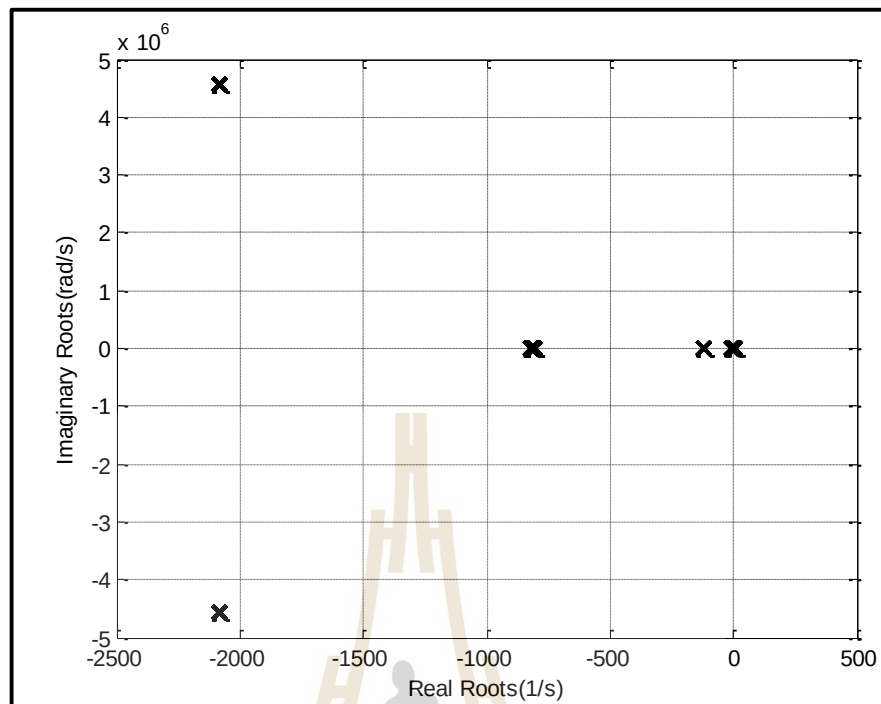
$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (4-23)$$

ดังนั้นระบบจะมีเสถียรภาพ ถ้าส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่าน้อยกว่าศูนย์ เงื่อนไขดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4-24)

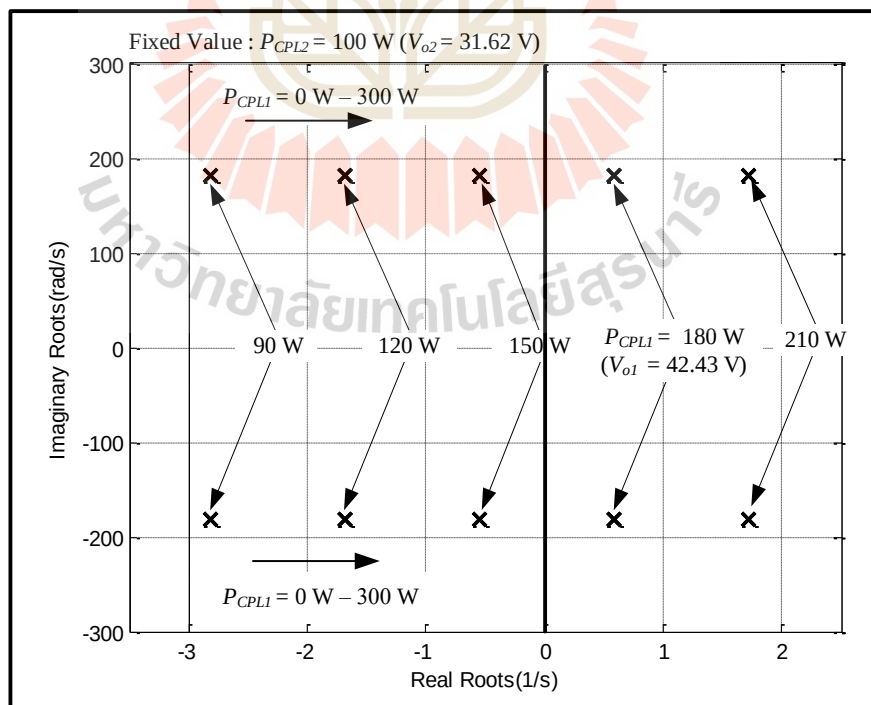
$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (4-24)$$

โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (n คือ จำนวนตัวแปรสถานะของระบบ)

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีสที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งขนานกันในรูปที่ 4.1 จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงค่าเจาะจงที่อาศัยการคำนวณผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น โดยกำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งชุดที่ 2 ($P_{CPL,2}$) มีค่าคงที่เท่ากับ 100 W (31.62 V) และทำการเปลี่ยนแปลงโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคกึ่งชุดที่ 1 ($P_{CPL,1}$) จาก 0 W (0 V) – 300 W (54.77 V) ซึ่งจะประกอบไปด้วย ค่าเจาะจงทั้งหมด 14 ค่าตามจำนวนตัวแปรสถานะดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณาเฉพาะค่าเจาะจงที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรงหรือเรียกว่า ค่าเจาะจงเด่น (dominant pole) ของระบบ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ

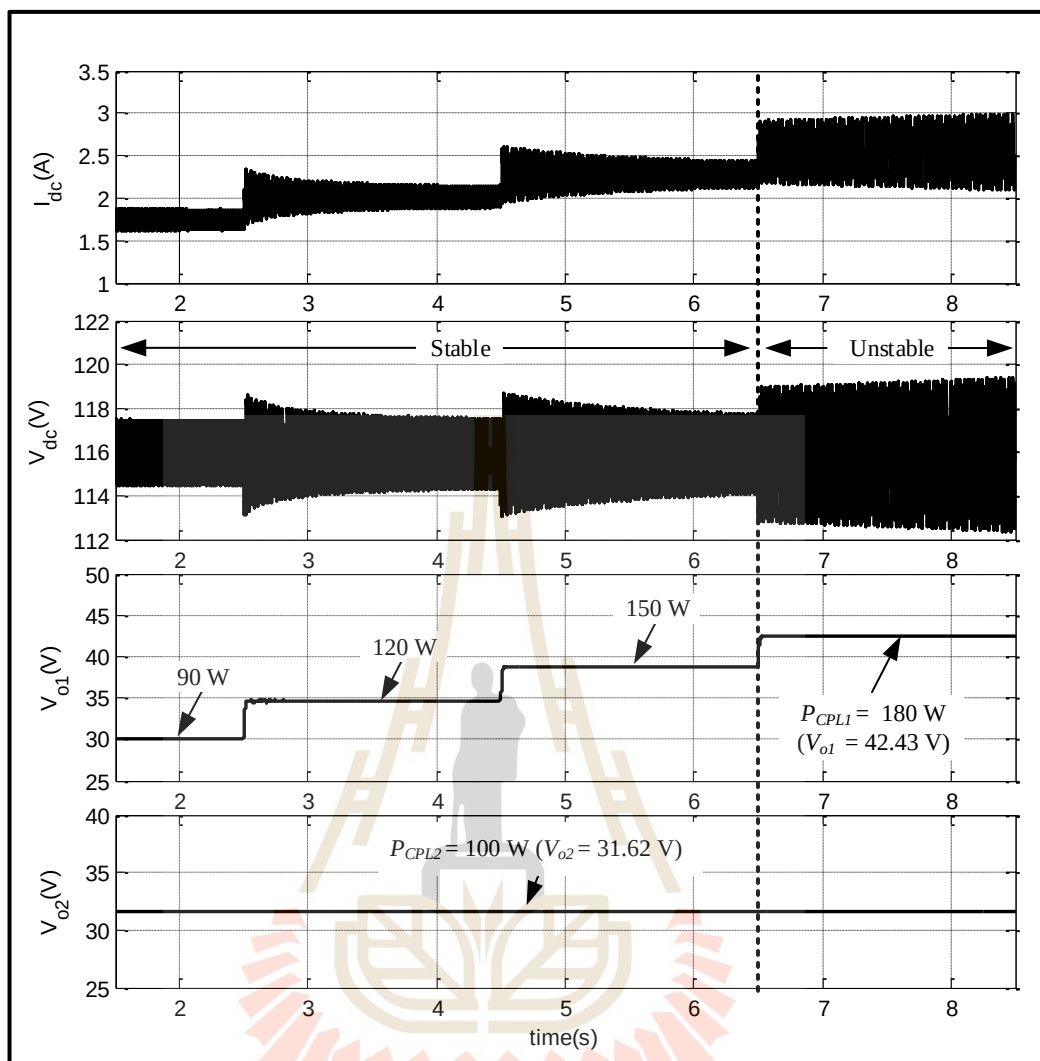


รูปที่ 4.8 ค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากรูปที่ 4.8 จะสังเกตได้ว่า เมื่อกำหนดให้โพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ซูดที่ 2 มีค่าคงที่เท่ากับ 100 W (31.62 V) และทำการเปลี่ยนแปลงโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ซูดที่ 1 โดยการเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตจาก 0 W (0 V) – 300 W (54.77 V) พบว่าเมื่อกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัก์ซูดที่ 1 เท่ากับ 180 W (42.43 V) ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นจะมีค่ามากกว่าศูนย์ ซึ่งไม่เป็นไปตามเงื่อนไขในสมการที่ (4-24) ที่กล่าวไว้ว่า ระบบจะมีเสถียรภาพ ก็ต่อเมื่อส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ดังนั้นที่จุดการทำงานนี้ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อผลรวมระดับกำลังไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ซูดทั้ง 2 ชุด ($P_{CPL,Total}$) มีค่าเท่ากับ 280 W ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแสดงดังสมการที่ (4-25)

$$P_{CPL,Total} = P_{CPL1} + P_{CPL2} = \frac{V_{o1}^2}{R_1} + \frac{V_{o2}^2}{R_2} \quad (4-25)$$

สำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากทฤษฎีของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการยืนยันการขาดเสถียรแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า กระแสเอาต์พุตดีซี (I_{dc}) และแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) จะเกิดการแกว่งเพิ่มมากขึ้น หรือเรียกว่า การขาดเสถียรของระบบ เมื่อผลรวมระดับกำลังไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก์ซูดทั้ง 2 ชุด มีค่าเท่ากับ 280 W ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากทฤษฎีค่าเจาะจงที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองสถานการณ์การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1

4.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกัชานานกันกรณีที่มีการควบคุม โดยใช้วิธีการผสมผสานระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งต้องอาศัยองค์ความรู้เบื้องต้นในบทที่ 3 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ไม่เป็นเชิงเส้น จึงใช้อัลกอริทึมเลอว์อันดับที่หนึ่งทำให้ได้แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น และดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุด

บล็อกไฟฟ้ากำลังทั้งสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงมีความถูกต้อง แม่นยำ และความน่าเชื่อถือสูง เมื่อนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ร่วมกับทฤษฎีค่าเจาะจงสำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ พบว่าสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพทำได้เพียงการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้เท่านั้น แต่ไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อได้ ดังนั้นในบทที่ 5 จึงได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นวิธีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกันเพื่อให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้



บทที่ 5

การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคซ์นานกันโดยใช้ลูปป้อนไปหน้า

5.1 บทนำ

การดำเนินการสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซ์นานกันในบทที่ 4 ที่ผ่านมาทำให้สามารถคาดเดาเหตุการณ์การขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามเพียงแค่การวิเคราะห์เสถียรภาพไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานได้ถึงค่าพิกัดที่ตั้งไว้ได้ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซ์นานกันโดยใช้ลูปป้อนไปหน้า ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ก่อให้เกิดกำลังสูญเสียเนื่องจากการเพิ่มวงจรช่วยเข้าไปในระบบ โดยจะอาศัยเพียงการเพิ่มลูปป้อนไปหน้าเข้าไปในตัวควบคุมพีไอที่มีอยู่เดิมของวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า การวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ สำหรับเนื้อหาในบทที่ 5 นี้จะนำไปต่อยอดเพื่อใช้งานร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อลดข้อเสียของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า ซึ่งจะนำเสนอในบทที่ 6 ต่อไป

5.2 การบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ลูปป้อนไปหน้า

5.2.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ลูปป้อนไปหน้า

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 5.1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสผ่านสายส่งกำลังด้านเอซีต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณดีซีเพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ที่มีการควบคุมทั้ง 2 ชุด ซึ่งเป็นโครงสร้างดั้งเดิมที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 ที่ผ่านมา โดยในบทที่ 5 จะเพิ่มเติมในส่วนของวงจรการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า

เมื่อ
$$C_{bp}(s) = \frac{(\omega_L + \omega_H)s}{s^2 + (\omega_L + \omega_H)s + \omega_L\omega_H} \text{ และ } \omega_0 = \sqrt{\omega_L\omega_H}$$

จากสมการที่ (5-1) จะเห็นได้ว่า เมื่อค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ V_{stab} เท่ากับ 0 ดังนั้น $V_{refl} = V_{oi}^*$ ซึ่งหมายถึง วงจรการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้ายังไม่ทำงาน จึงทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ แต่ถ้าค่า K_f มีค่ามากกว่า 0 จะทำให้ V_{refl} มีอัตราการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันเอาต์พุตที่ผ่านตัวกรองผ่านแถบ และเมื่อพิจารณาตามหลักการของตัวควบคุมพีไอ คือ การหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง V_{refl} กับ V_{oi} เพื่อนำไปปรับคูณกับพารามิเตอร์ $K_{pv,l}$, $K_{iv,l}$, $K_{pi,l}$, และ $K_{ii,l}$ จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับ 0 จึงทำให้แรงดันเอาต์พุต V_{oi} ปรับตามรูปสัญญาณแรงดันอ้างอิง V_{refl} ส่งผลให้กระแส I_{dc} มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ (r_L) เพิ่มขึ้นเช่นกัน ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงทำให้ V_{dc} มีค่าลดลง จากพฤติกรรมของระบบข้างต้นจะเปรียบเสมือนว่ามีอิมพีแดนซ์เสมือน ซึ่งประกอบด้วย ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณดีซี (Wu M. and Lu D.D.C., 2015; Wu M., Lu D.D.C. and Tse C., 2015) จึงสามารถบรรเทาปัญหาการขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของค่า K_f ที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้ จะอาศัยการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีดีคิวผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งรายละเอียดการพิสูจน์จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.2.2

5.2.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า จำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์ผลของค่า K_f ผ่านการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและให้ผลการคำนวณที่มีความถูกต้องแม่นยำ เหมาะสำหรับการนำมาใช้ร่วมกับทฤษฎีค่าเจาะจง เพื่อคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 สามารถใช้องค์ความรู้ในบทที่ 3 และ บทที่ 4 ที่ผ่านมา ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลอย่างง่ายให้อยู่บนแกนดีคิว ดังรูปที่ 5.2

ดำเนินการจัดรูปสมการที่ (5-3) ให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการพิสูจน์ได้ดังนี้

$$\begin{cases} s^2 V_{df} + s(\omega_L + \omega_H) V_{df} + V_{df} \omega_L \omega_H = (\omega_L + \omega_H) V_{dc} \\ s V_{bpf} = (\omega_L + \omega_H) V_{dc} - \omega_L \omega_H V_{df} - (\omega_L + \omega_H) V_{bpf} \end{cases}$$

ดังนั้น จะได้สมการเชิงอนุพันธ์ $\dot{V}_{bpf}$ แสดงดังสมการที่ (5-5)

$$\dot{V}_{bpf} = (\omega_L + \omega_H) V_{dc} - \omega_L \omega_H V_{df} - (\omega_L + \omega_H) V_{bpf} \quad (5-5)$$

ลำดับถัดไปจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวควบคุมชุดที่ 1 ในรูปที่ 5.2 จะสังเกตเห็นว่าลูปป้อนไปหน้าจะส่งผลให้โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอชุดที่ 1 ขณะที่ไม่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยการสร้างแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ต้องการใหม่ที่ได้อีกว่าไว้ในหัวข้อที่ 5.2.1 ดังนั้น จึงสามารถแสดงขั้นตอนการพิสูจน์สมการของตัวควบคุมพีไอชุดที่ 1 ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{cases} d_1^* = -\frac{K_{pi,1} I_{L1}}{A_{r,1}} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1}}{A_{r,1}} + \frac{K_{iv,1} K_{pi,1} X_{v1}}{A_{r,1}} + \frac{K_{ii,1} X_{i1}}{A_{r,1}} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{ref1}}{A_{r,1}} \\ d_1^* = -\frac{K_{pi,1} I_{L1}}{A_{r,1}} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1}}{A_{r,1}} + \frac{K_{iv,1} K_{pi,1} X_{v1}}{A_{r,1}} + \frac{K_{ii,1} X_{i1}}{A_{r,1}} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1}^*}{A_{r,1}} \\ \quad + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{stab}}{A_{r,1}} \end{cases}$$

ดังนั้น จะได้สมการของตัวควบคุมพีไอชุดที่ 1 ใหม่ แสดงดังสมการที่ (5-6)

$$\begin{aligned} d_1^* = & -\frac{K_{pi,1} I_{L1}}{A_{r,1}} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1}}{A_{r,1}} + \frac{K_{iv,1} K_{pi,1} X_{v1}}{A_{r,1}} + \frac{K_{ii,1} X_{i1}}{A_{r,1}} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{o1}^*}{A_{r,1}} \\ & + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} K_f V_{bpf}}{A_{r,1}} \end{aligned} \quad (5-6)$$

จากการกำจัดผลของพจน์ที่อยู่ในโดเมนเอส ในสมการที่ (5-2) และ (5-3) รวมถึงการวิเคราะห์โครงสร้างของตัวควบคุมพีไอชุดที่ 1 ใหม่ จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยรูปป้อนไปหน้า แสดงดังสมการที่ (5-7)

$$\begin{cases}
 \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\
 \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} \\
 \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1}^2 \\
 \quad - \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} V_{o1} + \frac{r_c K_{iv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} X_{v1} + \frac{r_c K_{ii,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} X_{i1} + \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* \\
 \quad + \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1} K_f}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} V_{bpf} - \frac{r_c K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2}^2 - \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} V_{o2} \\
 \quad + \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} X_{v2} + \frac{r_c K_{ii,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} X_{i2} + \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \\
 \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1}^2 + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} V_{o1} - \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} X_{v1} - \frac{K_{ii,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} X_{i1} \\
 \quad - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} K_f}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} V_{bpf} + \frac{K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2}^2 + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} V_{o2} \\
 \quad - \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} X_{v2} - \frac{K_{ii,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} X_{i2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \\
 \dot{I}_{L1} = -\frac{K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} I_{L1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} V_{o1} - \frac{1}{L_1} V_{o1} + \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} X_{v1} \\
 \quad + \frac{K_{ii,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} X_{i1} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} V_{o1}^* - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} K_f}{A_{r,1} L_1} V_{dc} V_{bpf} \\
 \dot{V}_{o1} = \frac{1}{C_1} I_{L1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1} \\
 \dot{X}_{v1} = -V_{o1} + V_{o1}^* + K_f V_{bpf}
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
\dot{X}_{i1} = -I_{L1} - K_{pv,1}V_{o1} + K_{iv,1}X_{v,1} + K_{pv,1}V_{o1}^* + K_{pv,1}K_f V_{bpf} \\
\dot{V}_{df} = V_{bpf} \\
\dot{V}_{bpf} = (\omega_L + \omega_H)V_{dc} - \omega_L\omega_H V_{df} - (\omega_L + \omega_H)V_{bpf} \\
\dot{I}_{L2} = -\frac{K_{pi,2}}{A_{r,2}L_2}V_{dc}I_{L2} - \frac{K_{pv,2}K_{pi,2}}{A_{r,2}L_2}V_{dc}V_{o2} - \frac{1}{L_2}V_{o2} + \frac{K_{iv,2}K_{pi,2}}{A_{r,2}L_2}V_{dc}X_{v2} \\
\quad + \frac{K_{ii,2}}{A_{r,2}L_2}V_{dc}X_{i2} + \frac{K_{pv,2}K_{pi,2}}{A_{r,2}L_2}V_{dc}V_{o2}^* \\
\dot{V}_{o2} = \frac{1}{C_2}I_{L2} - \frac{1}{R_2C_2}V_{o2} \\
\dot{X}_{v2} = -V_{o2} + V_{o2}^* \\
\dot{X}_{i2} = -I_{L2} - K_{pv,2}V_{o2} + K_{iv,2}X_{v,2} + K_{pv,2}V_{o2}^*
\end{cases} \quad (5-7)$$

5.2.3 การทำให้เป็นเชิงเส้น

จากสมการที่ (5-7) จะเห็นได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจะปรากฏค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_f) ซึ่งการวิเคราะห์ผลของค่า K_f ที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพภายใต้พิกัดที่ตั้งไว้สามารถทำได้โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับ 1 ร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง ดังนั้นสามารถเขียนแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (5-8)

$$\begin{cases}
\delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)\delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)\delta \mathbf{u} \\
\delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)\delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)\delta \mathbf{u}
\end{cases} \quad (5-8)$$

โดยที่

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

รายละเอียดของ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ในสมการที่ (5-9) แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} \frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{\sqrt{3} 2\sqrt{3}}{2\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3} 2\sqrt{3}}{2\pi L_{eq}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} & a(5,7) & -\frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} L_{dc}} & -\frac{r_c K_{iv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} L_{dc}} & -\frac{r_c K_{ii,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} L_{dc}} & 0 & a(5,12) & a(5,13) & -\frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} L_{dc}} & -\frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} L_{dc}} & -\frac{r_c K_{ii,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} L_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & a(6,7) & \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} C_{dc}} & -\frac{K_{iv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} C_{dc}} & -\frac{K_{ii,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} C_{dc}} & 0 & a(6,12) & a(6,13) & \frac{K_{pv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} C_{dc}} & -\frac{K_{iv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} C_{dc}} & -\frac{K_{ii,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} C_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & -\frac{K_{pi,1} V_{dc,o}}{A_{r,1} L_1} & -\frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{dc,o} + A_{r,1}}{A_{r,1} L_1} & -\frac{K_{iv,1} K_{pi,1} V_{dc,o}}{A_{r,1} L_1} & -\frac{K_{ii,1} V_{dc,o}}{A_{r,1} L_1} & 0 & a(7,12) & 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 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & K_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv,1} & K_{iv,1} & 0 & 0 & K_{pv,1} K_f & 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 & (\omega_L + \omega_H) & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_L \omega_H & -(\omega_L + \omega_H) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(13,6) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{pi,2} V_{dc,o}}{A_{r,2} L_2} & -\frac{K_{pv,2} K_{pi,2} V_{dc,o} + A_{r,2}}{A_{r,2} L_2} & \frac{K_{iv,2} K_{pi,2} V_{dc,o}}{A_{r,2} L_2} & \frac{K_{ii,2} V_{dc,o}}{A_{r,2} L_2} \\ 0 & 0 & 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 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv,2} & K_{iv,2} & 0 \end{bmatrix}$$

-16x16

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

$$a(5,12) = \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1} K_f I_{L1,o}}{A_{r,1} L_{dc}}$$

$$a(5,12) = \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1} K_f I_{L1,o}}{A_{r,1} L_{dc}}$$

$$a(5,13) = -\frac{2r_c K_{pi,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} L_{dc}} - \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}}{A_{r,2} L_{dc}} + \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2} X_{v2,o}}{A_{r,2} L_{dc}} + \frac{r_c K_{ii,2} X_{i2,o}}{A_{r,2} L_{dc}} + \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}^*}{A_{r,2} L_{dc}}$$

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

$$a(6,13) = \frac{2K_{pi,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} C_{dc}} + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}}{A_{r,2} C_{dc}} - \frac{K_{iv,2} K_{pi,2} X_{v2,o}}{A_{r,2} C_{dc}} - \frac{K_{ii,2} X_{i2,o}}{A_{r,2} C_{dc}} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2} V_{o2,o}^*}{A_{r,2} C_{dc}}$$

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

$$a(7,12) = \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} K_f V_{dc,o}}{A_{r,1} L_1}$$

$$a(13,6) = -\frac{K_{pi,2}I_{L2,o}}{A_{r,2}L_2} - \frac{K_{pv,2}K_{pi,2}V_{o2,o}}{A_{r,2}L_2} + \frac{K_{iv,2}K_{pi,2}X_{v2,o}}{A_{r,2}L_2} + \frac{K_{ii,2}X_{i2,o}}{A_{r,2}L_2} + \frac{K_{pv,2}K_{pi,2}V_{ol,o}^*}{A_{r,2}L_2}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\cos(\lambda_o)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sin(\lambda_o)}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} L_{dc}} & \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} L_{dc}} \\ 0 & \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} I_{L1,o}}{A_{r,1} C_{dc}} & \frac{K_{pv,2} K_{pi,2} I_{L2,o}}{A_{r,2} C_{dc}} \\ 0 & \frac{K_{pv,1} K_{pi,1} V_{dc,o}}{A_{r,1} L_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & K_{pv,1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{pv,2} K_{pi,2} V_{dc,o}}{A_{r,2} L_2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & K_{pv,2} \end{bmatrix}_{16 \times 3}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 16}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 3} \quad (5-9)$$

5.2.4 การคำนวณค่าในสถานะคงตัว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-8) มีความสอดคล้องสำหรับการคำนวณหาค่า $V_{dc,o}$, λ_o , $V_{o1,o}$, $V_{o2,o}$, $I_{L1,o}$, $I_{L2,o}$, $X_{v1,o}$, $X_{v2,o}$, $X_{i1,o}$, $X_{i2,o}$, $V_{df,o}$ และ $V_{bpf,o}$ ในส่วนแรกจะประยุกต์ใช้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าหาค่าในสถานะอยู่ตัวทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ คือ $V_{dc,o}$ และ λ_o ซึ่งได้รับการพิสูจน์ไว้ในบทที่ 3 ดังนั้น ค่าในสถานะคงตัวที่สอดคล้องกับสมการที่ (5-8) สามารถคำนวณได้จาก $V_{dc,o}$ และ λ_o โดยอาศัยสมการที่ (5-10)

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dc,o} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{bus,o}) - (r_\mu + r_L)I_{dc,o} \\ V_{o1,o} = V_{o1}^*, \quad V_{o2,o} = V_{o2}^* \\ I_{L1,o} = \frac{V_{o1,o}}{R_1}, \quad I_{L2,o} = \frac{V_{o2,o}}{R_2} \\ X_{v1,o} = \frac{I_{L1,o}}{K_{iv,1}}, \quad X_{v2,o} = \frac{I_{L2,o}}{K_{iv,2}} \\ X_{i1,o} = \frac{V_{o1,o}A_{r,1}}{K_{ii,1}V_{dc,o}}, \quad X_{i2,o} = \frac{V_{o2,o}A_{r,2}}{K_{ii,2}V_{dc,o}} \\ V_{df,o} = \frac{(\omega_L + \omega_H)V_{dc,o}}{\omega_L\omega_H} \\ V_{bpf,o} = 0 \end{array} \right. \quad (5-10)$$

เมื่อ

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

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

5.2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้น

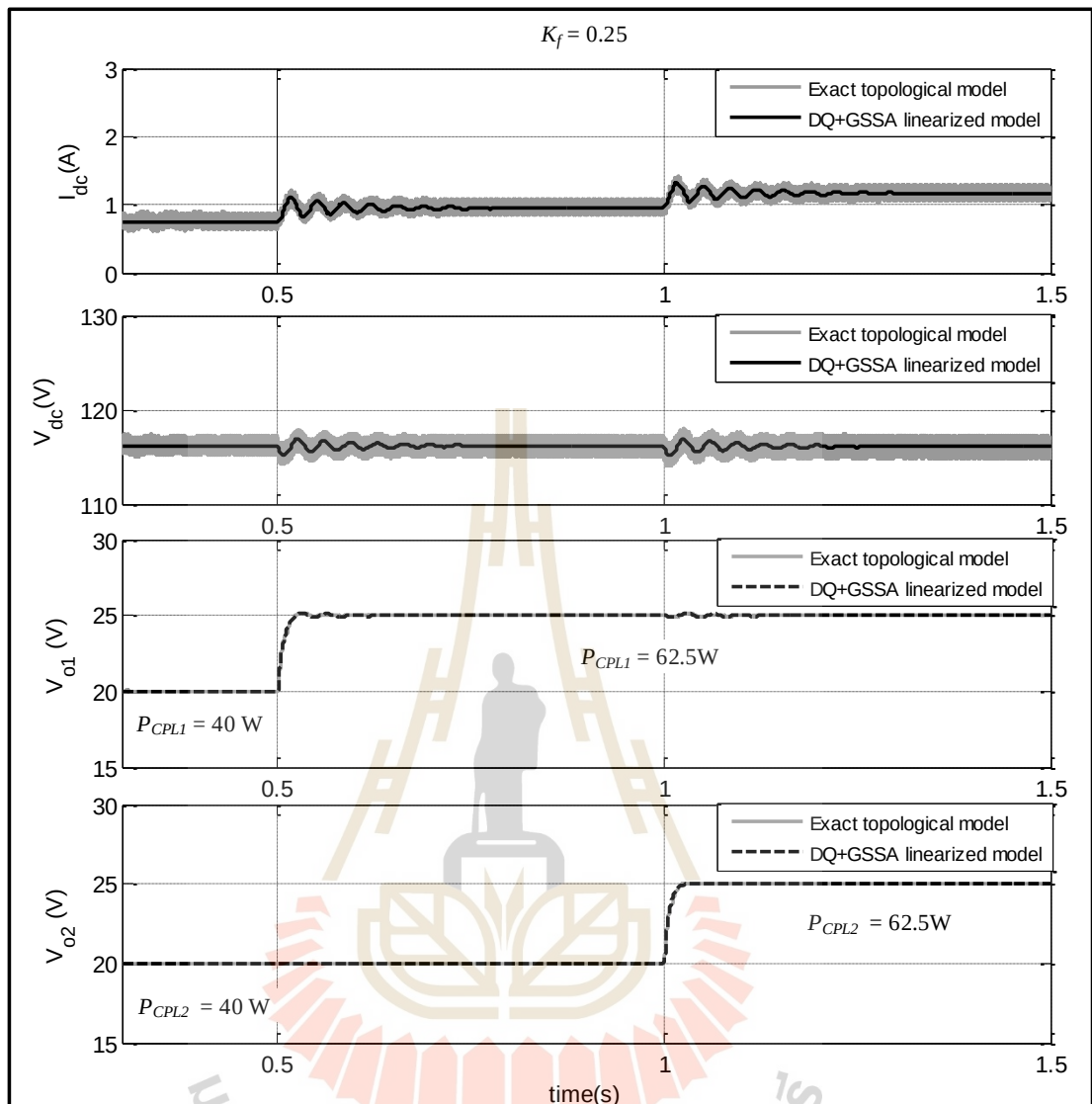
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (5-8) กับการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1 ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ในภาคผนวก ข.3 เพื่อพิจารณาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบในเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ของระบบ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 4.1 ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ตามลำดับ ซึ่งมีส่วนที่พิจารณาเพิ่มเติมจากระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4.1 ในบทที่ 4 แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของตัวกรองผ่านแถบสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1

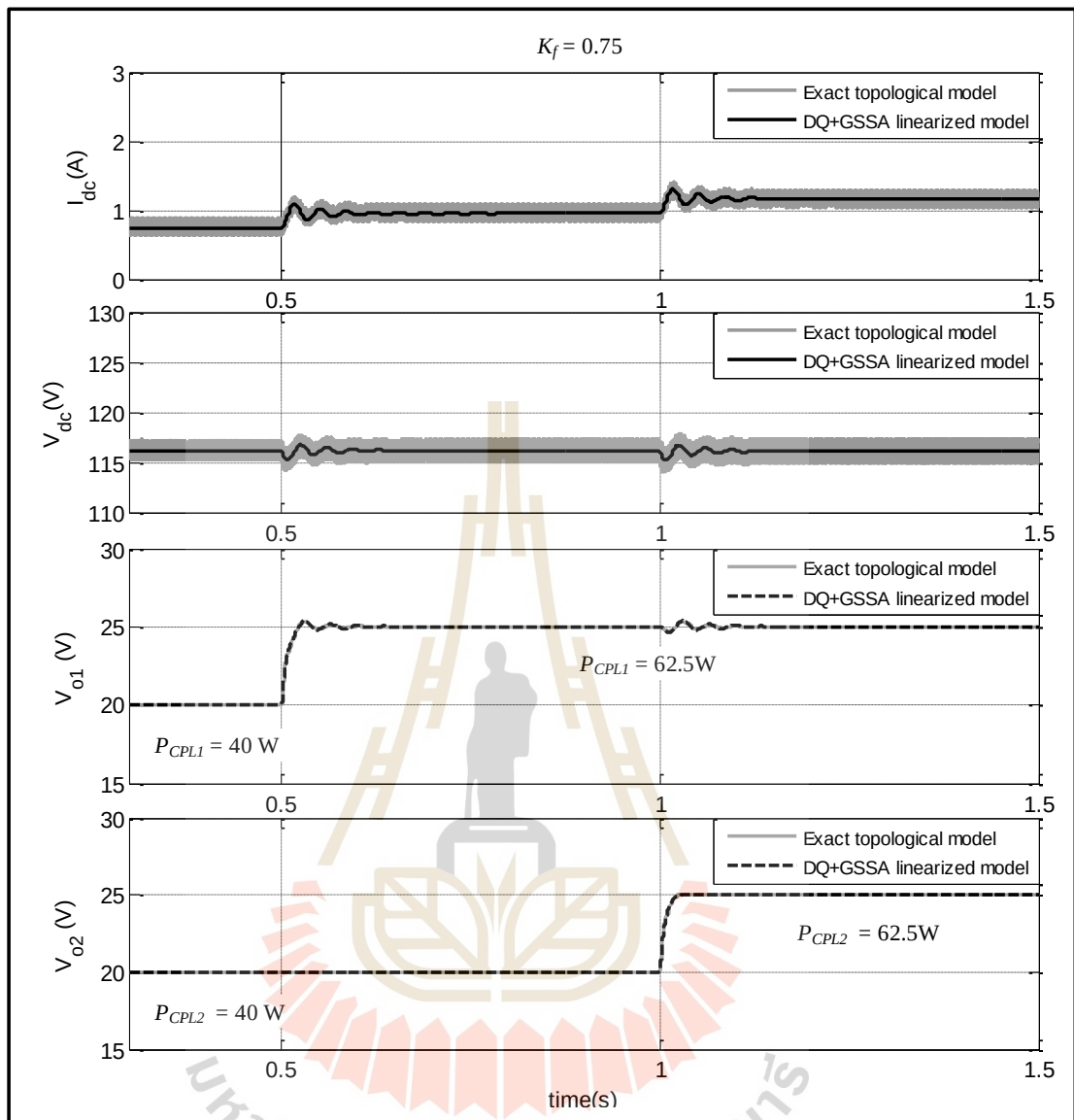
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
ω_0	182.57 rad/s	ความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองผ่านแถบ ($\omega_0 = \omega_r$)
ω_L	91.29 rad/s	ความถี่ตัดข้างล่าง ($\omega_L = \omega_r/2$)
ω_H	365.14 rad/s	ความถี่ตัดข้างบน ($\omega_H = \omega_r \times 2$)

จากรูปที่ 5.3 ได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงที่ต้องการของวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชดที่ 1 (V_{o1}^*) และชดที่ 2 (V_{o2}^*) จาก 20 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 0.5 วินาที และจาก 20 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 1.0 วินาที โดยกำหนดให้ค่า K_f เท่ากับ 0.25 และรูปที่ 5.4 ได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงที่ต้องการในลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 5.3 โดยกำหนดให้ค่า K_f เท่ากับ 0.75

จากรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 จะสังเกตได้ว่าผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งในสถานะชั่วครู่และในสถานะอยู่ตัว ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นในบทนี้มีความถูกต้องแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูง เหมาะสำหรับการวิเคราะห์หาค่า K_f ที่ส่งผลให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้ ภายใต้ทฤษฎีค่าเจาะจง ซึ่งรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.3



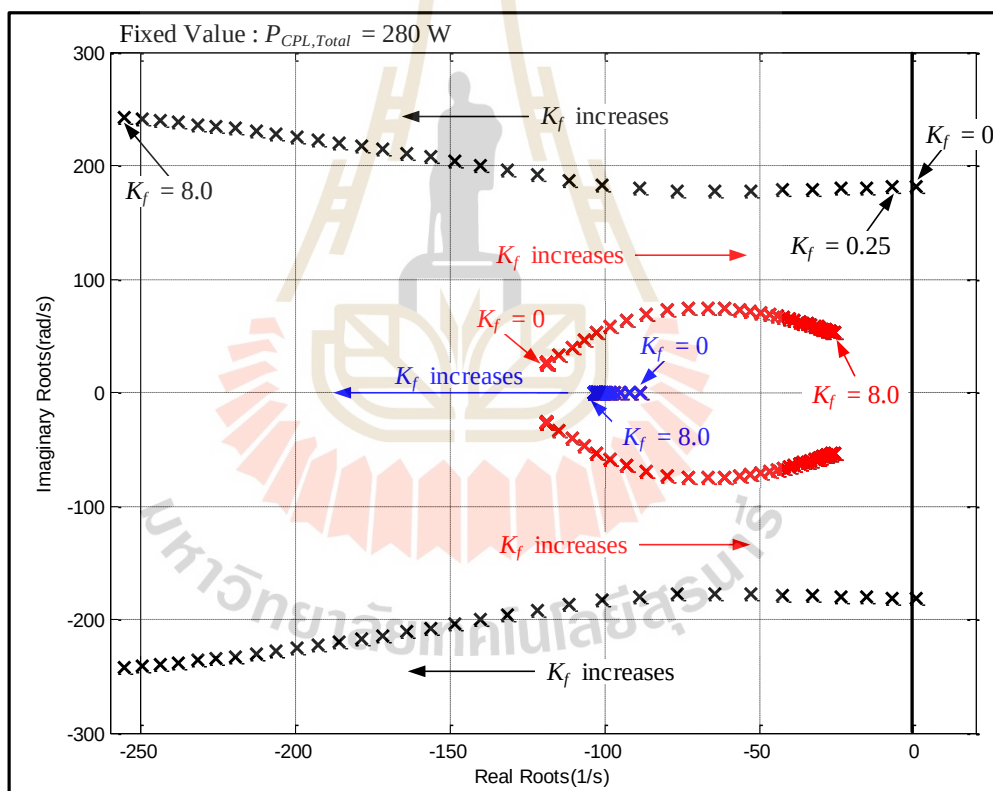
รูปที่ 5.3 ผลตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1
ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_{o1}^* และ V_{o2}^* โดยที่ $K_f = 0.25$



รูปที่ 5.4 ผลตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.1
ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_{o1}^* และ V_{o2}^* โดยที่ $K_f = 0.75$

5.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วย อุปกรณ์ไปหน้า

การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้อุปกรณ์ไปหน้า เพื่อวิเคราะห์หาค่า K_f ที่ทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพภายใต้พิกัดของระบบ จำเป็นต้องอาศัยเมตริกซ์จาโคเบียน $A(x_0, u_0)$ ของแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-8) ร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจงนำมาใช้ในการพิจารณา ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถแสดงดังรูปที่ 5.5 ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_f จาก 0 เพิ่มขึ้นทีละ 0.25 ไปจนถึง 8.0 โดยทำการปรับตั้งค่าโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชดที่ 1 และโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 42.43 V (180 W) และ 31.62 V (100 W) ตามลำดับ

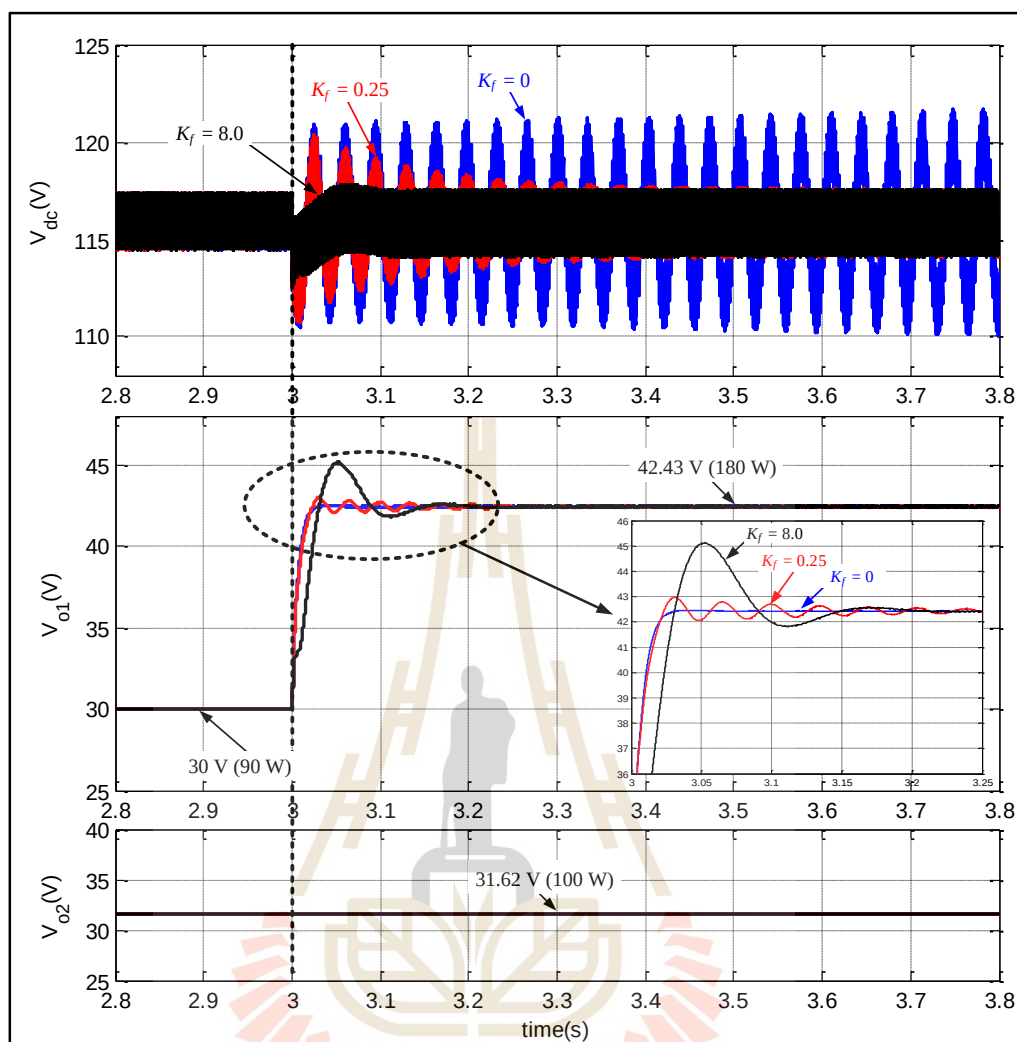


รูปที่ 5.5 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_f เมื่อกำหนดให้ $P_{CPL,Total} = 280$ W

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นได้ว่า ค่าเจาะจงเด่นที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบมี 2 คู่ และ 1 ค่า ที่ต้องนำมาพิจารณา โดยเริ่มพิจารณาค่าเจาะจงคู่ที่ 1 (สีดำ) เมื่อ K_f มีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือ ระบบยังไม่ได้รับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพที่จุดการทำงานนี้ แต่เมื่อ K_f มีค่าเท่ากับ

0.25 ค่าเจาะจงคู่ที่ 1 จะเคลื่อนที่จากทางด้านขวาของระนาบเอสมายังทางด้านซ้าย ซึ่งหมายถึงระบบที่ขาดเสถียรภาพจะกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง เพียงการเพิ่มค่า K_f จาก 0 มาเป็น 0.25 และเมื่อเพิ่มค่า K_f จนถึง 8.0 ค่าเจาะจงคู่ที่ 1 จะเคลื่อนที่มายู่ทางด้านซ้ายของระนาบเอสมากขึ้น ลำดับถัดไปจะพิจารณาค่าเจาะจงของระบบที่เป็นค่าจริง (สีน้ำเงิน) เมื่อทำการเพิ่มค่า K_f จาก 0 ถึง 8.0 ค่าเจาะจงดังกล่าว จะเคลื่อนที่เข้าทางด้านซ้ายของระนาบเอสมากขึ้น แต่ในทางกลับกัน เมื่อพิจารณาที่ค่าเจาะจงคู่ที่ 2 (สีแดง) สังเกตเห็นว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า K_f จาก 0 ถึง 8.0 ค่าเจาะจงคู่ที่ 2 จะมีทิศทางเคลื่อนที่จากด้านซ้ายของระนาบเอสไปยังด้านขวา และเริ่มมีอัตราการเคลื่อนที่ของค่าเจาะจงลดลง ซึ่งทำให้ค่าเจาะจงดังกล่าวยังคงอยู่ในฝั่งซ้ายของระนาบเอส แต่อย่างไรก็ตาม ค่าเจาะจงที่กล่าวมาข้างต้นจะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพพร้อมกัน ตัวอย่างเช่น ในสถานการณ์ที่ค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0.25 ค่าเจาะจงคู่ที่ 1 (สีดำ) จะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบมากกว่าค่าเจาะจงคู่ที่ 2 (แดง) และ ค่าเจาะจงที่เป็นค่าจริง (สีน้ำเงิน) เนื่องจากค่าดังกล่าวอยู่ใกล้แกนจินตภาพมากกว่า ดังนั้นการพิจารณาค่าเจาะจงเด่นของระบบจึงควรพิจารณาแต่ละกรณีไป สำหรับผลยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในรูปที่ 5.1 จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักค์ทั้ง 2 ชุด จาก 190 W ไปเป็น 280 W ที่เวลา 3.0 วินาที และกำหนดให้ K_f มีค่า 0, 0.25 และ 8.0 ตามลำดับ





รูปที่ 5.6 ผลการจำลองสถานการณ์ V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_f

จากรูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงผลรวมระดับของกำลังไฟฟ้าของ โหลดวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งทั้ง 2 ชุด จาก 190 W ไปเป็น 280 W ที่เวลา 3 วินาที โดยกำหนดให้ค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ซึ่งสังเกตได้จากการแกว่งของแรงดันบัสดิซี (V_{dc}) ที่มีค่าสูงมากขึ้น แต่เมื่อค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0.25 พบว่าจะทำให้แรงดันบัสดิซีมีค่าลดลง นั่นคือ ระบบจะกลับมามีเสถียรภาพ และเมื่อเพิ่มค่า K_f ไปเป็น 8.0 จะส่งผลให้ระบบมีการแกว่งของแรงดันบัสดิซีที่น้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นและมีสมรรถนะที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับ กรณีที่ค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0.25 โดยผลการจำลองสถานการณ์นี้จะสอดคล้องกับตำแหน่งของค่าเจาะจงในรูปที่ 5.5

อีกประเด็นที่น่าสนใจ เมื่อพิจารณาสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 1 (V_{oi}) โดยที่ค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0 จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง (ยังไม่มีภาระชดเชยด้วยรูปป้อนไปหน้า) แต่เมื่อเพิ่มค่า K_f จาก 0 ไปเป็น 0.25 พบว่าผลตอบสนอง V_{oi} จะเกิดการพุ่งเกิน (overshoot) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเกิดการแกว่งของรูปสัญญาณเป็นเวลานานถึงจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ในขณะที่ดำเนินการเพิ่มค่า K_f ให้มีค่าเท่ากับ 8.0 จะสังเกตเห็นว่า ผลตอบสนอง V_{oi} เกิดการพุ่งเกินสูงมากขึ้น เมื่อเทียบกับ กรณีที่ค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0.25 แต่ไม่ประสบปัญหาการแกว่งเป็นเวลานานของผลตอบสนอง V_{oi} จากการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า รูปป้อนไปหน้าจะส่งผลทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 1 ลดลง ซึ่งเป็นจุดอ่อนของการห้วงแบบเอกที่ฟด้านโหลด ดังนั้นจึงทำให้ผู้วิจัยสนใจและมุ่งเน้นในการทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดลดลงน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานด้วยการนำวิธีการทางปัญญาระดับสูงมาใช้สำหรับการออกแบบรูปป้อนไปหน้า ซึ่งรายละเอียดการออกแบบดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอในบทที่ 6 แต่ถึงอย่างไรก็ตาม การออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาระดับสูงนั้นจำเป็นต้องอาศัยผลการตอบสนองของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 1 ที่ได้จากการออกแบบรูปป้อนไปหน้าด้วยวิธีแบบดั้งเดิม เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของผลตอบสนอง V_{oi} ที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการ ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบรูปป้อนไปหน้าด้วยวิธีแบบดั้งเดิมจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.4

5.4 การออกแบบรูปป้อนไปหน้าด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

ในหัวข้อนี้จะเป็นการออกแบบรูปป้อนไปหน้าด้วยวิธีแบบดั้งเดิมเพื่อให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้จนถึงค่าพิกัดที่ตั้งไว้ และนำผลตอบสนองของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 1 ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการทางปัญญาระดับสูงต่อไป จากรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่ารูปป้อนไปหน้ามีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ตัวกรองผ่านแถบและค่าอัตราขยาย K_f ซึ่งจะได้รับการออกแบบด้วยวิธีการในหัวข้อที่ 5.4.1 และ 5.4.2 ตามลำดับ

5.4.1 การออกแบบตัวกรองผ่านแถบ

การออกแบบตัวกรองผ่านแถบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมจะใช้หลักการใน (Wu M. and Lu D.D.C., 2015; Wu M., Lu D.D.C. and Tse C., 2015) สำหรับกำหนดค่า ω_0 ให้มีค่าเท่ากับ ω_r ดังแสดงได้ในสมการที่ (5-11)

$$\omega_0 = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_{dc}C_{dc}}} \quad (5-11)$$

โดยที่ ω_0 คือ ค่าความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองผ่านแถบ (rad/s)

ω_r คือ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองคี่ซี (rad/s)

L_{dc} คือ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง (H)

C_{dc} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง (F)

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ค่า L_{dc} เท่ากับ 30 mH และค่า C_{dc} เท่ากับ 1000 μ F ดังนั้นจากสมการที่ (5-11) ค่า ω_r จะมีค่าเท่ากับ 182.57 rad/s

ในส่วน of ค่า ω_H จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $2\omega_r$ หรือ 365.14 rad/s ดังนั้นสามารถคำนวณหา ω_L จะอาศัยสมการที่ (5-12)

$$\omega_L = \frac{\omega_0^2}{\omega_H} \quad (5-12)$$

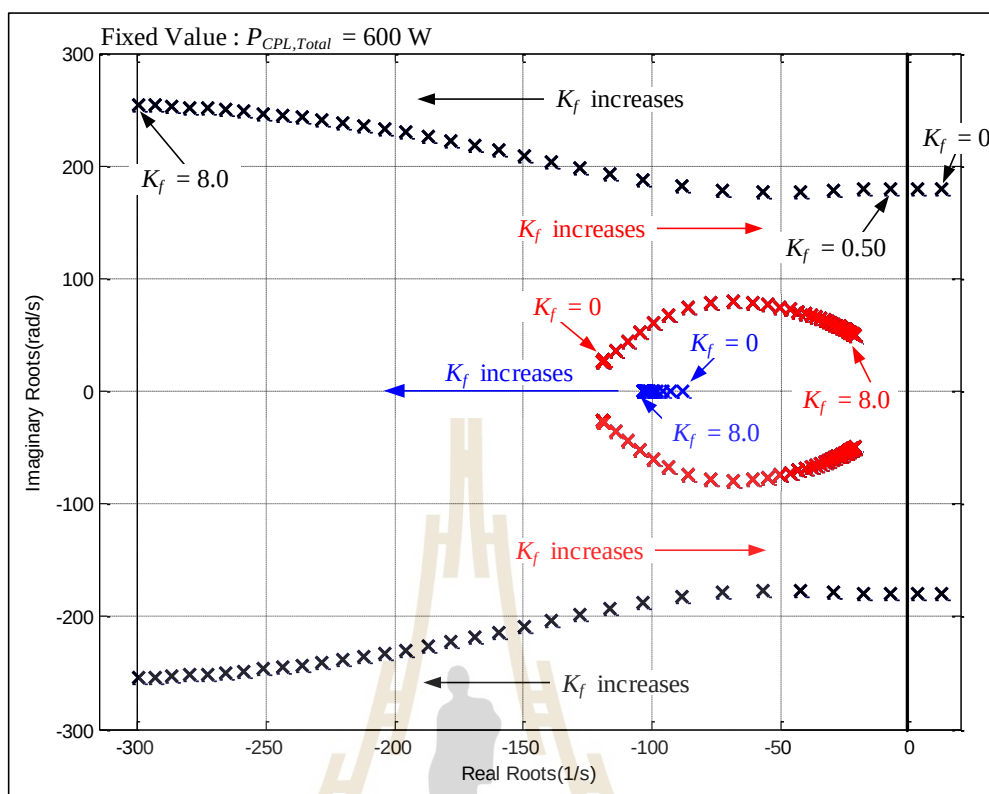
โดยที่ ω_H คือ ค่าความถี่ตัดข้างบน (rad/s)

ω_L คือ ค่าความถี่ตัดข้างล่าง (rad/s)

จากสมการที่ (5-12) จะได้ ω_L เท่ากับ 91.29 rad/s

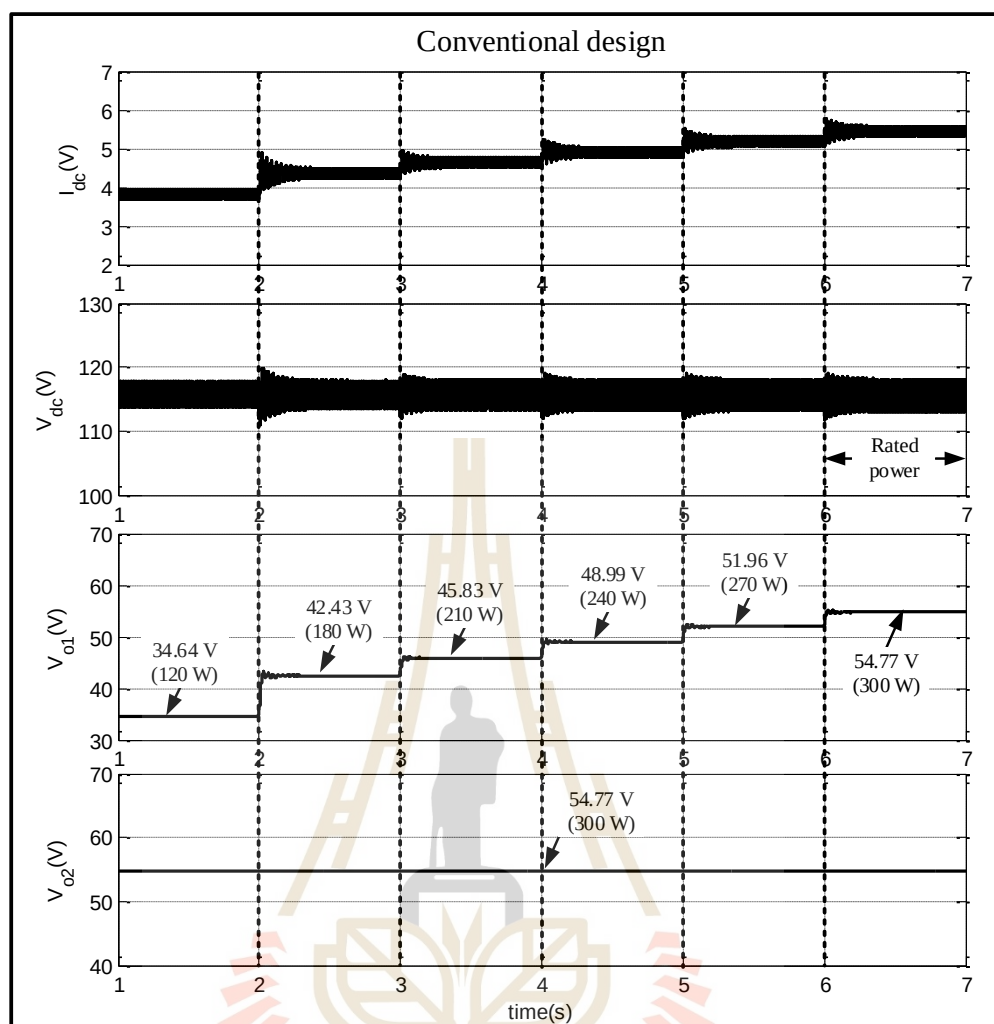
5.4.2 การออกแบบค่าอัตราขยาย K_f

การออกแบบค่าอัตราขยาย K_f จะอาศัยการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งจะดำเนินการในลักษณะเดียวกันกับในหัวข้อที่ 5.3 โดยกำหนดให้โหนดวงจรแปลงผันแบบบักส์ชดที่ 1 มีค่า $V_{o1}^* = 54.77$ V (300 W) และโหนดวงจรแปลงผันแบบบักส์ชดที่ 2 มีค่า $V_{o2}^* = 54.77$ V (300 W) ซึ่งการทำงานที่จุดนี้คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของโหนดทั้ง 2 ชุด และทำการเปลี่ยนแปลงค่า K_f จาก 0 เพิ่มขึ้นทีละ 0.25 ไปจนถึง 8.0 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ผลการคำนวณค่าเจาะจงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_f เมื่อกำหนดให้ $P_{CPL,Total} = 600$ W

จากรูปที่ 5.7 จะเห็นว่า เมื่อกำหนดให้ผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 600 W ที่ค่าอัตราขยาย K_f ตั้งแต่ 0 ถึง 0.25 ค่าเจาะจงเด่นที่คำนวณได้ (สีดำ) จะอยู่ทางด้านขวาของระนาบเอส นั่นคือระบบจะขาดเสถียรภาพที่ค่าพิกัดที่ตั้งไว้ในขณะที่ค่าอัตราขยาย K_f ตั้งแต่ 0.5 ถึง 8.0 ค่าเจาะจงเด่นที่คำนวณได้ (สีดำ, สีแดง, สีนํ้าเงิน) จะอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเอสทั้งหมด ซึ่งหมายถึงระบบสามารถทำงานได้จนถึงพิกัดที่ตั้งไว้ ดังนั้นในงานในวิจัยวิทยานิพนธ์จึงเลือกค่าอัตราขยาย K_f มีค่าเท่ากับ 0.5 ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุดที่เพียงพอต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานของระบบ พร้อมทั้งยืนยันผลการวิเคราะห์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้รูปป้อนไปหน้าด้วยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ผลการจำลองสถานการณ์ I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิม

จากรูปที่ 5.8 จะเห็นว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยรูปป้อนไปหน้าที่มีการคงค่า K_f เท่ากับ 0.5 ยังคงสามารถชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้ตลอดช่วงการทำงาน ในขณะที่โหลดวงจรแปลงผันแบบบักมีระดับกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 220 W ไปจนถึง 600 W (ค่าพิกัดที่ตั้งไว้) ซึ่งผลตอบสนองของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักชุดที่ 1 ที่ได้จากวิธีแบบดั้งเดิมจะถูกนำไปใช้เปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อแสดงให้เห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ของรูปป้อนไปหน้าที่ได้จากวิธีแบบใดทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันของโหลดดีที่สุด โดยผลการเปรียบเทียบดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอพร้อมกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของรูปป้อนไปหน้าด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในบทถัดไป

5.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นี้ได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นวิธีที่มีโหนดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งกันกันด้วยรูปไปหน้า พร้อมทั้งนำเสนอการวิเคราะห์ค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน K_f ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการตรวจสอบความถูกต้อง ผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี และการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถยืนยันได้ว่าวิธีที่ได้นำเสนอในบทนี้สามารถบรรเทาปัญหาการขาดเสถียรภาพได้จริง อีกทั้งยังได้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของรูปไปหน้าด้วยวิธีแบบดั้งเดิม สำหรับทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน ซึ่งเป็นองค์ความรู้สำหรับนำไปใช้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ของรูปไปหน้าด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันของโหนดลดลงน้อยที่สุด โดยรายละเอียดการออกแบบนั้นจะได้รับการนำเสนอต่อไป



บทที่ 6

การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบักก์ชานกันโดยใช้ลูปป้อนไปหน้าร่วมกับ วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

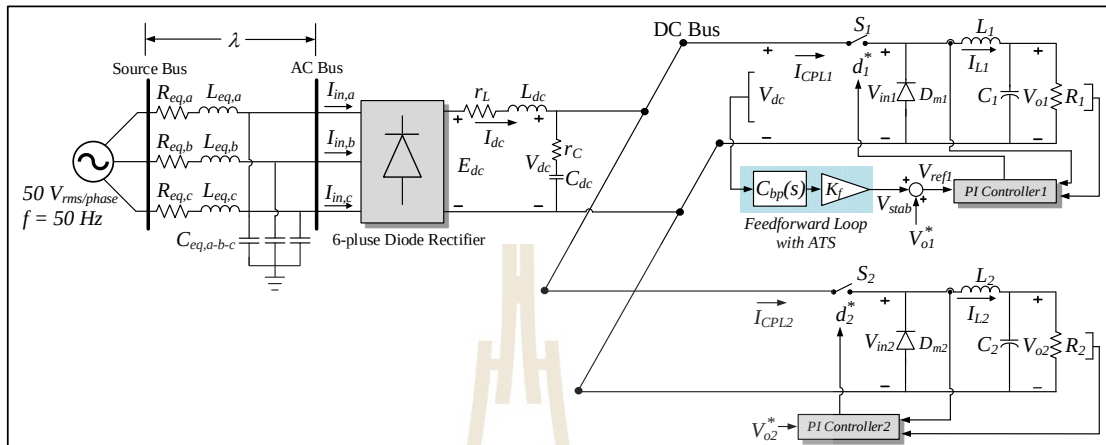
6.1 บทนำ

การดำเนินงานสำหรับการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ชานกัน โดยใช้ลูปป้อนไปหน้า ซึ่งได้มีการอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์จากวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาผ่านการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 ที่ผ่านมา ซึ่งพบว่าสามารถบรรเทาปัญหาการขาดเสถียรภาพของระบบได้ทุกช่วงการทำงาน แต่อย่างไรก็ตามการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ลูปป้อนไปหน้านั้น นับว่าเป็นการห่วยแบบแอกทีฟด้านโหลดจึงส่งผลทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ลดลง ดังนั้นในบทที่ 6 จึงนำเสนอวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบลูปป้อนไปหน้าที่ทำให้ผลการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของโหลดมีสมรรถนะที่ดีขึ้น พร้อมทั้งมีการตรวจสอบเสถียรภาพในขณะการออกแบบ สำหรับการยืนยันผลการออกแบบจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงให้เห็นว่า ระบบที่ได้มีการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของลูปป้อนไปหน้าด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอในบทนี้จะมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานและมีสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม

6.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ลูปป้อนไปหน้า ร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 จะประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสผ่านสายส่งกำลังด้านเอซีต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณดีซีเพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุด โดยมีวงจรการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าที่ได้รับการออกแบบผ่านวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (ATS) ต่อเข้ากับระบบควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1

สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานและทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโพลวงจรแปลงผันแบบบักค์ชนิดที่ 1 ลดลงน้อยที่สุด



รูปที่ 6.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การออกแบบลูปป้อนไปหน้าด้วยวิธี ATS มีความจำเป็นอย่างยั้งที่ต้องอาศัยองค์ความรู้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปร่วมกับการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งทำให้ได้แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นเพื่อใช้ในการคำนวณหาข้อมูลต่างๆ ของระบบและนำไปประเมินผลตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นนี้สามารถดูรายละเอียดได้จากสมการที่ (5-8) ในบทที่ 5 โดยมีรูปแบบดังสมการที่ (6-1)

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (6-1)$$

6.3 การออกแบบลูปป้อนไปหน้าด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

หัวข้อนี้ได้นำเสนอการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโพลเป็นวงจรแปลงผันแบบบักค์ขนานกันที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า เพื่อใช้ในการออกแบบลูปป้อนไปหน้าที่ทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโพลวงจรแปลงผันแบบบักค์ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิมภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน โดยเนื้อหาที่สำคัญจะประกอบด้วย หลักการ

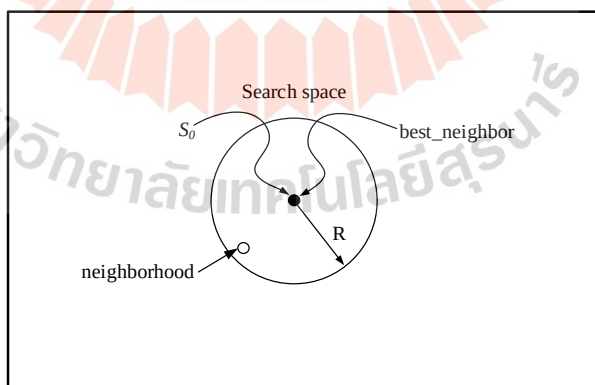
ค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว กระบวนการออกแบบลูปย้อนไปหน้า ผลการออกแบบลูปย้อนไปหน้า และผลการจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผลการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับ ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 6.3.1 - 6.3.4 ตามลำดับ

6.3.1 หลักการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวเป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามู (Tabu Search; TS) มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น อัลกอริทึมนี้ได้พัฒนาขึ้นโดย กองพัน อารีรักษ์ และสราวดี สุจิตจร ในปี พ.ศ.2545 โดยได้ทำการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบตามู คือ การเดินย้อนรอย (back tracking) และ ปรับรัศมีการค้นหา (adaptive radius) กลไกการเดินย้อนรอยนั้นใช้แก้ปัญหาสำหรับการติดอยู่ในคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum) สำหรับกลไกการปรับรัศมีการค้นหาจะทำการปรับลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเขาใกล้คำตอบที่ดีที่สุด (Puangdownreong D., Areerak K-N., Sujitjorn S. and Kulworawanichpong T., 2004) อัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสามารถพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

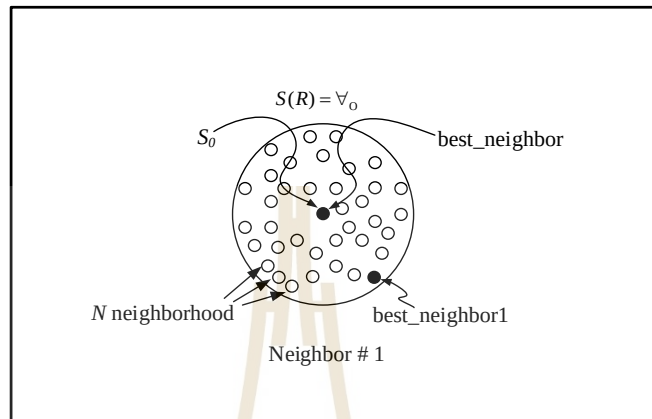
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น S_0 ภายใต้พื้นที่การค้นหา และให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) แสดงดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 สุ่มค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา

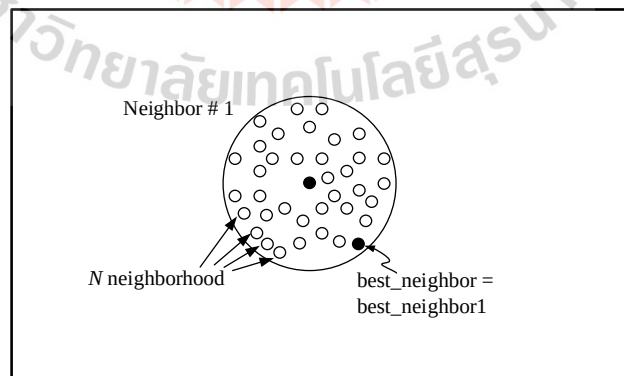
ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบรอบ ๆ S_0 ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่า คำตอบรอบข้าง แสดงดังรูปที่ 6.3



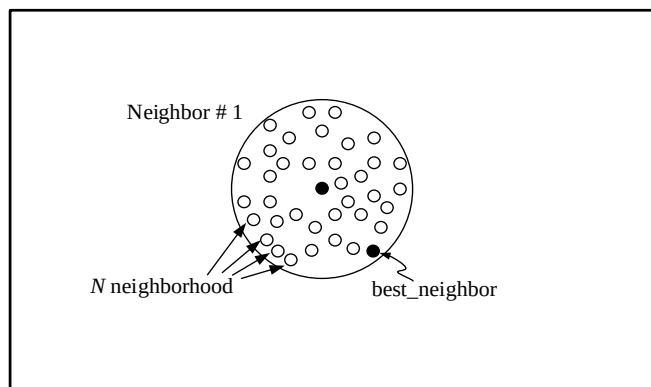
รูปที่ 6.3 คำใกล้เคียงรอบ ๆ S_0

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินคำตอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ โดยกำหนดให้ S_1 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดที่สุดใน $S(R)$

ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ ดังนั้นกำหนดให้ $S_1 = S_0$ และเก็บค่า S_0 ในรายการตามแสดงดังรูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5



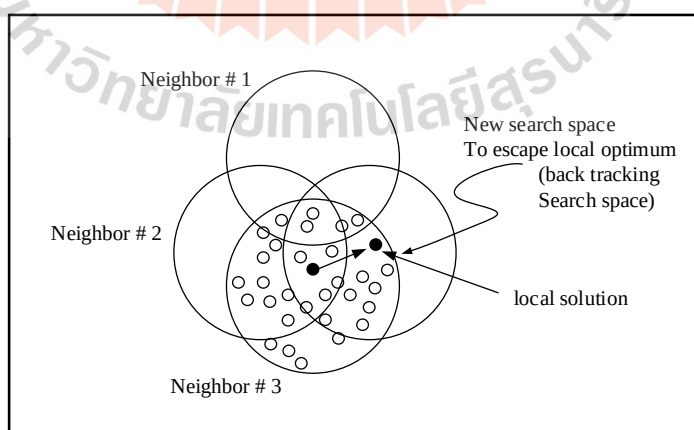
รูปที่ 6.4 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่



รูปที่ 6.5 กำหนดค่า S_0 ใหม่

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า $round < round_{max}$ จะหยุดกระบวนการค้นหา โดยที่ค่า S_0 คือคำตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 และเริ่มกระบวนการใหม่อีกครั้งจนกระทั่งได้คำตอบที่พอใจ

ขั้นตอนที่ 7 จะเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจำนวนเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ได้ทำการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตามเพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่น แสดงดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 กลไกการเดินย้อนรอย

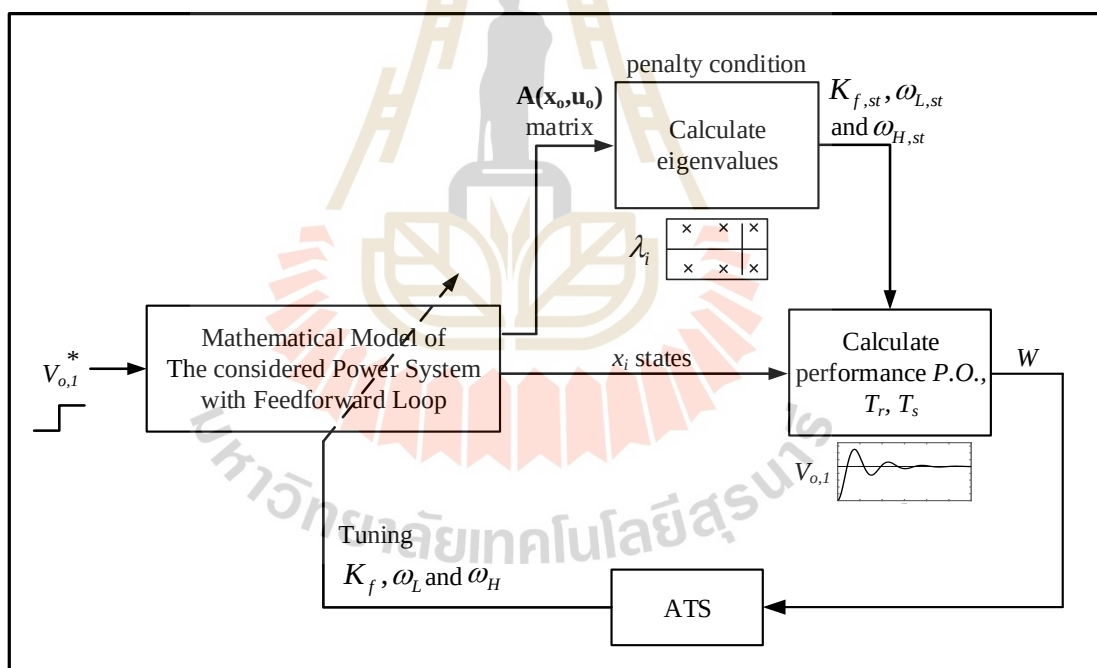
ขั้นตอนที่ 8 จะเข้าสู่กลไกการปรับค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6-2)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (6-2)$$

โดยที่ DF คือ อัตราปรับลดรัศมี

6.3.2 กระบวนการออกแบบลูปป้อนไปหน้า

โครงสร้างบล็อกไดอะแกรมสำหรับการออกแบบลูปป้อนไปหน้าด้วยวิธี ATS แสดงดังรูปที่ 6.7 ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าและอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบ ATS



รูปที่ 6.7 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบลูปป้อนไปหน้าด้วย ATS

จากรูปที่ 6.7 แสดงขั้นตอนในการออกแบบลูปป้อนไปหน้าของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ปรับตั้งค่าโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 1 และวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 2 ในจุดการทำงานที่ต้องการ ซึ่งในที่นี้กำหนดให้มีทั้งหมด 5 ช่วงการทำงานดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 การปรับตั้งค่าโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 1 และชุดที่ 2

ช่วงการทำงานที่	ค่าโพลดวงจรแปลงผัน แบบบัคค์ชุดที่ 1	ค่าโพลดวงจรแปลงผัน แบบบัคค์ชุดที่ 2	ผลรวมของโพล กำลังไฟฟ้า
1	เปลี่ยนจาก 34.64 V (120 W) เป็น 42.43 V (180 W)	54.77 V (300W)	480 W
2	เปลี่ยนจาก 42.43 V (180 W) เป็น 45.83 V (210 W)	54.77 V (300W)	510 W
3	เปลี่ยนจาก 45.83 V (210 W) เป็น 48.99 V (240 W)	54.77 V (300W)	540 W
4	เปลี่ยนจาก 48.99 V (240 W) เป็น 51.96 V (270 W)	54.77 V (300W)	570 W
5	เปลี่ยนจาก 51.96 V (270 W) เป็น 54.77 V (300 W)	54.77 V (300W)	600 W (ค่าพิกัดที่ตั้งไว้)

ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์เสถียรภาพที่ค่าพิกัดที่ตั้งไว้ (600 W) โดยอาศัยเมตริกซ์จาโคเบียน $A(x_o, u_o)$ ของสมการที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (6-1) ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน ($K_{f,sl}$) ความถี่ตัดข้างล่าง ($\omega_{L,sl}$) และความถี่ตัดข้างบน ($\omega_{H,sl}$) ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพผ่านเงื่อนไข (penalty condition) ส่วนจริงของค่าเจาะจงจะทุกค่าต้องมีค่าน้อยกว่าศูนย์ มิเช่นนั้นแล้วจะไม่นำค่าอัตราขยายและความถี่ดังกล่าวมาพิจารณาในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 3 ทำการประเมินค่าสมรรถนะการควบคุมของ V_{o1} ทั้ง 5 ช่วงการทำงานในขั้นตอนที่ 1 โดยอาศัยค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน ความถี่ตัดข้างล่าง และความถี่ตัดข้างบนที่ผ่านเงื่อนไขการมีเสถียรภาพที่ค่าพิกัด ในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย ช่วงเวลาขึ้น (Rise time; T_r), ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time; T_s) และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Percent overshoot; $P.O.$) หรือสามารถเขียนสมการของค่าสมรรถนะให้อยู่ในรูป W แสดงดังสมการที่ (6-3) โดยค่าสมรรถนะที่ทำให้ผลการตอบสนองดีที่สุดจะต้องมีค่า T_r , T_s และ $P.O.$ น้อยที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ W มีค่าน้อยที่สุด

$$W = \alpha \left(\frac{T_{r,ATS}}{T_{r,CON}} \right) + \beta \left(\frac{T_{s,ATS}}{T_{s,CON}} \right) + \gamma \left(\frac{P.O._{ATS}}{P.O._{CON}} \right) \quad (6-3)$$

โดยที่ $T_{r,ATS}$ คือ ช่วงเวลาขึ้นของ V_{ol} โดย ATS (วินาที)

$T_{s,ATS}$ คือ ช่วงเวลาเข้าที่ของ V_{ol} โดย ATS (วินาที)

$P.O._{ATS}$ คือ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินของ V_{ol} โดย ATS (เปอร์เซ็นต์)

$T_{r,CON}$ คือ ช่วงเวลาขึ้นของ V_{ol} โดยวิธีแบบดั้งเดิม (วินาที)

$T_{s,CON}$ คือ ช่วงเวลาเข้าที่ของ V_{ol} โดยวิธีแบบดั้งเดิม (วินาที)

$P.O._{CON}$ คือ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินของ V_{ol} โดยวิธีแบบดั้งเดิม (เปอร์เซ็นต์)

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (6-4)$$

เมื่อ α , β และ γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสำคัญของค่า T_r , T_s และ $P.O.$ ตามลำดับ ซึ่งในการออกแบบจะให้ความสำคัญของค่า T_r , T_s และ $P.O.$ เท่าๆ กัน โดยนำค่าสมรรถนะจาก ATS ($T_{r,ATS}$, $T_{s,ATS}$, $P.O._{ATS}$) หาค่าด้วยค่าสมรรถนะจากวิธีแบบดั้งเดิม ($T_{r,CON}$, $T_{s,CON}$, $P.O._{CON}$) ดังสมการที่ (6-3) และกำหนดให้ค่า α , β และ γ มีค่าเท่ากับ 0.33, 0.33 และ 0.34 ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 4 นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (W) ส่งให้อัลกอริทึม ATS ทำการค้นหาค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน (K) ความถี่ตัดข้างล่าง (ω_L) และความถี่ตัดข้างบน (ω_H) จากนั้นส่งให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้สำหรับหาผลการตอบสนองของ V_{ol} ต่อไป กระบวนการค้นหาจะมีลักษณะการทำงานซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 100 รอบ เมื่อครบ 100 รอบ อัลกอริทึม ATS จะส่งค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน ความถี่ตัดข้างล่าง และความถี่ตัดข้างบนที่ทำให้สมรรถนะการควบคุมของ V_{ol} ลดลงน้อยที่สุดเป็นคำตอบของกระบวนการ

การออกแบบรูปไปนอนไปหน้าด้วยอัลกอริทึม ATS จำเป็นต้องมีการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบ ATS เพื่อให้การค้นหามีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบ ATS จะประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 ค่า คือ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง ค่ารัศมีการค้นหา และค่าอัตราปรับลดรัศมี ถ้าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความเหมาะสมจะส่งผลให้กระบวนการในการค้นหาด้วยอัลกอริทึม ATS มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของการทดสอบพารามิเตอร์ทั้ง 4 นั้นจะได้รับการนำเสนอไว้ที่ภาคผนวก ง ในตารางที่ ง.1 - ตารางที่ ง.4 เป็นต้น จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบ

ATS ในภาคผนวก ง ผู้วิจัยได้เลือกพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าว จากค่า W เล็กน้อยที่สุด แสดงดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 พารามิเตอร์ของ ATS

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
<i>Initial number neighbor</i>	20	จำนวนคำตอบเริ่มต้น
<i>Number neighbor</i>	30	จำนวนคำตอบรอบข้าง
<i>Radius</i>	50	ค่ารัศมีการค้นหาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของขอบเขต
<i>DF</i>	1.3	ค่าอัตราปรับลดรัศมี

ลำดับถัดไปจะเป็นการกำหนดขอบเขตการค้นหา ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการค้นหาด้วยอัลกอริทึม ATS ด้วยเช่น การกำหนดขอบเขตการค้นหาอัตราขยาย K_f จะพิจารณาจากผลการคำนวณค่าเฉลี่ยในรูปที่ 5.7 ของบทที่ 5 และในส่วนขอบเขตของความถี่ตัด ω_L และ ω_H จะกำหนดจากค่าแบนด์วิดท์การทำงานดังนี้ $\omega_L = 0.1\omega_r - 0.5\omega_r$ rad/s และ $\omega_H = 2\omega_r - 10\omega_r$ rad/s ตามลำดับ ซึ่งค่าเหล่านี้คำนวณได้จากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ดังนั้นจะได้ขอบเขตการค้นหาพารามิเตอร์ของลูกป้อนไปหน้าดังตารางที่ 6.3

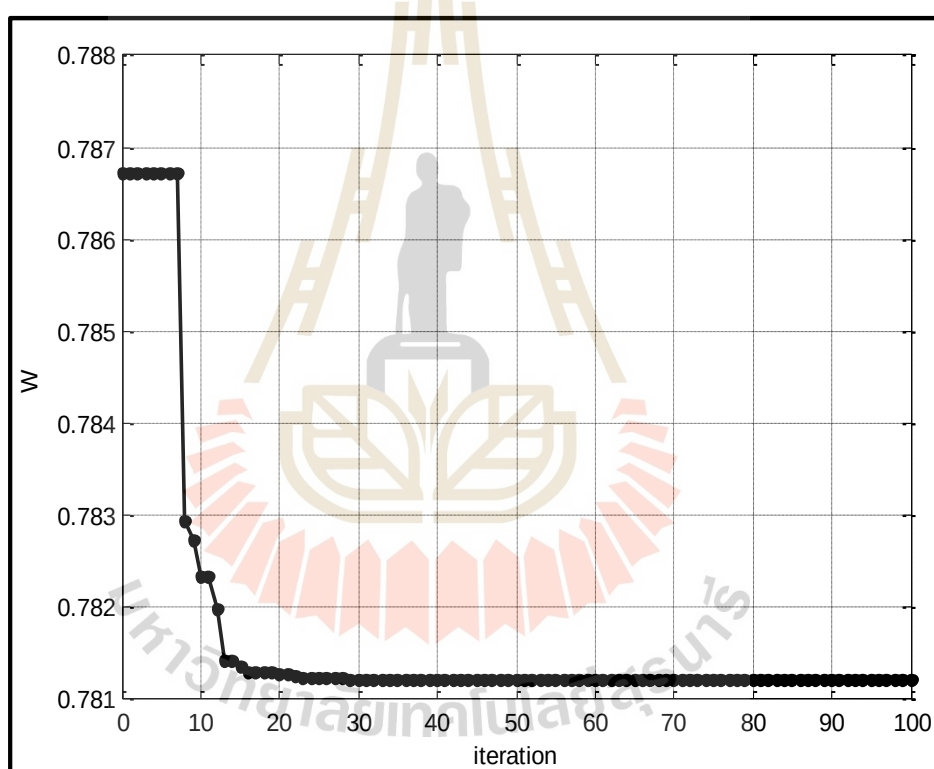
ตารางที่ 6.3 ขอบเขตการค้นหาพารามิเตอร์ของลูกป้อนไปหน้า

พารามิเตอร์ของลูกป้อนไปหน้า	ขอบเขตการค้นหา	
	ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
K_f	0.5	8.0
ω_L	18.257 rad/s	91.29 rad/s
ω_H	365.14 rad/s	1825.7 rad/s

เมื่อทราบถึงกระบวนการออกแบบลูกป้อนไปหน้าสำหรับค่าพารามิเตอร์ของการค้นหา และขอบเขตการค้นหาที่เหมาะสมแล้วนั้น ก็จะนำไปสู่การใช้อัลกอริทึม ATS ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของลูกป้อนไปหน้าที่ทำให้สมรรถนะการควบคุมของ V_{ol} ลดลงน้อยที่สุด ซึ่งผลการออกแบบค่าดังกล่าวรวมถึงผลการตรวจสอบเงื่อนไขการมีเสถียรภาพ จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 6.3.3 ต่อไป

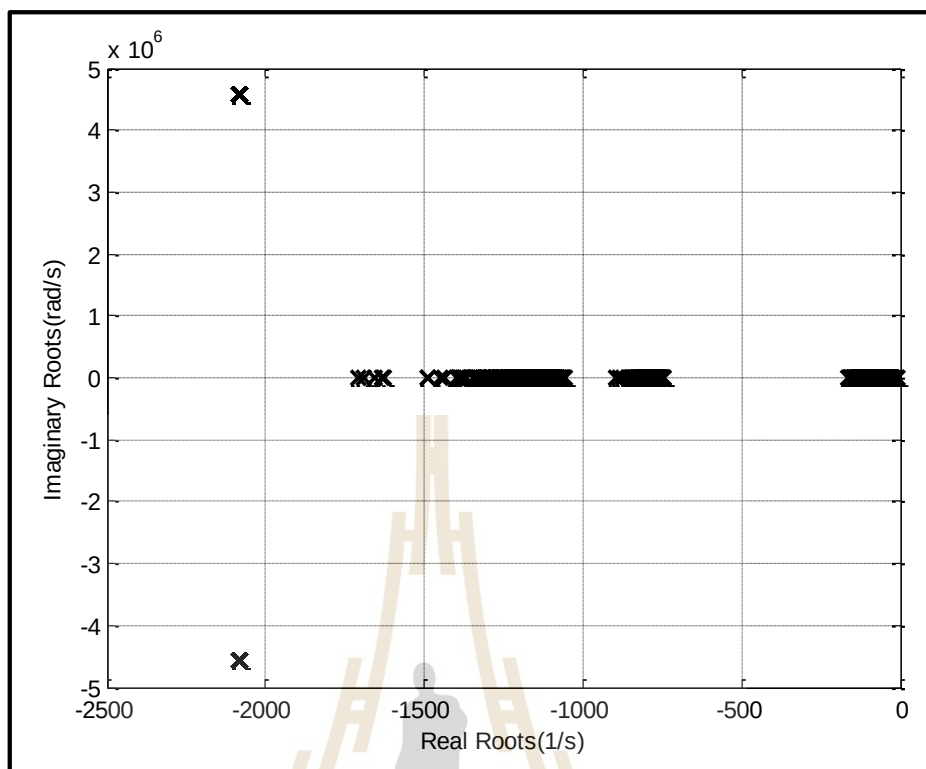
6.3.3 ผลการออกแบบรูปป้อนไปหน้า

จากการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอัลกอริทึม ATS ในหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้สามารถประยุกต์ใช้กระบวนการค้นหาด้วยอัลกอริทึม ATS ในการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 6.1 ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณาผลการลู่เข้าของค่า W รวมถึงการตรวจสอบเสถียรภาพระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงทั้งหมด 5 ครั้ง เพื่อนำมาใช้ในการหาค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ดีที่สุด อีกทั้งเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการออกแบบอีกด้วย สำหรับผลการออกแบบดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.8 ถึง รูปที่ 6.17



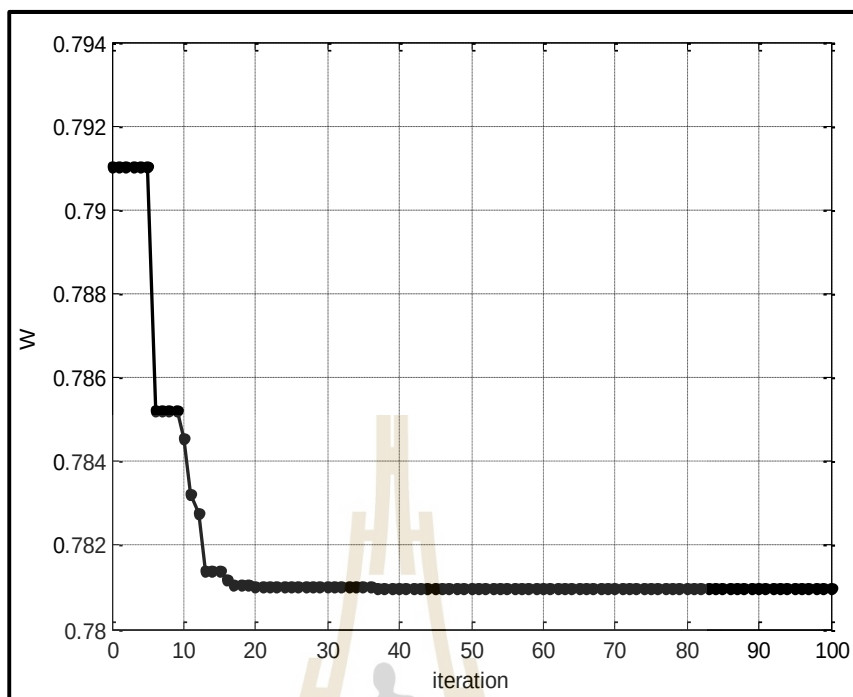
รูปที่ 6.8 การลู่เข้าหาค่าตอบ W ครั้งที่ 1

จากรูปที่ 6.8 แสดงการลู่เข้าของค่า W ในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 100 จะเห็นได้ว่าค่า W มีค่าลดลงในแต่ละรอบการค้นหา ซึ่งเป็นการบ่งบอกอย่างชัดเจนว่าสามารถค้นหา K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้ผลการตอบสนองของ V_{oi} ดีขึ้นได้ เมื่อค่า W มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.7812 ในช่วงรอบการค้นหาที่ 78 ถึง 100 ซึ่งทำให้สามารถค้นหาค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้ผลการตอบสนองของ V_{oi} มีสมรรถนะลดลงน้อยที่สุด แสดงดังตารางที่ 6.4

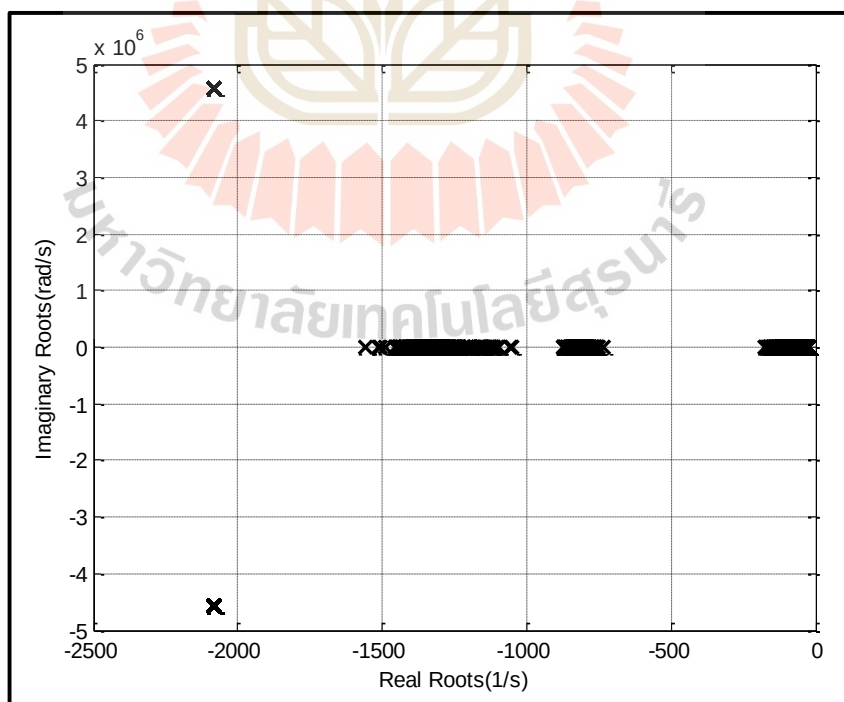


รูปที่ 6.9 ค่าเจาะจงในกระบวนการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H เมื่อ $P_{CPL,Total} = 600$ W ครั้งที่ 1

จากรูปที่ 6.9 แสดงการตรวจสอบเสถียรภาพในระหว่างการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H โดยทำการปรับตั้งค่าโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 1 และโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 54.77 V (300 W) และ 54.77 V (300 W) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าเจาะจงของระบบมีการกระจายตัวและซ้อนกันเป็นกลุ่ม ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ได้จากการสุ่มในแต่ละรอบการค้นหา อย่างไรก็ตามค่าเจาะจงทั้งหมดนี้มีส่วนจริงน้อยกว่าศูนย์ทุกค่า ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขการมีเสถียรภาพในหัวข้อที่ 6.3.2 ดังนั้นจึงถือได้ว่าค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ออกแบบได้ในแต่ละรอบการค้นหายังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ณ ค่าพิกัดที่ตั้งไว้

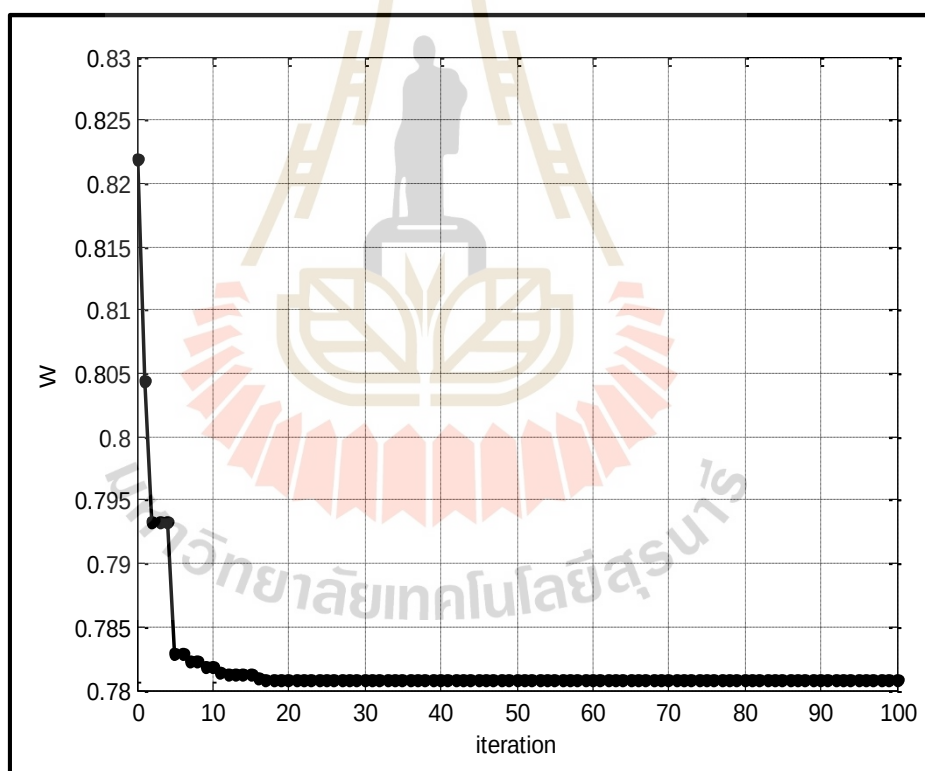


รูปที่ 6.10 การหาค่าตอบ W ครั้งที่ 2

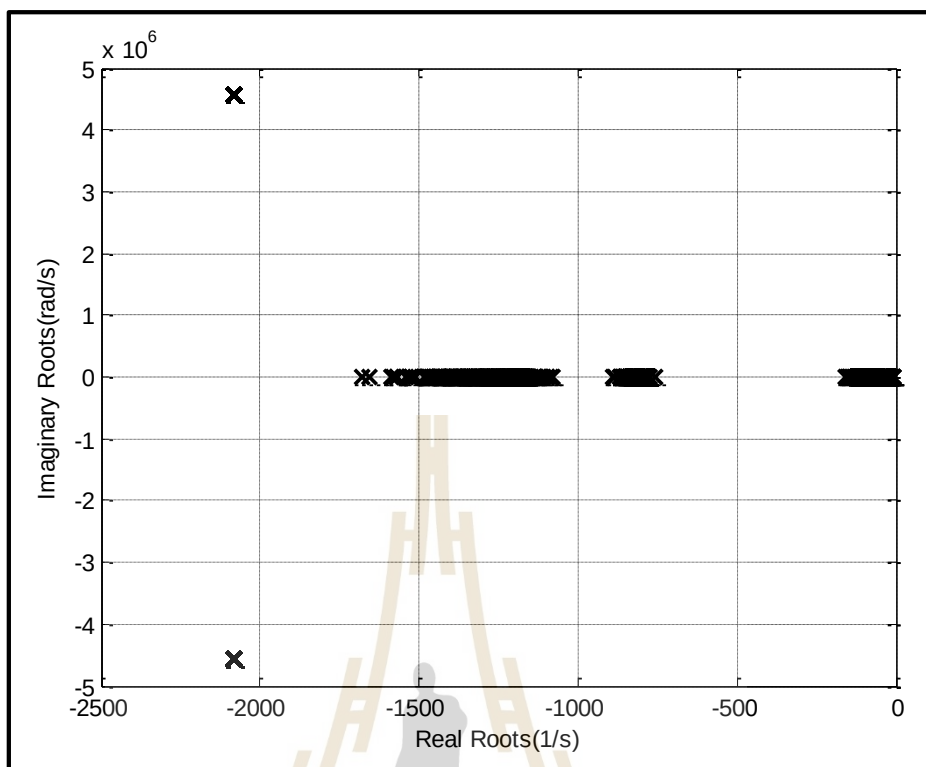


รูปที่ 6.11 ค่าเจาะจงในกระบวนการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H เมื่อ $P_{CPL,Total} = 600$ W ครั้งที่ 2

จากรูปที่ 6.10 แสดงการลู่เข้าของค่า W ในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 100 จะเห็นได้ว่าค่า W มีค่าลดลงในแต่ละรอบการค้นหา ซึ่งเป็นการบ่งบอกอย่างชัดเจนว่าสามารถค้นหา K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้ผลการตอบสนองของ V_{oi} ดีขึ้นได้ เมื่อค่า W ที่มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.7810 ในช่วงรอบการค้นหาที่ 82 ถึง 100 ซึ่งทำให้สามารถค้นหาค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้ผลการตอบสนองของ V_{oi} มีสมรรถนะลดลงน้อยที่สุด แสดงดังตารางที่ 6.4 และเมื่อพิจารณาผลการตรวจสอบเสถียรภาพขณะทำการออกแบบในรูปที่ 6.11 ที่ทำการปรับตั้งค่าผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้าทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 600 W (ค่าพิกัดที่ตั้งไว้) จะสังเกตได้ว่าค่าเจาะจงของระบบมีการกระจายตัวและซ้อนกันเป็นกลุ่มในลักษณะเดียวกันกับค่าเจาะจงในรูปที่ 6.9 รวมถึงมีส่วนจริงน้อยกว่าศูนย์ทุกค่าเช่นเดียวกัน จึงถือได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการออกแบบในแต่ละรอบการค้นหาทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

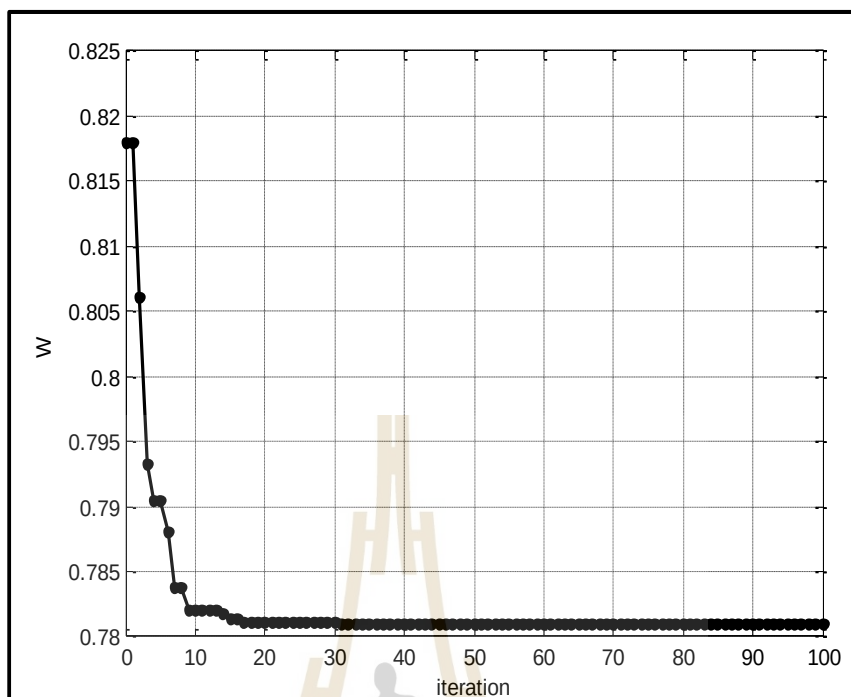


รูปที่ 6.12 การลู่เข้าหาค่าตอบ W ครั้งที่ 3

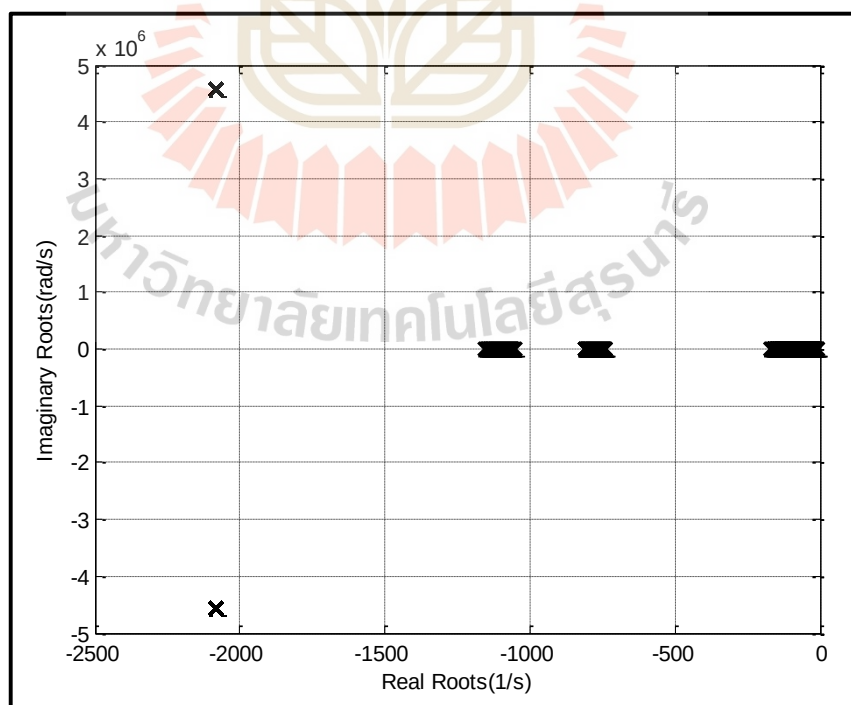


รูปที่ 6.13 ค่าเจาะจงในกระบวนการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H เมื่อ $P_{CPL,Total} = 600$ W ครั้งที่ 3

จากรูปที่ 6.12 แสดงการดูเข้าของค่า W ในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 100 จะเห็นได้ว่าค่า W มีค่าลดลงในแต่ละรอบการค้นหา ซึ่งเป็นการบ่งบอกอย่างชัดเจนว่าสามารถค้นหา K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้ผลตอบการสนองของ V_{ol} ดีขึ้นได้ เมื่อค่า W ที่มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.7808 ในช่วงรอบการค้นหาที่ 69 ถึง 100 ซึ่งทำให้สามารถค้นหาค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้ผลตอบสนองของ V_{ol} มีสมรรถนะลดลงน้อยที่สุด แสดงดังตารางที่ 6.4 จากนั้นพิจารณาผลการตรวจสอบเสถียรภาพขณะทำการออกแบบในรูปที่ 6.13 ที่ทำการปรับตั้งค่าผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้าทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 600 W (ค่าพิกัดที่ตั้งไว้) จะสังเกตได้ว่าค่าเจาะจงของระบบมีการกระจายตัวและซ้อนกันเป็นกลุ่มในลักษณะเดียวกันกับค่าเจาะจงในรูปที่ 6.9 และ 6.11 รวมถึงมีส่วนจริงน้อยกว่าศูนย์ทุกค่าเช่นเดียวกัน จึงถือได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการออกแบบในแต่ละรอบการค้นหาทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

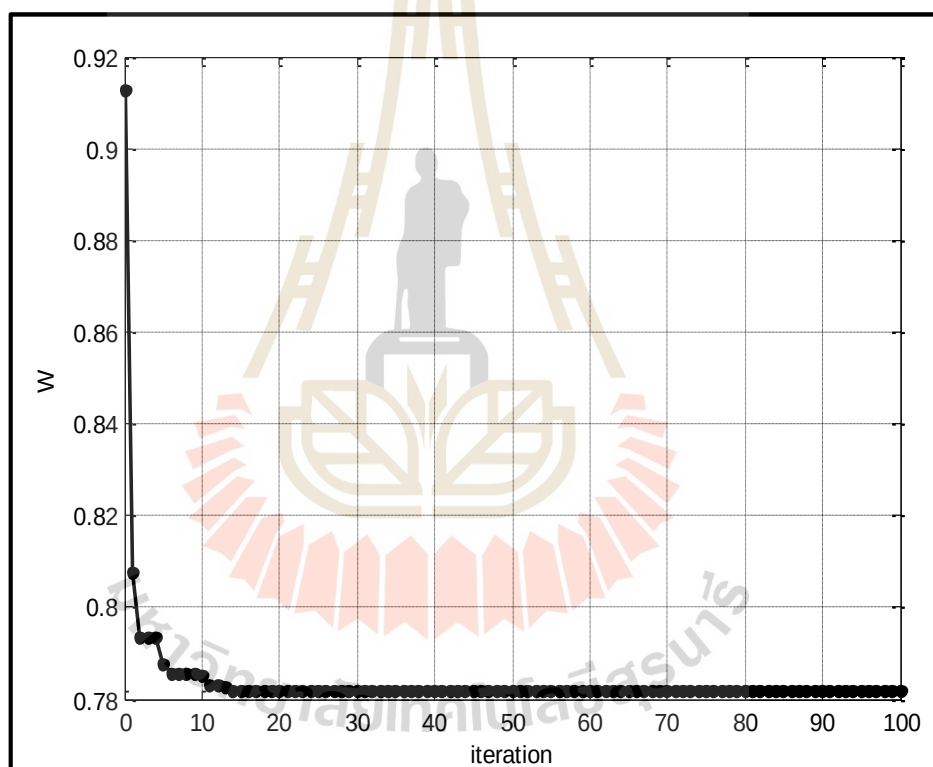


รูปที่ 6.14 การลู่เข้าหาคำตอบ W ครั้งที่ 4

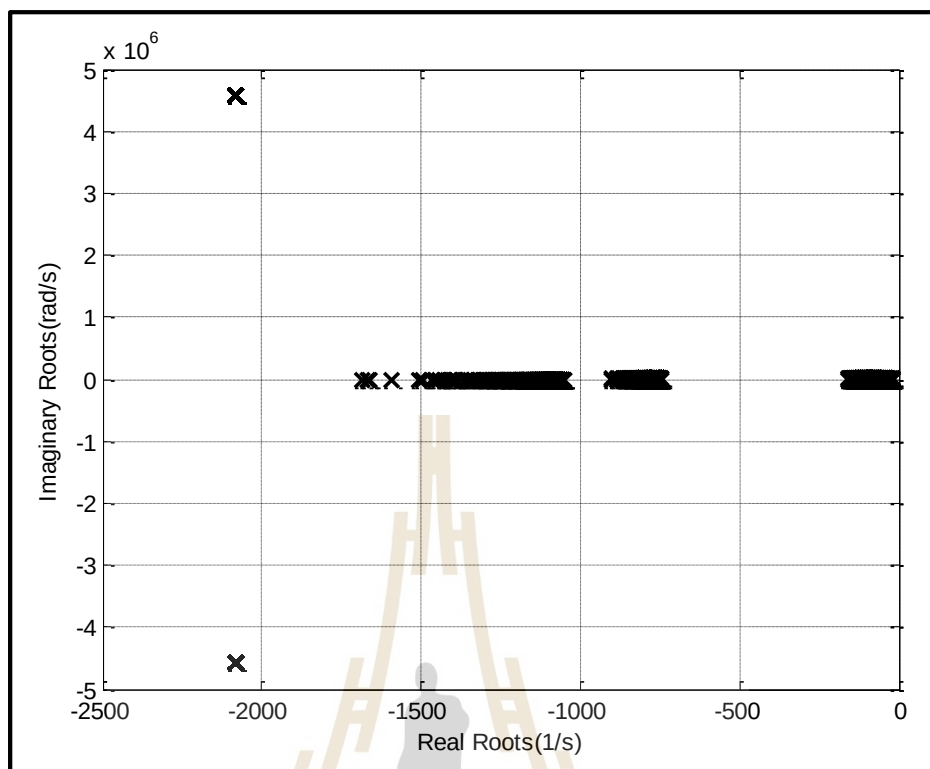


รูปที่ 6.15 ค่าเจาะจงในกระบวนการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H เมื่อ $P_{CPL,Total} = 600$ W ครั้งที่ 4

จากรูปที่ 6.14 แสดงการลู่เข้าของค่า W ในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 100 จะเห็นได้ว่าค่า W มีค่าลดลงในแต่ละรอบการค้นหา ซึ่งเป็นการบ่งบอกอย่างชัดเจนว่าสามารถค้นหา K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้ผลตอบการสนองของ V_{ol} ดีขึ้นได้ เมื่อค่า W ที่มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.7811 ในช่วงรอบการค้นหาที่ 82 ถึง 100 ซึ่งทำให้สามารถค้นหาค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้ผลตอบสนองของ V_{ol} มีสมรรถนะลดลงน้อยที่สุด แสดงดังตารางที่ 6.4 และเมื่อพิจารณาในรูปที่ 6.15 ผลการตรวจสอบเสถียรภาพขณะทำการออกแบบ ณ ค่าพิกัดที่ตั้งไว้ (600 W) พบว่าค่าเจาะจงของระบบมีการกระจายตัว การซ้อนกันเป็นกลุ่ม และมีส่วนจริงน้อยกว่าศูนย์ทุกค่าเหมือนกันกับค่าเจาะจงในรูปที่ 6.9, 6.11 และ 6.13



รูปที่ 6.16 การลู่เข้าหาค่าตอบ W ครั้งที่ 5



รูปที่ 6.17 ค่าเจาะจงในกระบวนการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H เมื่อ $P_{CPL,Total} = 600$ W ครั้งที่ 5

จากรูปที่ 6.16 แสดงการลู่เข้าของค่า w ในจำนวนรอบการค้นหาสูงสุดเท่ากับ 100 จะเห็นได้ว่าค่า w มีค่าลดลงในแต่ละรอบการค้นหา ซึ่งเป็นการบ่งบอกอย่างชัดเจนว่าสามารถค้นหา K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้ผลตอบการสนองของ V_{ol} ดีขึ้นได้ เมื่อค่า w ที่มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.7817 ในช่วงรอบการค้นหาที่ 51 ถึง 100 ซึ่งทำให้สามารถค้นหาค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้ผลตอบสนองของ V_{ol} มีสมรรถนะลดลงน้อยที่สุด แสดงดังตารางที่ 6.4 จากนั้นพิจารณาในรูปที่ 6.17 ผลการตรวจสอบเสถียรภาพขณะทำการออกแบบ ณ ค่าพิกัดที่ตั้งไว้ (600 W) พบว่าค่าเจาะจงของระบบมีการกระจายตัว การซ้อนกันเป็นกลุ่ม และมีส่วนจริงน้อยกว่าศูนย์ทุกค่า เหมือนกันกับค่าเจาะจงในรูปที่ 6.9, 6.11, 6.13 และ 6.15

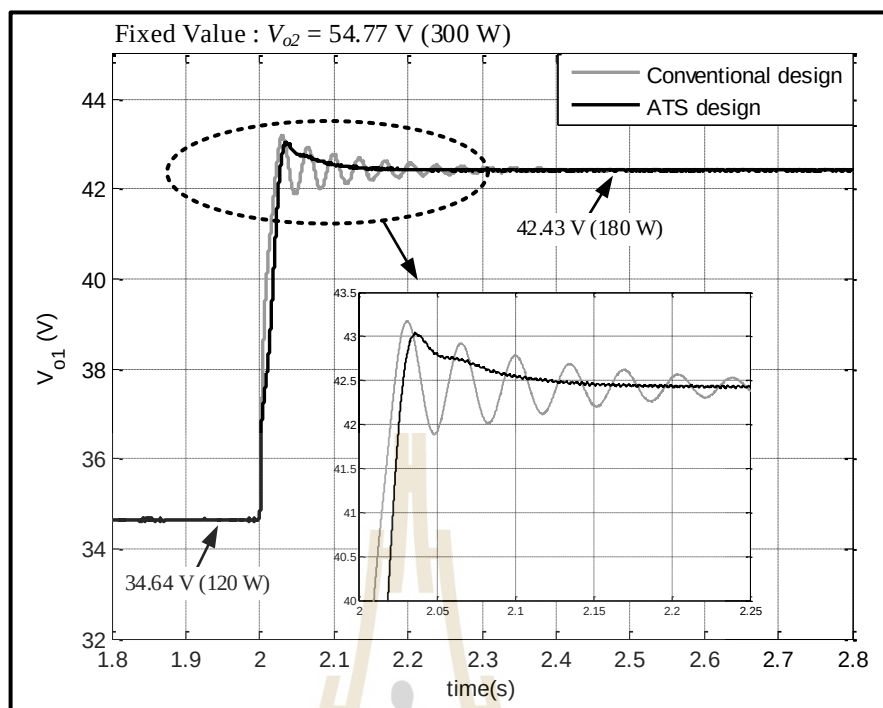
ตารางที่ 6.4 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ไปหน้าที่ได้จากการออกแบบด้วย ATS

ครั้งที่	ค่าที่ออกแบบ			ค่า W
	K_f	ω_L	ω_H	
1	3.0635	22.8221 rad/s	1109.4654 rad/s	0.7812
2	3.0773	22.8219 rad/s	1106.0002 rad/s	0.7810
3	3.0730	22.8218 rad/s	1101.8395 rad/s	0.7808
4	3.0539	22.8221 rad/s	1106.1592 rad/s	0.7811
5	3.0812	22.8222 rad/s	1121.9532 rad/s	0.7817

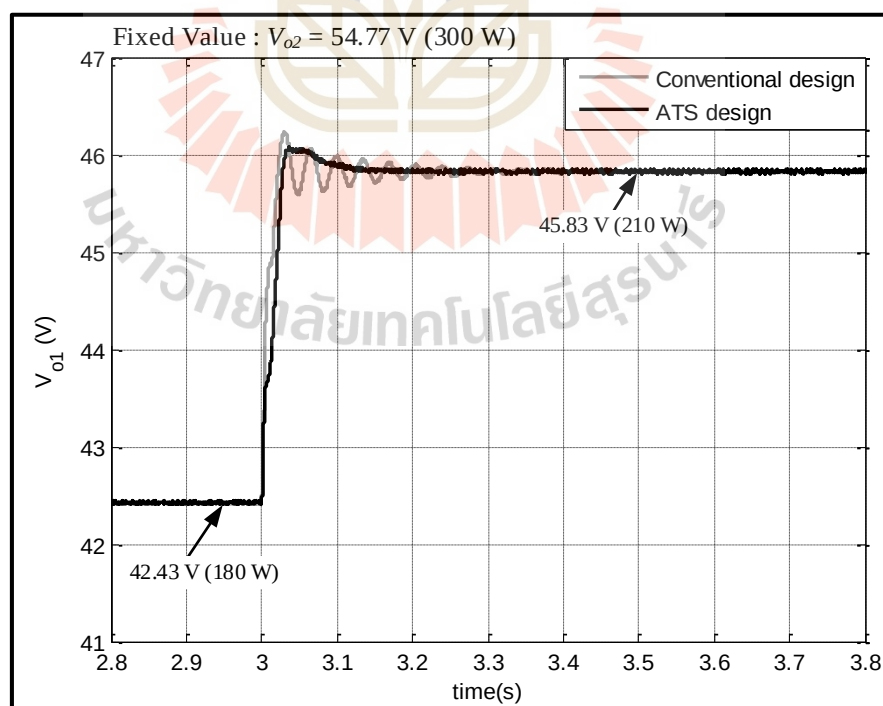
จากตารางที่ 6.4 แสดงผลการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้สมรรถนะการควบคุมของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่ 1 ลดลงน้อยที่สุดทั้ง 5 ช่วงการทำงาน ซึ่งจะเห็นว่าผลการออกแบบในครั้งที่ 3 ให้ค่า W มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ทำการเลือกใช้ค่า K_f , ω_L และ ω_H เท่ากับ 3.0730, 22.8218 rad/s และ 1101.8395 rad/s ตามลำดับ และเพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของผลการออกแบบค่าดังกล่าวด้วยอัลกอริทึมการค้นหา ATS จะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

6.3.4 การยืนยันผลการออกแบบของวิธี ATS ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

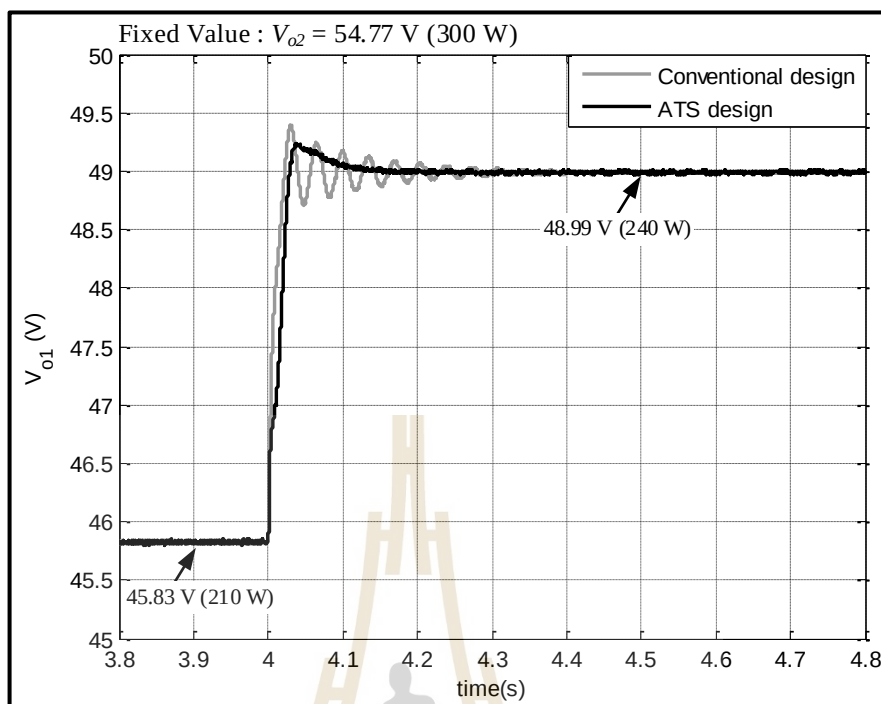
การตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักซ์ชุดที่ 1 เพื่อยืนยันประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของผลการออกแบบในงานวิทยานิพนธ์จะอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB มาใช้ในการจำลองสถานการณ์สำหรับเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ใช้ค่า K_f , ω_L และ ω_H จากอัลกอริทึมการค้นหา ATS กับวิธีการแบบดั้งเดิม ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.18 ถึง รูปที่ 6.22 นอกจากนี้ยังได้แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะของผลตอบสนองที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการในเชิงตัวเลขไว้ในตารางที่ 6.5 ถึง ตารางที่ 6.9 ในลำดับสุดท้ายจะเป็นการยืนยันเงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน โดยพิจารณาจากผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง (I_{dc}) และ แรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ดังแสดงในรูปที่ 6.23



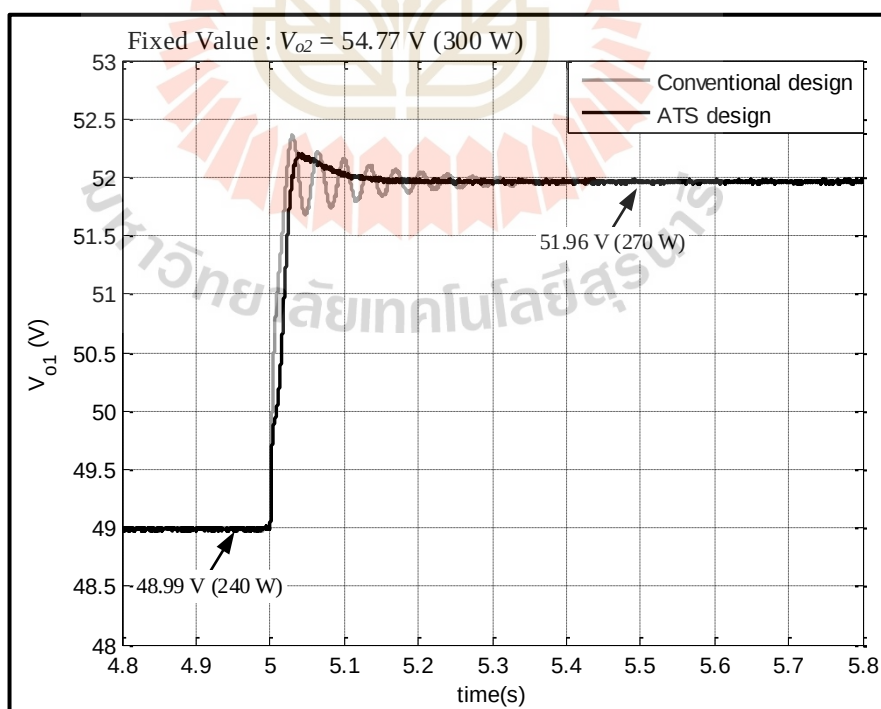
รูปที่ 6.18 ผลการจำลองสถานการณ์ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 34.64 V เป็น 42.43 V



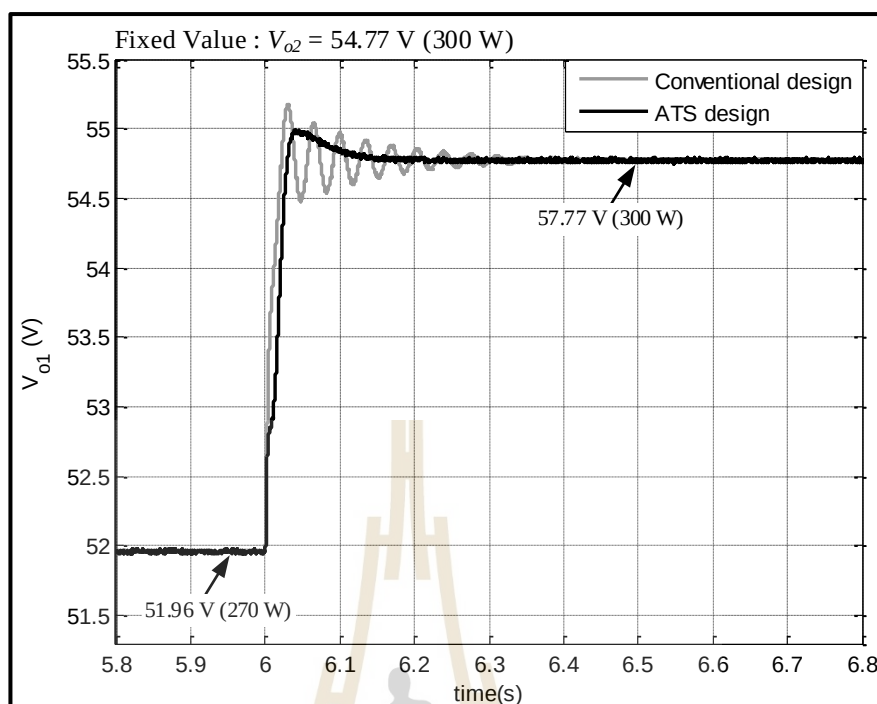
รูปที่ 6.19 ผลการจำลองสถานการณ์ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 42.43 V เป็น 45.83 V



รูปที่ 6.20 ผลการจำลองสถานการณ์ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 45.83 V เป็น 48.99 V



รูปที่ 6.21 ผลการจำลองสถานการณ์ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 48.99 V ไปเป็น 51.96 V



รูปที่ 6.22 ผลการจำลองสถานการณ์ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 51.96 V เป็น 54.77 V

ตารางที่ 6.5 ตารางการเปรียบเทียบสมรรถนะของ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 34.64 V เป็น 42.43 V

ผลการตอบสนอง	วิธีการออกแบบดูป้อนไปหน้า	
	วิธีการแบบดั้งเดิม	วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว
T_r	0.0182 s	0.0238 s
T_s	0.3455 s	0.1211 s
$P.O.$	2.0149 %	1.6462 %

ตารางที่ 6.6 ตารางการเปรียบเทียบสมรรถนะของ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 42.43 V เป็น 45.83 V

ผลการตอบสนอง	วิธีการออกแบบดูป้อนไปหน้า	
	วิธีการแบบดั้งเดิม	วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว
T_r	0.0183 s	0.0242 s
T_s	0.3468 s	0.1247 s
$P.O.$	0.8821 %	0.6300 %

ตารางที่ 6.7 ตารางการเปรียบเทียบสมรรถนะของ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 45.83 V เป็น 48.99 V

ผลการตอบสนอง	วิธีการออกแบบลูปป้อนไปหน้า	
	วิธีการแบบดั้งเดิม	วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว
T_r	0.0184 s	0.0246 s
T_s	0.3628 s	0.1278 s
$P.O.$	0.8245 %	0.5255 %

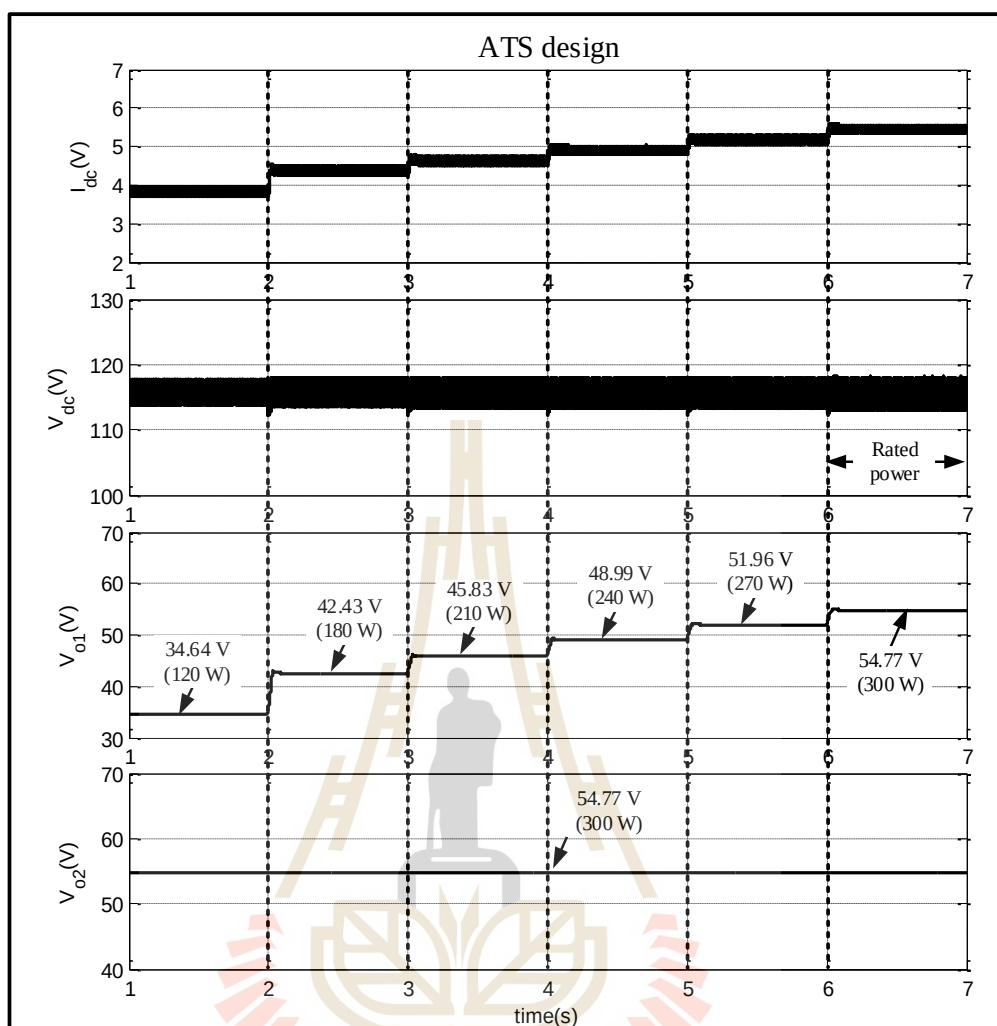
ตารางที่ 6.8 ตารางการเปรียบเทียบสมรรถนะของ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 48.99 V เป็น 51.96 V

ผลการตอบสนอง	วิธีการออกแบบลูปป้อนไปหน้า	
	วิธีการแบบดั้งเดิม	วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว
T_r	0.0186 s	0.0250 s
T_s	0.3652 s	0.1305 s
$P.O.$	0.7787 %	0.4524 %

ตารางที่ 6.9 ตารางการเปรียบเทียบสมรรถนะของ V_{o1} เมื่อ V_{o1}^* เปลี่ยนจาก 51.96 V เป็น 54.77 V

ผลการตอบสนอง	วิธีการออกแบบลูปป้อนไปหน้า	
	วิธีการแบบดั้งเดิม	วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว
T_r	0.0187 s	0.0254 s
T_s	0.3827 s	0.1328 s
$P.O.$	0.7413 %	0.4018 %

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.18 ถึง รูปที่ 6.22 และตารางที่ 6.5 ถึง ตารางที่ 6.9 แสดงให้เห็นว่าค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ได้รับการออกแบบผ่านอัลกอริทึมการค้นหา ATS นั้นให้ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{o1} มีการพุ่งเกินเพียงเล็กน้อยและสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ประสบปัญหาการแกว่งของรูปสัญญาณเมื่อเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการแบบดั้งเดิม ดังนั้นจึงถือได้ว่า อัลกอริทึมการค้นหา ATS สามารถทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{o1} ลดลงน้อยที่สุด



รูปที่ 6.23 ผลการจำลองสถานการณ์ I_{dc} , V_{dc} , V_{o1} และ V_{o2} ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี ATS

จากผลการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 6.23 แสดงให้เห็นว่าการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H จากอัลกอริทึมการค้นหา ATS นั้นสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน ซึ่งสังเกตได้จากผลการลู่เข้าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง (I_{dc}) และ แรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ที่จุดปฏิบัติงานต่าง ๆ

6.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 6 นี้ได้นำเสนอการออกแบบค่าอัตราขยาย K_f ความถี่ตัด ω_L และความถี่ตัด ω_H ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ลูปป้อนไปหน้าและวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ได้รับการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 ค่า คือ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง ค่ารัศมีการค้นหา และค่าอัตราปรับลดรัศมี รวมถึงการกำหนดขอบเขตการค้นหาที่เหมาะสม จึงส่งผลให้การค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลการดูเข้าของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวน 5 ครั้ง สำหรับนำมาใช้ในการพิจารณาหาค่าอัตราขยาย K_f ความถี่ตัด ω_L และความถี่ตัด ω_H ที่ดีที่สุด โดยผลการจำลองสถานการณ์ของการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งทั้ง 5 ช่วงการทำงาน แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าค่าอัตราขยาย K_f ความถี่ตัด ω_L และความถี่ตัด ω_H ที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวจะให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราขยาย K_f ความถี่ตัด ω_L และความถี่ตัด ω_H ที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม อีกทั้งยังสามารถทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีเสถียรภาพตลอดทั้ง 5 ช่วงการทำงานอีกด้วย ซึ่งการดำเนินงานในลักษณะนี้เป็นงานวิจัยต่อยอดจากงานวิจัยในอดีตและในปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยใด ๆ ที่นำวิธีการดังกล่าวมาพัฒนาใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งขนานกัน รวมถึงการห้วงแบบแอกทีฟทางด้านโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ดังนั้นจึงถือได้ว่าเป็นจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อย่างไรก็ตาม การยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการออกแบบที่ได้นำเสนอด้วยการจำลองสถานการณ์อาจไม่เพียงพอต่อความน่าเชื่อถือมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับการสร้างชุดทดสอบจะได้รับการนำเสนอในบทที่ 7 ต่อไป

บทที่ 7

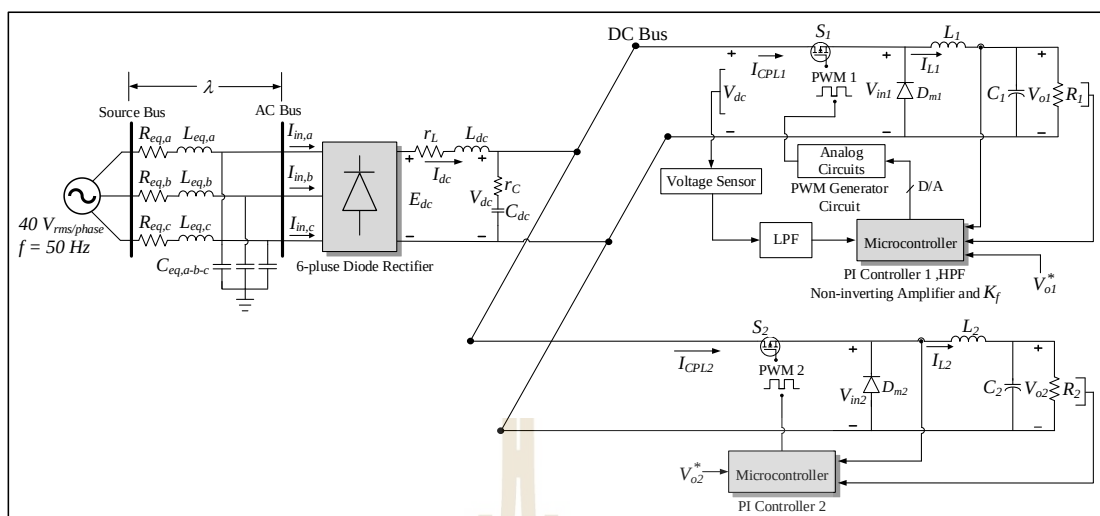
การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า ร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

7.1 บทนำ

การออกแบบลูปป้อนไปหน้าในบทที่ 6 ที่ผ่านมามีทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดลดลงน้อยที่สุด รวมถึงทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน แต่ถึงอย่างไรก็ตาม การยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการดังกล่าวด้วยการโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์อาจไม่เพียงพอต่อความน่าเชื่อถือมากนัก ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงนำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งจะประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูล วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรแปลงผันแบบบัลค์ที่มีการควบคุม ซึ่งภายในจะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA2560 เป็นตัวควบคุมการทำงาน และอุปกรณ์สุดท้ายคือ ชุดวงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าที่อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรทางแอนะล็อกและวงจรทางดิจิทัล สำหรับผลการทดสอบจะดำเนินการทั้งในส่วนของการวิเคราะห์เสถียรภาพ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ และการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัลค์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวและวิธีการแบบการดั้งเดิม การยืนยันผลการทดสอบในบทนี้จะอาศัยการพิจารณาระหว่างผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB กับผลจากชุดทดสอบจริง เพื่อแสดงให้เห็นว่า ผลตอบสนองทั้ง 2 มีความสอดคล้องกัน อีกทั้งยังทำให้เห็นว่า การนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพให้ประสิทธิผลที่ดีและมีความน่าเชื่อถือสูง

7.2 การสร้างชุดทดสอบ

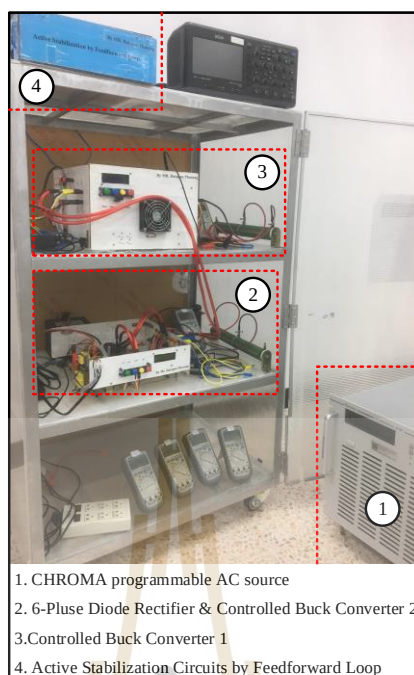
การบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสำหรับชุดทดสอบคือ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังรูปที่ 6.1 ในบทที่ 6 จากระบบดังกล่าว เมื่อนำมาเขียนแสดงใหม่เพื่อใช้ในการอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการสร้างชุดทดสอบจริง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับการสร้างชุดทดสอบ

จากรูปที่ 7.1 จะเห็นได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้รูปแบบไปหน้าสำหรับการสร้างชุดทดสอบ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ทางฝั่งแหล่งจ่ายและทางฝั่งโหลด โดยทางฝั่งแหล่งจ่ายจะประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุลต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ผ่านวงจรกรองสัญญาณดีซีเพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ทางฝั่งโหลด ในส่วนของทางฝั่งโหลดจะประกอบด้วย วงจรแปลงผันแบบบัลค์ขนานกันที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้มีค่าคงที่ ซึ่งโหลดดังกล่าวจะเชื่อมต่อกับวงจรรูปแบบไปหน้าผ่านการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมหรือวิธีการค้นหาแบบดาบเชิงปรับตัว ซึ่งมีกระบวนการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรทางดิจิทัลและวงจรทางแอนะล็อก โดยวงจรทางดิจิทัลจะมีหน้าที่ในการสร้างสัญญาณควบคุมผ่านกระบวนการของรูปแบบไปหน้าร่วมกับการควบคุมแบบฟีดไอบายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ซึ่งต้องอาศัยการอ่านค่าแรงดันบัสดีซีผ่านตัวกรองผ่านแถบที่ประกอบไปด้วย ตัวกรองผ่านต่ำซึ่งเป็นตัวกรองแอนะล็อก ตัวกรองผ่านสูง และวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสที่เป็นวงจรดิจิทัล จากนั้นส่งสัญญาณที่ได้ไปยังวงจรทางแอนะล็อกเพื่อสร้างสัญญาณ PWM ในการจุดชนวนเกตให้อุปกรณ์สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัลค์ชุดที่ 1

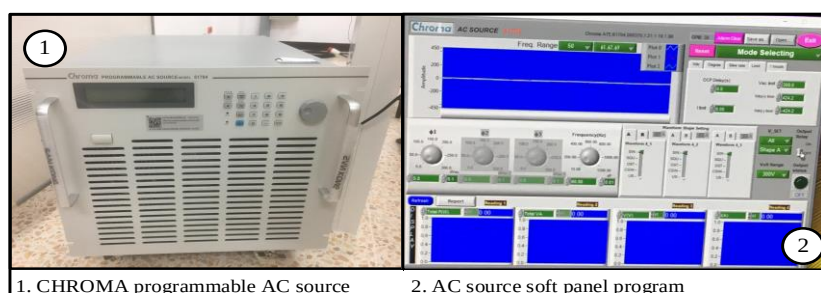
สำหรับผลการดำเนินการสร้างชุดทดสอบของระบบในรูปที่ 7.1 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.2 จากรูปการดำเนินการสร้างชุดทดสอบดังกล่าวจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักทั้งหมด 4 ชุดคือ ชุด CHROMA programmable AC source วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ชุดวงจรแปลงผันแบบบัลค์ที่มีการควบคุมแบบฟีดไอบาย และชุดวงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยรูปแบบไปหน้า ซึ่งจะได้รับคำแนะนำในหัวข้อที่ 7.2.1 - 7.2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 7.2 ชุดทดสอบสำหรับระบบที่พิจารณการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า

7.2.1 ชุด CHROMA programmable AC source

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูล สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้ชุด CHROMA programmable AC source จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วย ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากบริษัท CHROMA รุ่น 61704 และ โปรแกรม AC Source Soft Panel ดังแสดงในรูปที่ 7.3 โดยชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้างี้จะสามารถโปรแกรมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูลให้มีค่าคงที่ผ่านโปรแกรม AC Source Soft Panel ที่ติดตั้งภายในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะช่วยลดปัญหาอันเนื่องมาจากค่าแรงดันไฟฟ้าตกเมื่อโหลดของระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 7.3 ชุด CHROMA programmable AC source

7.2.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

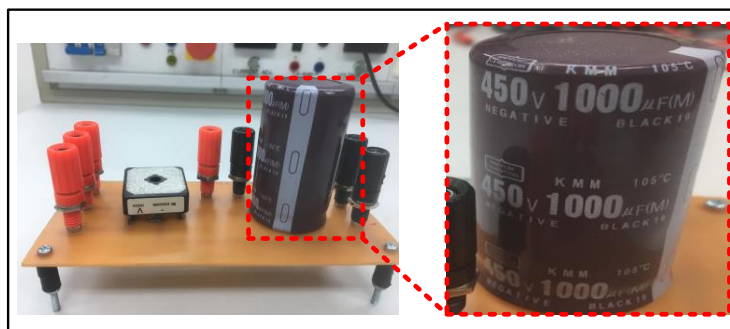
วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 7.4 จะประกอบด้วย 3 อุปกรณ์หลัก ๆ ได้แก่ ตัวเก็บประจุสำหรับกรองแรงดันบัลลิสต์ ตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรองกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส และมอดูลไดโอดสำเร็จรูปรุ่น VS-36MT160 ที่ใช้ไดโอดจำนวน 6 ตัว ซึ่งรายละเอียดแต่ละอุปกรณ์สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 7.4 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

ตัวเก็บประจุสำหรับกรองแรงดันบัลลิสต์

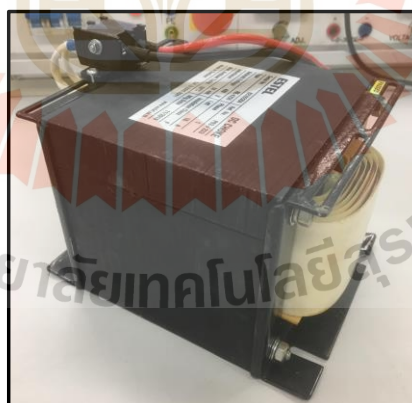
สำหรับชุดทดสอบนี้ใช้ตัวเก็บประจุของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่ผลิตโดยบริษัท NIPPON มีขนาดเท่ากับ $1000\ \mu\text{F}$ พิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ $450\ \text{V}$ ซึ่งตัวเก็บประจุดังกล่าวจะถูกนำไประบุเอกลักษณ์เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรองจะส่งผลต่อเสถียรภาพอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก (เทพพนม โสภะเพิ่ม, 2554) สำหรับตัวเก็บประจุของวงจรกรองที่ใช้งานจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 ตัวเก็บประจุสำหรับกรองแรงดันบัลลิสต์

ตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรองกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส

ในส่วนตัวเหนี่ยวนำของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์จะใช้นาฬิกาเท่ากับ 50 mH ผลิตโดยบริษัท ESTEL มีพิกัดทนกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10 A ซึ่งตัวเหนี่ยวนำดังกล่าวจะถูกนำไปประกอบเข้ากับเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองจะส่งผลต่อเสถียรภาพอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก (เทพพนม โสภะเพิ่ม, 2554) สำหรับตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองที่ใช้งานจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.6 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรองกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส

มอดูลไดโอดรุ่น VS-36MT160 ที่มีไดโอด 6 ตัว สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟส

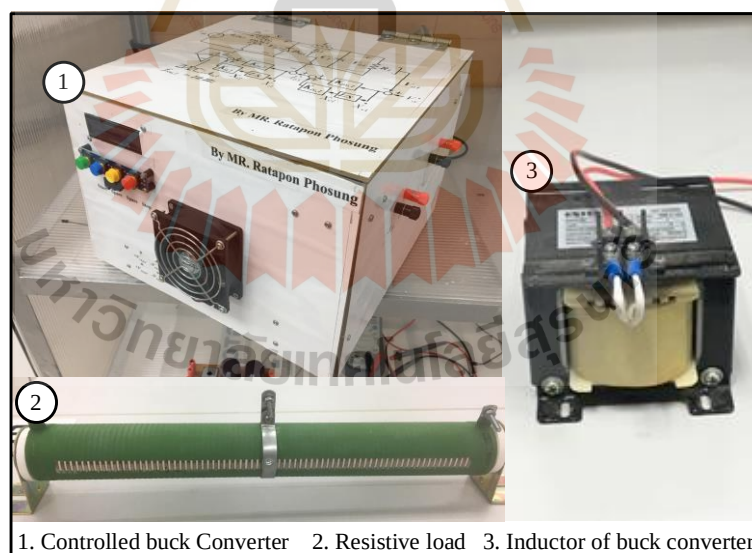
อุปกรณ์สวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้ไดโอดจำนวน 6 ตัว ซึ่งเป็นมอดูลสำเร็จรูปรุ่น VS-36MT160 ของบริษัท Vishay มีพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 35 A และพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1600 V ดังแสดงได้ในรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 มอดูลไดโอด 3 เฟส รุ่น VS-36MT160

7.2.3 ชุดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแบบพีไอ

โหลดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นชุดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมพีไอ ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวจะได้รับการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ตามที่ได้กล่าวไว้อย่างละเอียดในหัวข้อที่ 4.2.3 ของบทที่ 4 โดยภาพรวมของชุดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมพีไอ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.8



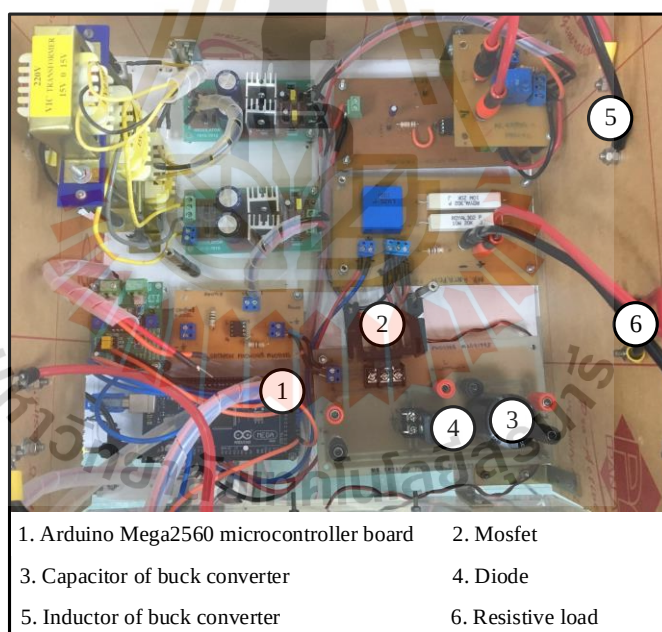
รูปที่ 7.8 ชุดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแบบพีไอ

รูปที่ 7.8 แสดงภาพรวมของชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ตกคร่อมตัวต้านทาน โดย

ชุดทดสอบดังกล่าวจะใช้ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคซ์ขนาด 15 mH มีพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10 A และโหลดตัวต้านทานปรับค่าได้ 0-20 Ω พิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 500 W สำหรับในส่วนของกล่องวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคซ์ที่มีการควบคุมนั้นจะประกอบไปด้วย 4 ส่วนที่สำคัญคือ วงจรแปลงผันแบบบัคซ์ วงจรรักษาระดับแรงดัน วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า และวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดของแต่ละวงจรสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

วงจรแปลงผันแบบบัคซ์

วงจรแปลงผันแบบบัคซ์ ดังแสดงในรูปที่ 7.9 จะประกอบไปด้วย บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น Arduino Mega2560 สวิตช์มอสเฟต (MOSFET) เบอร์ IRFP460 พิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 500 V พิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 A ตัวเก็บประจุขนาด 1000 μF พิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 250 V ไดโอดกำลัง MUR 160 พิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 600 V ตัวเหนี่ยวนำ และโหลดตัวต้านทาน สำหรับรายละเอียดการออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัคซ์สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก (เทพพนม โสภณเพิ่ม, 2554)

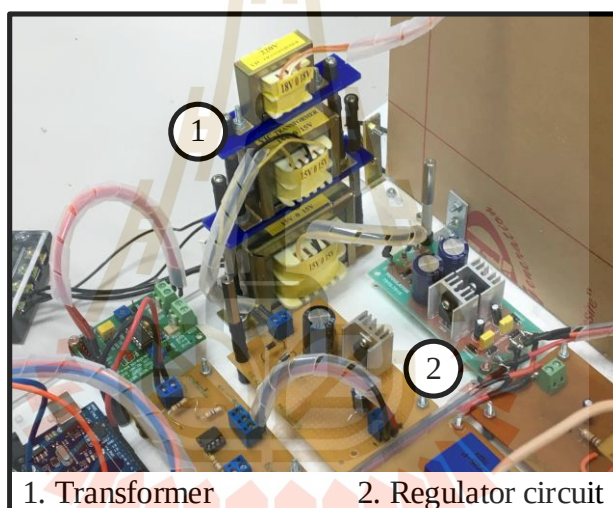


รูปที่ 7.9 วงจรแปลงผันแบบบัคซ์

วงจรรักษาระดับแรงดัน

วงจรรักษาระดับแรงดันที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้ากับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ โดยหม้อแปลง

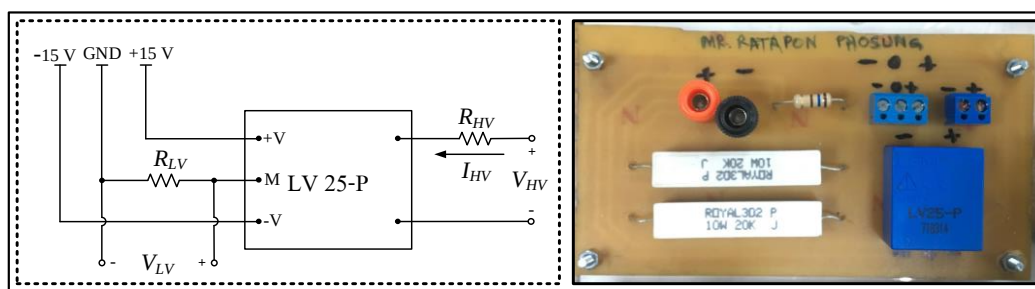
แรงดันไฟฟ้าจะทำหน้าที่ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส จาก 220 V ไปเป็น 15 V หรือ 18 V เพื่อใช้เป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุตให้กับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าอินพุตดังกล่าวจะถูกแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ พร้อมทั้งได้มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าคงที่เท่ากับ +15 V, 0 V และ -15 V ผ่าน IC เบอร์ 7815 และ IC เบอร์ 7915 เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ซึ่งในที่นี้คือ วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า วงจรขั้วเบทหรือวงจรแยกโคดสัญญาณ วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า และวงจรทางด้านแอนะล็อกของอุปกรณ์ไปหน้า ซึ่งรายละเอียดของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ จะได้นำเสนอในลำดับต่อไป สำหรับวงจรรักษาระดับแรงดันที่ใช้จริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.10 วงจรรักษาระดับแรงดัน

วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

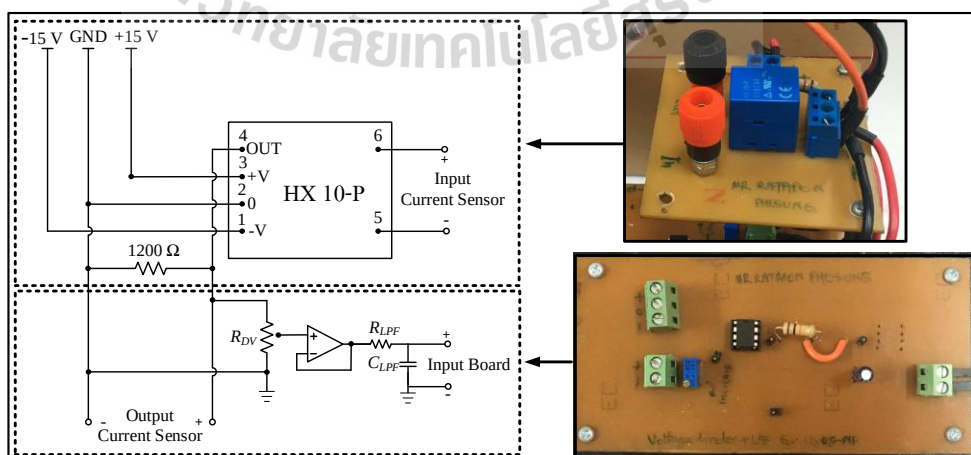
วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคค์จะใช้เซนเซอร์แรงดันเบอร์ LV 25-P พิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูงเท่ากับ 500 V พิกัดกระแสไฟฟ้าด้านแรงสูง (I_{HV}) เท่ากับ 10 mA ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะออกแบบแรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูง (V_{HV}) ไว้ที่ 400 V ดังนั้น จะได้ค่าความต้านทานด้านแรงสูง (R_{HV}) มีค่าเท่ากับ 40 k Ω ในส่วนเอาต์พุตของวงจร (V_{LV}) ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าการปรับจูนค่าความต้านทานด้านแรงต่ำ (R_{LV}) เพื่อให้เหมาะสำหรับการนำไปใช้ประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป โดยค่าความต้านทานที่เลือกใช้คือ 160 Ω สำหรับภาพรวมการต่อวงจรและวงจรที่ใช้งานจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.11



รูปที่ 7.11 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

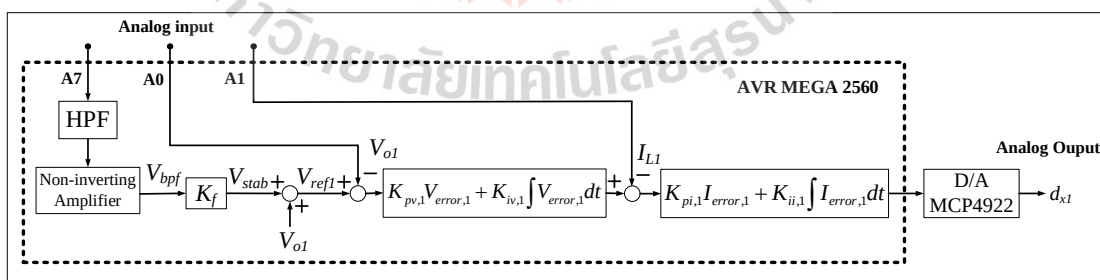
วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้เซนเซอร์เบอร์ HX 10-P พิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 30 A ซึ่งจะทำหน้าที่วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จากนั้นเอาต์พุตของวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าจะนำไปเข้าวงจรแบ่งแรงดัน วงจรตามแรงดัน และตัวกรองแบบผ่านต่ำ วงจรแบ่งแรงดันในที่นี้จะใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ (R_{DV}) มีค่าเท่ากับ 5 k Ω เพื่อปรับระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในย่านที่เหมาะสมต่อการใช้งาน สำหรับวงจรตามแรงดันจะช่วยป้องกันการลดทอนของสัญญาณที่เชื่อมต่อเข้าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ยังมีตัวกรองแบบผ่านต่ำที่ช่วยกรองสัญญาณรบกวน ซึ่งได้ออกแบบให้มีความถี่ตัดเท่ากับ 31.42 rad/s ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวต้านทาน (R_{LPF}) เท่ากับ 10 k Ω และตัวเก็บประจุ (C_{LPF}) เท่ากับ 3.3 μ F สำหรับภาพรวมการต่อวงจรและวงจรที่ใช้งานจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.12



รูปที่ 7.12 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

7.2.4 ชุดวงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยลูปย้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

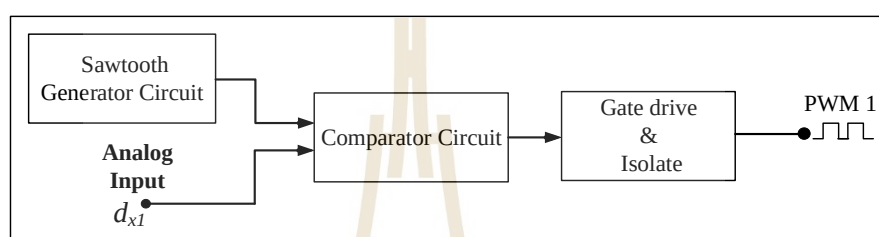
ชุดวงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยลูปย้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรทางดิจิทัลและวงจรทางแอนะล็อก ดังที่กล่าวไว้แล้วเบื้องต้นในหัวข้อที่ 7.1 ทั้งนี้การนำทั้ง 2 วงจรมาใช้ร่วมกันเนื่องด้วยการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปย้อนไปหน้านั้นจะมีตัวกรองผ่านแถบเป็นส่วนใหญ่ประกอบหลัก ซึ่งจะมีกระบวนการหาอนุพันธ์ของสัญญาณภายในตัวกรองดังกล่าวที่อาศัยความรวดเร็วในการคำนวณสูง อีกทั้งลูปย้อนไปหน้ายังทำงานควบคู่ไปกับตัวควบคุมพีไอ 2 ลูปต่อกันแบบคาสเคดที่มีกระบวนการของการหาปริพันธ์ของสัญญาณอีกด้วย โดยถ้าพิจารณาการประมวลผลภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR หรือวงจรทางดิจิทัลอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการนำวงจรทางแอนะล็อกมาใช้ร่วมกับวงจรทางดิจิทัล โดยวงจรทางดิจิทัลจะมีหน้าที่ในการคำนวณหาสัญญาณควบคุม (d_{x1}) ผ่านกระบวนการทำงานร่วมกันระหว่างลูปย้อนไปหน้าและการควบคุมแบบพีไอ ภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR โดยอาศัยการอ่านค่าแรงดันบัสดิซี (V_{dc}) ด้วยวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าผ่านตัวกรองผ่านแถบที่ประกอบไปด้วย ตัวกรองผ่านต่ำซึ่งเป็นตัวกรองแอนะล็อก ตัวกรองผ่านสูง และวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสที่เป็นวงจรแบบดิจิทัล จากนั้นส่งสัญญาณที่ได้ไปยังวงจรทางแอนะล็อก โดยโครงสร้างทางดิจิทัลสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA2560 ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณภายในบอร์ดแสดงดังรูปที่ 7.13



รูปที่ 7.13 แผนภาพการคำนวณหาสัญญาณควบคุม d_{x1} ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

จากรูปที่ 7.13 จะเห็นว่า วงจรทางดิจิทัลจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA 2560 และวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็น

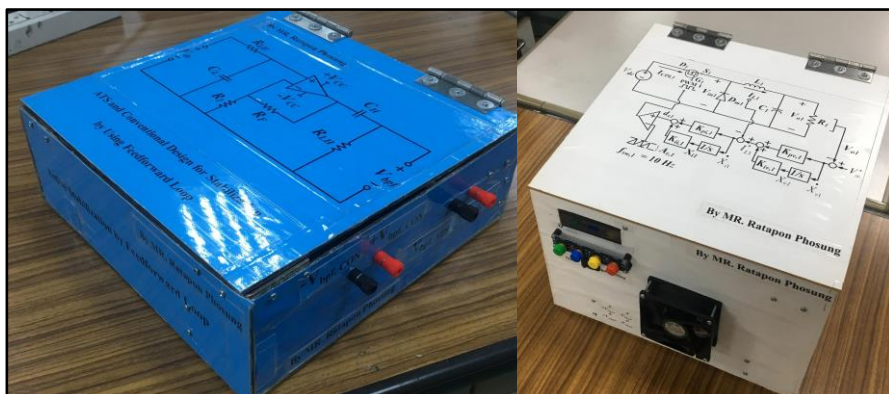
สัญญาณแอนะล็อกโดยใช้ไอซีเบอร์ MCP4922 ซึ่งบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ในการรับแรงดันที่ผ่านตัวกรองผ่านต่ำ (A_7) แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (A_0) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (A_1) เพื่อนำมาใช้ในการโปรแกรมการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าผ่านตัวควบคุมพีไอ ซึ่งรายละเอียดการโปรแกรมดังกล่าว สามารถดูได้จากภาคผนวก จ. หลังจากนั้นส่งสัญญาณเอาต์พุตของกระบวนดังกล่าว (d_{x1}) ไปยังวงจรทางแอนะล็อก ดังแสดงในรูปที่ 7.14 โดยอาศัยการแปลงสัญญาณดิจิทัลไปเป็นสัญญาณแอนะล็อกผ่านไอซีเบอร์ MCP4922



รูปที่ 7.14 แผนภาพการต่อวงจรทางด้านแอนะล็อก

จากรูปที่ 7.14 จะเห็นได้ว่าวงจรทางด้านแอนะล็อกของลูปป้อนไปหน้าจะประกอบไปด้วย 3 วงจรคือ วงจรที่ 1 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย ทำหน้าที่สร้างสัญญาณฟันเลื่อย วงจรที่ 2 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ ทำหน้าที่ในการเปรียบเทียบสัญญาณฟันเลื่อยกับสัญญาณควบคุมแอนะล็อก (d_{x1}) เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM และวงจรที่ 3 วงจรขับเกทหรือวงจรแยกโดดสัญญาณ ทำหน้าที่สร้างสัญญาณจุดชนวนเกิดให้อุปกรณ์สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ซูดที่ 1 ในขณะเดียวกันยังทำหน้าที่ในการแยกกราวด์ระหว่างฝั่งวงจรกำลังและฝั่งวงจรอิเล็กทรอนิกส์แรงต่ำอีกด้วย สำหรับรายละเอียดของทั้ง 3 วงจรจะได้รับการนำเสนอในลำดับถัดไป

จากแผนภาพแสดงการเชื่อมต่อระหว่างวงจรทางด้านดิจิทัลกับวงจรทางด้านแอนะล็อกที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น สามารถดำเนินการสร้างชุดวงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวได้ดังรูปที่ 7.15

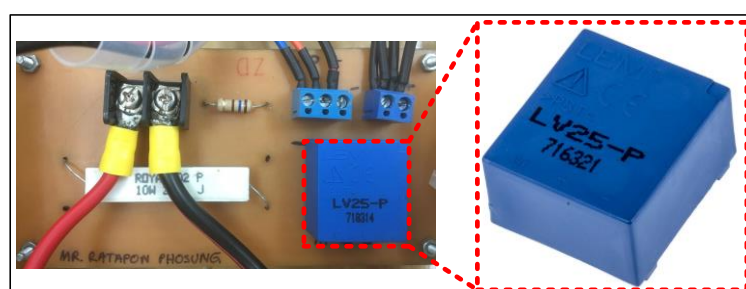


รูปที่ 7.15 ชุดวงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับ
วิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว

จากรูปที่ 7.15 พบว่าชุดวงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวจะประกอบไปด้วย วงจรตรวจจับแรงดันบัลด์ซี่ ตัวกรองผ่านแถบชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น Mega2560 บอร์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกรุ่น ET-MINI MCP4922 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ และวงจรจับเกทหรือวงจรแยกโคตสัญญาณ ซึ่งรายละเอียดแต่ละอุปกรณ์สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

วงจรตรวจจับแรงดันบัลด์ซี่

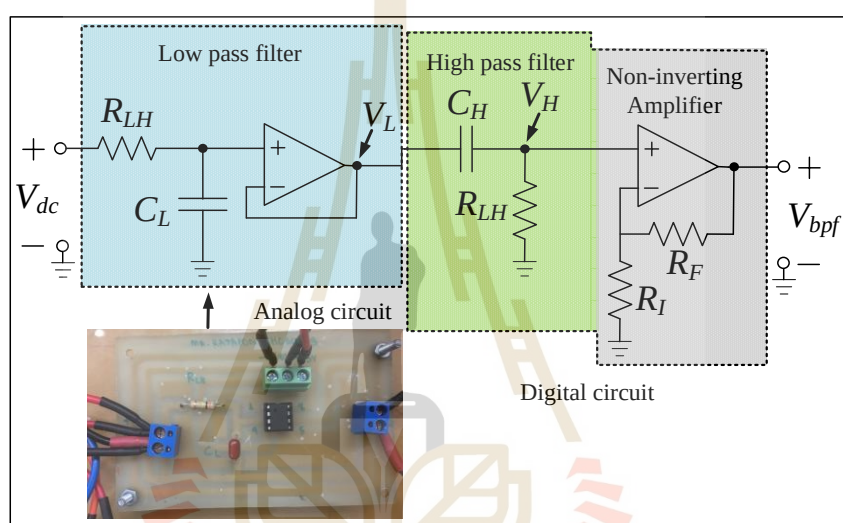
วงจรตรวจจับแรงดันบัลด์ซี่ของลูปป้อนไปหน้าจะใช้เซนเซอร์แรงดันเบอร์ LV25-P พิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 500 V ทำหน้าที่ในการตรวจจับแรงดันบัลด์ซี่ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองเพื่อส่งค่าที่ได้ไปยังตัวกรองผ่านแถบ โดยวงจรตรวจจับแรงดันบัลด์ซี่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.16



รูปที่ 7.16 วงจรตรวจจับแรงดันบัลด์ซี่

ตัวกรองผ่านแถบ

ตัวกรองผ่านแถบของรูปป้อนไปหน้า ทำหน้าที่ในการกรองความถี่ของสัญญาณ แรงดันปัสดีซีรอบ ๆ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองสัญญาณดีซี จากนั้นจะนำสัญญาณที่ได้ไป ผ่านกระบวนการของรูปป้อนไปหน้าร่วมกับการควบคุมแบบพีไอต่อไป โดยในหัวข้อนี้จะแสดง ขั้นตอนการออกแบบตัวกรองผ่านแถบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมเท่านั้น เนื่องจากขั้นตอนการออกแบบ ตัวกรองผ่านแถบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวจะดำเนินการในลักษณะเดียวกัน สำหรับ แผนภาพการต่อวงจรและวงจรที่ใช้จริงของตัวกรองผ่านแถบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.17



รูปที่ 7.17 ตัวกรองผ่านแถบ

จากรูปที่ 7.17 จะเห็นได้ว่า ตัวกรองผ่านแถบประกอบไปด้วย ตัวกรองผ่านต่ำที่เป็นวงจรแอนะล็อก ตัวกรองผ่านสูง และวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสซึ่งเป็นวงจรดิจิทัล ทั้งนี้การนำวงจรทั้ง 2 รูปแบบมาใช้ร่วมกันเนื่องด้วยปริมาณแรงดันปัสดีซีที่ผ่านวงจรตรวจจับแรงดันจะถูกลดทอนลงให้อยู่ในช่วง 0-5V จากนั้นเมื่อนำสัญญาณดังกล่าวมาผ่านกระบวนการหาอนุพันธ์ภายในตัวกรองผ่านแถบ จะพบว่าปริมาณแรงดันเอาต์พุต (V_{bpf}) ที่ส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR มีค่าไม่เพียงพอสำหรับการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการนำวงจรดิจิทัลมาใช้ร่วมกับวงจรแอนะล็อก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในส่วน โครงสร้างของตัวกรองดังกล่าว จะพบว่ามีองค์ประกอบของไอซีเบอร์ TL071 ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุที่อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน แสดงดังสมการที่ (7-1)

$$\frac{V_{bpf}}{V_{dc}} = \left(\frac{1}{1 + sR_{LH}C_L} \right) \left(\frac{sR_{LH}C_H}{1 + sR_{LH}C_H} \right) \left(\frac{R_I + R_F}{R_I} \right) \quad (7-1)$$

โดยที่ $\omega_L = \frac{1}{R_{LH}C_H}$ คือ ค่าความถี่ตัดข้างล่าง

$\omega_H = \frac{1}{R_{LH}C_L}$ คือ ค่าความถี่ตัดข้างบน

$\omega_0 = \sqrt{\omega_L \omega_H}$ คือ ค่าความถี่ศูนย์กลาง

$B = \omega_H - \omega_L$ คือ ค่าแบนด์วิดท์

$Q = \frac{\omega_0}{B}$ คือ ค่าตัวประกอบคุณภาพ

$K = \left(\frac{R_I + R_F}{R_I} \right) \left(\frac{\omega_H}{\omega_L + \omega_H} \right)$ คือ ค่าอัตราขยายของตัวกรองผ่านแถบ

การออกแบบตัวกรองผ่านแถบโดยใช้วิธีแบบดั้งเดิมในหัวข้อนี้จะกำหนดให้ค่า ω_0 มีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองดีซี (ω_r) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 143.29 rad/s ค่า ω_H มีค่าเท่ากับ $2\omega_r$ หรือ 286.57 rad/s ค่า ω_L มีค่าเท่ากับ $0.5\omega_r$ หรือ 71.64 rad/s และค่า K มีค่าเท่ากับ 1.0 สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ สามารถแสดงขั้นตอนการออกแบบได้ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 เลือกใช้ค่า R_{LH} เท่ากับ 300 k Ω สำหรับคำนวณค่า C_L ของตัวกรองผ่านต่ำ โดยใช้สมการที่ (7-2)

$$C_L = \frac{1}{R_{LH}\omega_H} \quad (7-2)$$

จากสมการที่ (7-2) แทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามสมการจะสามารถคำนวณหาค่า C_L เท่ากับ 11.63 nF ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าที่นำมาใช้งานและสามารถหาซื้อได้ในท้องตลาด คือ 12 nF

ขั้นที่ 2 ทำการจัดรูปฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองผ่านสูงให้อยู่ในรูปของค่า ω_L ดังแสดงได้ในสมการที่ (7-3) และนำสมการดังกล่าวมาสร้างสมการใหม่ให้อยู่ในรูปแบบของเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete time) โดยอาศัยการดำเนินการในลักษณะเดียวกันกับการสร้างตัวควบคุมพีไอในรูปแบบของเวลาไม่ต่อเนื่อง โดยสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก (เทพพนม

โศภาเพิ่ม, 2554) ดังนั้นจะได้สมการของตัวกรองผ่านสูงในช่วงเวลาไม่ต่อเนื่อง แสดงได้ในสมการที่ (7-4)

$$V_H = \frac{s}{s + \omega_L} V_L \quad (7-3)$$

$$V_{H(i)} = V_{H(i-1)} + V_{L(i)} - V_{L(i-1)} - \omega_L T_i V_{H(i)} \quad (7-4)$$

โดยที่ $V_{H(i)}$ คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตของตัวกรองผ่านสูงปัจจุบัน

$V_{H(i-1)}$ คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตของตัวกรองผ่านสูงอดีต

$V_{L(i-1)}$ คือ ค่าแรงดันอินพุตของตัวกรองผ่านสูงปัจจุบัน

$V_{L(i-1)}$ คือ ค่าแรงดันอินพุตของตัวกรองผ่านสูงอดีต

T_i คือ การสุ่มตัวอย่างเวลา

ขั้นที่ 3 ทำการจัดรูปฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสในสมการที่ (7-5) ใหม่โดยอาศัยสมการอัตราขยายของตัวกรองผ่านแถบในสมการที่ (7-6) ดังนั้นจะได้สมการของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสใหม่ในช่วงเวลาไม่ต่อเนื่อง แสดงได้ในสมการที่ (7-7)

$$V_{bpf} = \left(\frac{R_I + R_F}{R_I} \right) V_H \quad (7-5)$$

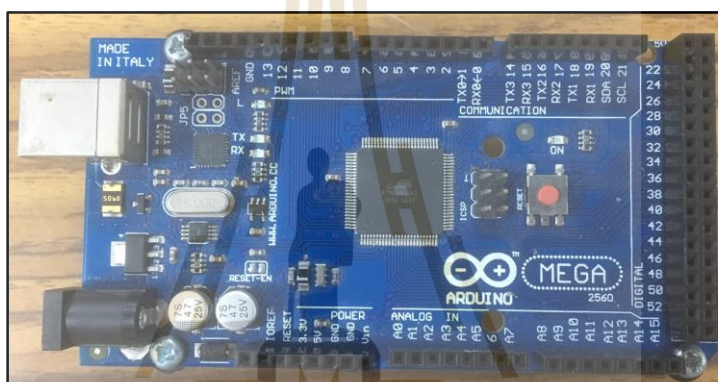
$$\frac{R_I + R_F}{R_I} = K \left(\frac{\omega_L + \omega_H}{\omega_H} \right) = \frac{\omega_L + \omega_H}{\omega_H} \quad (7-6)$$

$$V_{bpf(i)} = \left(\frac{\omega_L + \omega_H}{\omega_H} \right) V_{H(i)} \quad (7-7)$$

โดยที่ $V_{bpf(i)}$ คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตของตัวกรองผ่านแถบปัจจุบัน

ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA2560

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ที่ใช้สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้คือ บอร์ดรุ่น MEGA2560 ซึ่งภายในบอร์ดดังกล่าวใช้ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA2560 ที่เป็นชิพตระกูล AVR ของบริษัท ATMEL สามารถรองรับการเขียนภาษา C++ ของ Arduino ซึ่งง่ายต่อการเขียนโปรแกรมสำหรับผู้ใช้งาน อีกทั้งยังมี พอร์ตอินพุต, พอร์ตเอาต์พุต, รวมทั้งพอร์ตดิจิทัล, พอร์ตแอนะล็อก, พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM, พอร์ตการสื่อสารอนุกรม (SPI) ผ่านมอดู และขนาดหน่วยความจำที่มากเพียงพอต่อการใช้งาน โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA2560 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.18



รูปที่ 7.18 ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA2560

คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับชุดบอร์ด MEGA2560

1. เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ประสิทธิภาพสูงแต่ใช้พลังงานต่ำในตระกูล AVR
2. สถาปัตยกรรมแบบ RISC
 - มีชุดคำสั่ง 135 คำสั่ง และส่วนใหญ่คำสั่งเหล่านี้จะใช้เพียง 1 สัญญาณนาฬิกาในการประมวลผลคำสั่งเท่านั้น
 - มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัว
 - ทำงานสูงสุดที่ 16 ล้านคำสั่งต่อวินาที (MIPS) เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz
3. หน่วยความจำ
 - หน่วยความจำแฟลชสำหรับโหลดโปรแกรมขนาด 128 กิโลไบต์เขียน/ลบได้ 10,000 ครั้ง

- หน่วยความจำ EEROM ขนาด 4 กิโลไบต์เขียน/ลบได้ 10,000 ครั้ง
 - หน่วยความจำแรมชนิดเอสแรม (SRAM) ขนาด 8 กิโลไบต์
 - เก็บข้อมูลได้กว่า 20 ปีที่อุณหภูมิ 85°C และกว่า 100 ปีที่อุณหภูมิ 25°C
4. ระบบโปรแกรมตัวเองที่ถูกฝังอยู่ในตัวชิพ
 5. สามารถทำการอ่านขณะเขียนข้อมูลจริงและสามารถถือการทำงานได้เพื่อความปลอดภัยของซอฟต์แวร์
 6. มีการเชื่อมประสานกับ JTAG (IEEE std.1149.1 compliant)
 7. คุณสมบัติเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก
 - มีตัวตั้งเวลาและตัวนับขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงานจากกันได้ 3 โหมดคือ Prescaler และ Capture
 - มีตัวตั้งเวลาและตัวนับขนาด 16 บิต จำนวน 3 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงานจากกันได้ 2 โหมดคือ Prescaler, Compare และ Capture
 - มีตัวนับเวลาจริง (Real Time Count) ที่แยกวงจรกำหนดความถี่ได้
 - มี PWM จำนวน 12 ช่องสัญญาณ ที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 16 บิต
 - มีตัวปรับผลการเปรียบเทียบของเอาต์พุต
 - มีตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ
 - มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับ/ส่งได้ จำนวน 4 พอร์ต
 - เชื่อมประสานอนุกรมแบบ SPI ได้ทั้งการเป็นมาสเตอร์และสเลฟ (Master/Slave)
 - มีการเชื่อมต่อประสานแบบอนุกรมด้วยสายสัญญาณ 2 เส้นแบบส่งข้อมูลแบบเรียงไบต์ (Byte Oriented)
 - มีตัวตั้งเวลาแบบวอชด็อกที่สามารถกำหนดการทำงานได้โดยสามารถแยกสัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ
 - มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณแอนะล็อกอยู่ในตัว
 - มีการรองรับการขัดจังหวะและการเวค-อัพ (Wake-up) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับขาชีพ
 8. คุณสมบัติพิเศษ
 - มีระบบเริ่มเมื่อมีการรีเซ็ตและมีระบบตรวจจับการเกิดบราวน์เอาต์ (Brown – out) ที่สามารถกำหนดการทำงานได้
 - มีตัวตรวจหาความถี่ตรงของออสซิลเลเตอร์ในตัว (Internal Calibrated Oscillator)
 - มีแหล่งการขัดจังหวะทั้งภายนอกและภายใน (External and Internal Interrupt Source)

- มีโหมดการทำงานสลับ 6 แบบคือ Idle, ADC Noise Redution, Power – save, Power – down, Standby และ Extended Standby
9. อินพุต/เอาต์พุต และถึง
- มีขาของอินพุต/เอาต์พุตที่สามารถกำหนดการทำงานได้ 86 ขา
 - ตัวถังแบบ TQFP ชนิด 100 ขา
10. ช่วงอุณหภูมิที่ชิพทำงานได้ -40°C ถึง 85°C
11. การใช้พลังงาน
- โหมดการทำงาน : ที่ 1 MHz ต้องการแรงดัน 1.8 V กระแส 0.5 mA
 - ขาโหมดเพาเวอร์ดาวน์ (Power - down) ต้องการกระแส 0.1 μA ที่แรงดัน 1.8 V

การใช้งานมอดูแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR มีมอดูแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลหรือ ADC (analog to digital converter) ความละเอียดขนาด 10 บิต (10-bit resolution) ที่แรงดัน +5 V ซึ่งหมายถึงเมื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้วจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0-1024 โดยมีมอดู ADC ทั้งหมดจำนวน 16 ช่อง อินพุตสัญญาณคือ ADC0-ADC15 ซึ่งจะกำหนดไว้ที่พอร์ต F ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ช่องสัญญาณเพียง 3 ช่องคือ ช่อง ADC0, ADC1 และ ADC7 โดยผลการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7-8)

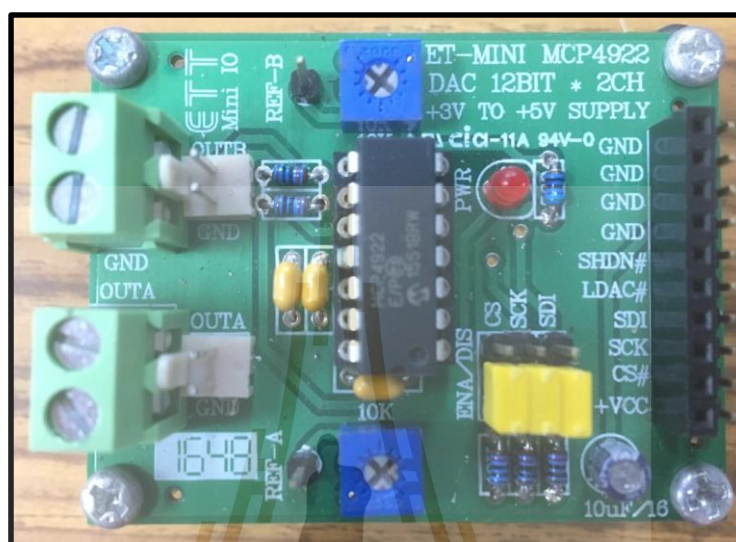
$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 1024}{V_{REF}} \quad (7-8)$$

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

บอร์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกรุ่น ET-MINI MCP4922

บอร์ดที่ใช้ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้บอร์ด ET – MCP4922 ของบริษัท ETT แสดงได้ดังรูปที่ 7.19 โดยมี Digital Input ความละเอียด 12 บิต ใช้งานกับ Power Supply 2.7 ถึง 5.5 V มี Output ให้ใช้งานจำนวน 2 ช่องสัญญาณคือขา OUTA และ OUTB ซึ่งสามารถเลือกเกณฑ์ขยายสัญญาณ Output ได้ที่ 1x หรือ

2x อีกทั้งยังสามารถปรับตั้งแรงดันอ้างอิงได้จาก VR ตั้งแต่ 0 ถึง $+V_{cc}$ นอกจากนี้ยังสามารถ Interface การส่งข้อมูล Digital Input ด้วยพอร์ต SPI ซึ่งรองรับสัญญาณ Clock ได้ถึง 20 MHz สำหรับรายละเอียดหน้าที่การใช้งานขาพอร์ต ET - MCP4922 สามารถแสดงได้ต่อไป



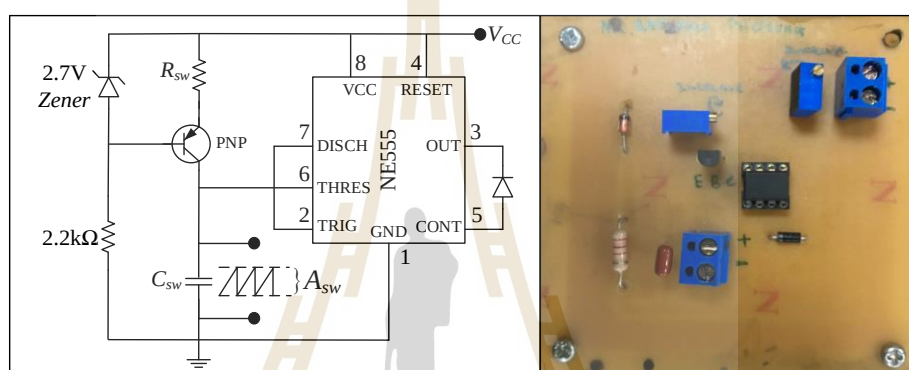
รูปที่ 7.19 ชุดบอร์ด ET- MINI MCP4922 DAC

หน้าที่ขาสัญญาณบนบอร์ด ET-MINI MCP4922

- ขา $+V_{cc}$ และ GND ใช้ต่อเข้ากับ V_{cc} 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 ซึ่งจะทำหน้าที่โหลดข้อมูลที่ถูก 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 $+V_{cc}$

วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย

วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะประยุกต์ใช้ไอซีเบอร์ NE555 ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้แก่ ซีเนอร์ไดโอด ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ไดโอด ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ สำหรับสร้างสัญญาณรูปคลื่นแบบฟันเลื่อยเพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุมแอนะล็อกที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้วงจรเปรียบเทียบสัญญาณซึ่งจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป โดยแผนภาพการต่อวงจรและวงจรที่ใช้จริงของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย แสดงได้ดังรูปที่ 7.20



รูปที่ 7.20 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย

การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยในรูปที่ 7.20 จะกำหนดให้ f_{sw} มีค่าเท่ากับ 10 kHz และค่า A_{sw} มีค่าเท่ากับ 5 V ซึ่งความถี่ f_{sw} สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (7-9) โดยเลือกใช้ค่า V_{CC} มีค่าเท่ากับ 15 V และ C_{sw} มีค่าเท่ากับ 0.1 μ F ดังนั้น สามารถคำนวณหาค่า R_{sw} มีค่าเท่ากับ 2.46 k Ω โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้ตัวต้านทานปรับได้ที่หาซื้อได้ในท้องตลาด คือ 5 k Ω

$$f_{sw} = \frac{(V_{CC} - 2.7)}{R_{sw} \times C_{sw} \times A_{sw}} \quad (7-9)$$

โดยที่ f_{sw} คือ ความถี่ของสัญญาณฟันเลื่อย (Hz)

V_{CC} คือ แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย (V)

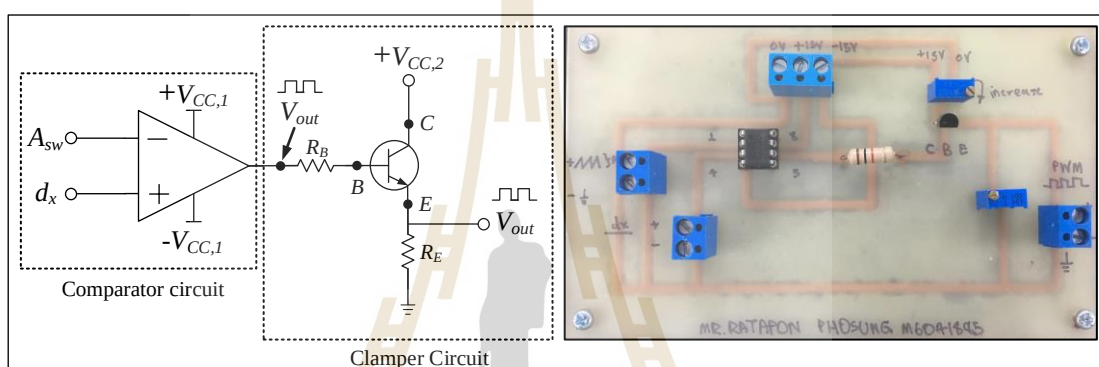
R_{sw} คือ ตัวต้านทานของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย (Ω)

C_{sw} คือ ตัวเก็บประจุของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย (F)

A_{sw} คือ ค่ายอดของสัญญาณฟันเลื่อย (V)

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะประยุกต์ใช้ไอซีเบอร์ TL071 ร่วมกับวงจรยกระดับสัญญาณที่สร้างจากทรานซิสเตอร์เบอร์ P2N2222A เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุม (d_x) ที่ป้อนให้กับขาบวก (non-inverting) และสัญญาณฟันเลื่อย (A_{sw}) ที่ป้อนให้กับขาลบ (inverting) ซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณแรงดันเอาต์พุต (V_{out}) เปลี่ยนแปลงอยู่สองสถานะคือสถานะสูง (high) และสถานะต่ำ (low) ขึ้นอยู่กับลักษณะความแตกต่างของสัญญาณทั้งสองขา โดยสามารถแสดงแผนภาพการต่อวงจรและวงจรที่ใช้จริงของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณได้ดังรูปที่ 7.21



รูปที่ 7.21 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

จากรูปที่ 7.21 สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จากการเปรียบเทียบว่าสัญญาณขา non-inverting และขา inverting ของออปแอมป์ขาไหนมีค่ามากกว่ากัน หากขา non-inverting มีค่ามากกว่าขา inverting ค่าแรงดันเอาต์พุตจะอึดตัวไปในทิศทางบวก ในทางตรงข้ามหากขา non-inverting มีค่าน้อยกว่าขา inverting จะส่งผลให้ค่าแรงดันเอาต์พุตจะอึดตัวไปในทิศทางลบ โดยค่าแรงดันของเอาต์พุตที่อึดตัวนั้นจะมีค่าไม่เกินค่าแรงดันไฟเลี้ยง ($V_{CC,1}$) จากนั้นวงจรยกระดับสัญญาณจะปรับระดับรูปคลื่นทางฝั่งเอาต์พุตให้มีระดับสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปทางแรงดันด้านบวก หรือสามารถสรุปหลักการทำงานข้างต้นได้ดังสมการที่ (7-10)

$$\begin{cases} d_x > A_{sw}, V_{out} = V_{cc,1} \\ d_x < A_{sw}, V_{out} = 0 \end{cases} \quad (7-10)$$

การออกแบบวงจรระดับสัญญาณในรูปที่ 7.21 กำหนดให้แรงดันไฟเลี้ยง (V_{CC2}) มีค่าเท่ากับ 5 V และกำหนดให้ค่าความต้านทานขาเบส (R_B) มีค่าเท่ากับ 1 k Ω โดยต้องการให้กระแสมีตเตอร์อิมิตัว (I_E) มีค่าเท่ากับ 15 mA ซึ่งทรานซิสเตอร์เบอร์ P2N2222A มีค่าดีชีเบตา (β) เท่ากับ 300 ดังนั้น สามารถคำนวณหาค่ากระแสเบส (I_B) โดยใช้สมการที่ (7-11) ได้เท่ากับ 0.04983 mA

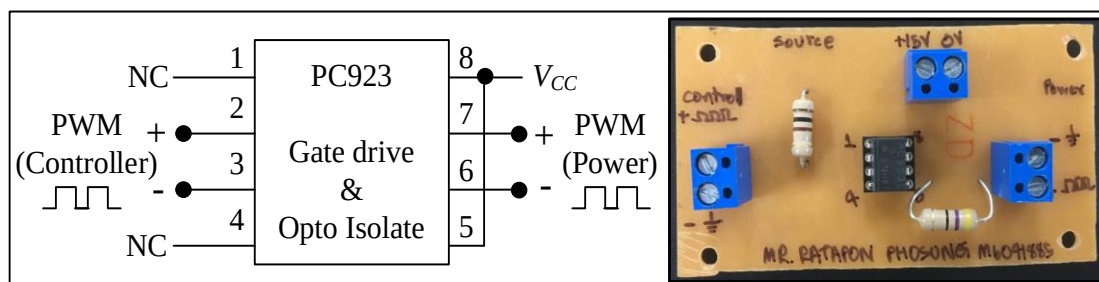
$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} \quad (7-11)$$

คำนวณหาค่าความต้านทานขาอิมิตเตอร์ (R_E) โดยนำ I_B และแรงดันอินพุตวงจรระดับสัญญาณ (V_{in}) เท่ากับ 15 V ไปแทนค่าตามสมการที่ (7-12) ดังนั้นจะได้ค่า R_E เท่ากับ 1 k Ω

$$R_E = \frac{V_{in} - V_{BE} - I_B R_B}{I_B (\beta + 1)} \quad (7-12)$$

วงจรขับเกทหรือวงจรแยกโคดสัญญาณ

วงจรขับเกทหรือวงจรแยกโคดสัญญาณ สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้ไอซีเบอร์ PC923 ของบริษัท SHARP ซึ่งมีอินพุต (PWM Controller) ของวงจรเป็นสัญญาณ PWM ที่ถูกส่งมาจากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณเพื่อสั่งการสวิตช์มอสเฟต หลังจากนั้นไอซีเบอร์ PC923 ทำการสร้างเอาต์พุต (PWM Power) ที่มีขนาดเท่ากับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง (V_{CC}) นั่นคือ 15 V ซึ่งเพียงพอต่อการสั่งสวิตช์ในวงจร สำหรับแผนภาพการเชื่อมต่อวงจรและวงจรที่ใช้จริงของวงจรดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.22



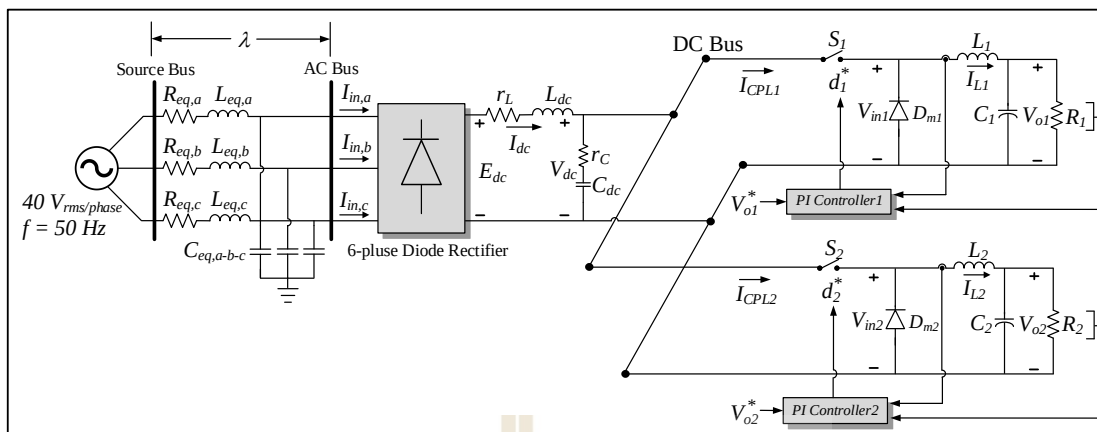
รูปที่ 7.22 วงจรขับเกทหรือวงจรแยกโคดสัญญาณ

7.3 ผลการทดสอบการสร้างเสถียรภาพด้วยรูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว

การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยรูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวทั้งในทางทฤษฎีและในทางปฏิบัติจะดำเนินการทดสอบด้วยกันทั้งหมด 3 กรณีคือ กรณีแรกเป็นการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยรูปป้อนไปหน้า กรณีที่ 2 การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยรูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการแบบดั้งเดิม และกรณีที่ 3 เป็นการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว แต่ถึงอย่างไรก็ตามการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะมีความจำเป็นก็ต่อเมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้พิกัดที่ตั้งไว้เท่านั้น หากระบบเกิดการขาดเสถียรมากกว่าพิกัดที่ตั้งไว้ก็ไม่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจากชุดทดสอบจริงจึงเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาเป็นอันดับแรก ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 7.3.1

7.3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้แสดงดังรูปที่ 7.23 จะประกอบด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมดุล โดยที่ V_s คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล R_{eq} , L_{eq} และ C_{eq} คือ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ ส่วนที่ 2 ไดโอดเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 วงจรกรองแรงดันบัลลิสต์ โดยที่ L_{dc} , C_{dc} , r_L และ r_C คือ ความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ และความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ตามลำดับ และส่วนที่ 4 โหลดวงจรแปลงผันแบบบักคี่ที่มีการควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานจำนวน 2 ชุด



รูปที่ 7.23 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากรูปที่ 7.23 จะเห็นได้ว่าเป็นโครงสร้างเดียวกันกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 4 เพราะฉะนั้น การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงจะอาศัยองค์ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่ได้รับการอธิบายไว้แล้วในบทที่ 4 นั่นก็คือ การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และการนำแบบจำลองที่ได้มาผ่านวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง แต่ถึงอย่างไรก็ตาม องค์ความรู้ที่ได้จากบทที่ 4 นั้นไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองจะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการนำกระบวนการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของระบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการแม่นยำ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์อีกด้วย ซึ่งรายละเอียดการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของระบบสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก (เทพพนม โสภะเพิ่ม, 2554, จักรกริช ภักดีโต, 2557) สำหรับค่าพารามิเตอร์ของระบบจริงที่ผ่านการระบุเอกลักษณ์ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.1

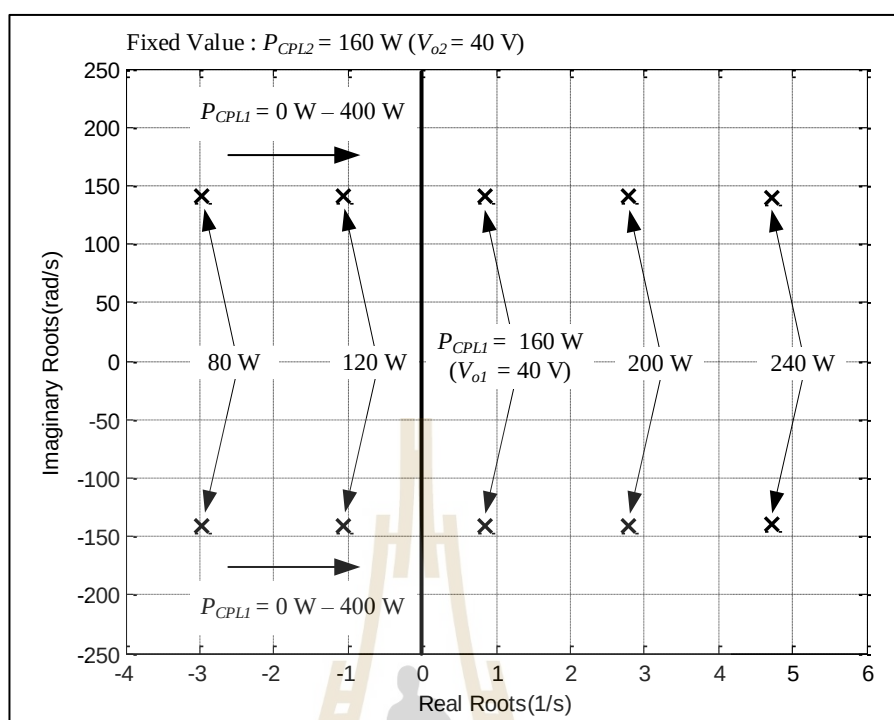
ตารางที่ 7.1 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	40 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
R_{eq}	0.0586 Ω	ความต้านทานของสายส่ง
L_{eq}	248.73 μ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่ง

ตารางที่ 7.1 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง (ต่อ)

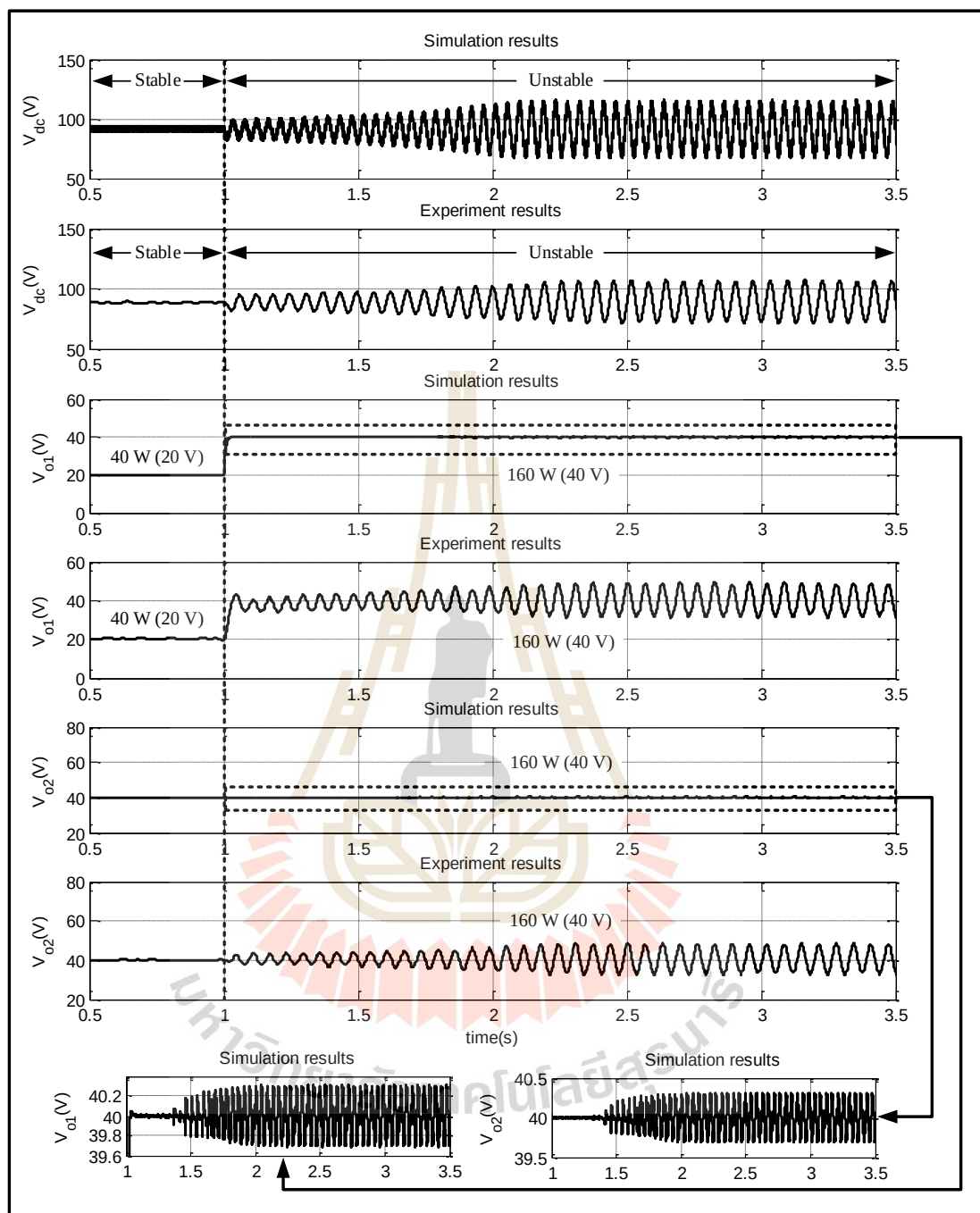
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่ง
r_L	0.2756 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_{dc}	39.0002 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_c	0.5280 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_{dc}	1248.88 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$L_I = L_2 (\Delta I_L \leq 0.2 \text{ A})$	15 mH	ความเหนี่ยวนำของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์
$C_I = C_2 (\Delta V_C \leq 2.8 \text{ mV})$	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์
$R_I = R_2$	10 Ω	ความต้านทานของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์
$A_{r,1} = A_{r,2}$	5	ค่าขอดสัญญาณสามเหลี่ยมของตัวควบคุมพีไอ
$K_{pv,1} = K_{pv,2}$	0.1513	ตัวควบคุมพีของลูประงดันไฟฟ้า
$K_{iv,1} = K_{iv,2}$	15.7914	ตัวควบคุมไอของลูประงดันไฟฟ้า
$K_{pi,1} = K_{pi,2}$	1.4102	ตัวควบคุมพีของลูประแสไฟฟ้า
$K_{ii,1} = K_{ii,2}$	1265.8	ตัวควบคุมไอของลูประแสไฟฟ้า

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงจะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงค่าเงาเงเด่นของระบบที่อาศัยการคำนวณผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ไว้ในบทที่ 4 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 7.24 โดยทำการปรับตั้งโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 2 ($P_{CPL,2}$) ให้มีระดับกำลังไฟฟ้าคงที่ 160 W (40 V) และโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 ($P_{CPL,1}$) มีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทีละ 40 W โดยเริ่มตั้งแต่ 0 W (0 V) ไปจนถึง 160 W (40 V)



รูปที่ 7.24 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง

จากรูปที่ 7.24 แสดงให้เห็นว่า เมื่อผลรวมระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 280 W ไปเป็น 320 W จะทำให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งซ้ายของระนาบเอสมาอยู่ฝั่งขวา ซึ่งหมายถึงระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 7.23 เริ่มเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยผลการยืนยันการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 7.24 จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB และการยืนยันผลจากชุดทดสอบจริง ณ จุดปฏิบัติงานเดียวกันที่แสดงได้ดังในรูปที่ 7.25 โดยกำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 2 มีระดับกำลังไฟฟ้าค่าคงที่ 160 W (40 V) และโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับกำลังไฟฟ้าจาก 40 W (20 V) ไปเป็น 160 W (40 V) ที่เวลา 1.5 วินาที



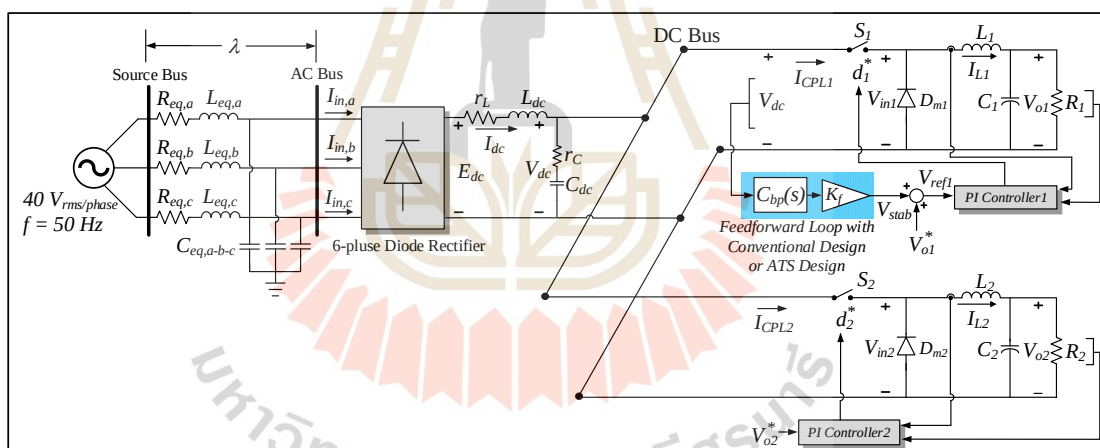
รูปที่ 7.25 การยืนยันผลการขาดเสถียรภาพของระบบจริง

จากรูปที่ 7.25 แสดงให้เห็นว่า เมื่อผลรวมระดับกำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 200 W ไปเป็น 320 W ที่เวลา 1.0 วินาที จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งดูได้จากผลการแกว่งของแรงดันบัสดีซีที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งทำให้

สมรรถนะการควบคุมของระบบลดลง ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงนำการห้วงแบบแอกทีฟด้วยรูปป้อนไปหน้าและวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบจริง ซึ่งยังไม่มีงานวิจัยในอดีตที่นำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกันและการห้วงแบบแอกทีฟด้านโหลด ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 7.3.2 7.3.3 และ 7.3.4 เป็นลำดับไป

7.3.2 การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยรูปป้อนไปหน้า

การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นจริงในหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงจุดการขาดเสถียรภาพของระบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอยู่ภายใต้ค่าพิกัดที่ตั้งไว้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบ อันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยในหัวข้อนี้จะนำการห้วงแบบแอกทีฟด้วยรูปป้อนไปหน้ามาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกัน ดังแสดงได้ในรูปที่ 7.26



รูปที่ 7.26 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการห้วงแบบแอกทีฟด้วยรูปป้อนไปหน้า

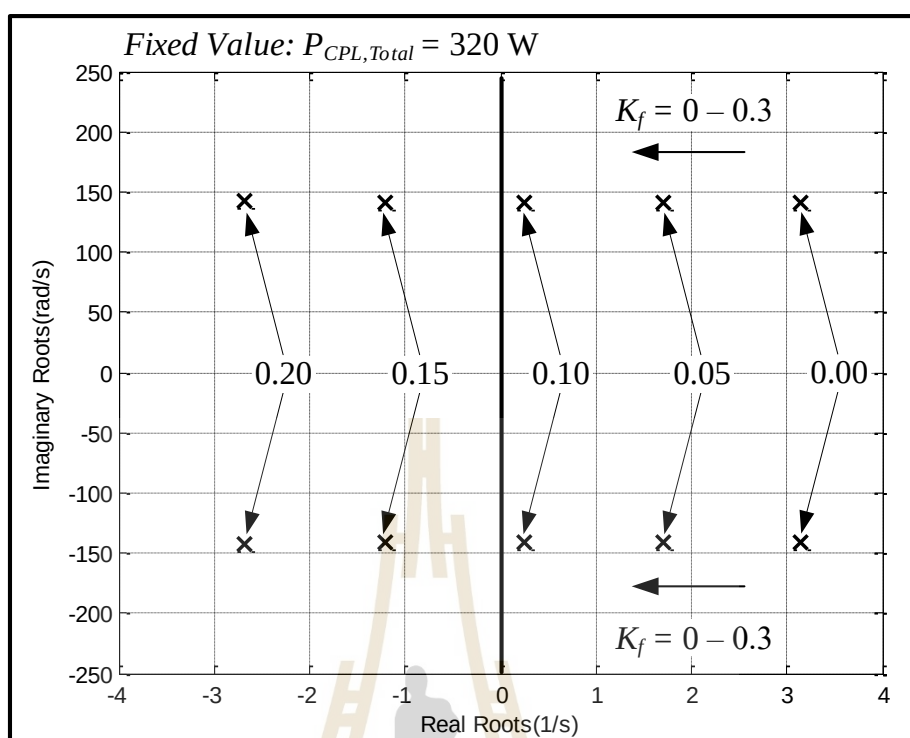
ระบบไฟฟ้าที่พิจารณารูปที่ 7.26 ประกอบด้วย 5 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังสามเฟสแบบสมมูล โดยที่ V_s คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูล R_{eq} , L_{eq} และ C_{eq} คือ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ ส่วนที่ 2 ไดโอดเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 วงจรกรองแรงดันบักกัขนาน โดยที่ L_{dc} , C_{dc} , r_L และ r_C คือความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ และความต้านทาน

ภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ตามลำดับ ส่วนที่ 4 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีโหลดตัวต้านทาน 2 ชุด ต่อขนานกัน และส่วนที่ 5 วงจรการหน่วงแบบแอทไฟด้วยลูปป้อนไปหน้า โดยที่ $C_{bp}(s)$ และ K_f คือ ตัวกรองผ่านแถบและค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน ซึ่งเป็น โครงสร้างดั้งเดิมที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 และ 6 ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้อาศัยองค์ความรู้ในบทดังกล่าว คือ การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณา การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับการนำองค์ความรู้ต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นมาใช้ในการพิจารณาระบบจริงจะได้รับการนำเสนอต่อไป

การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าจะอาศัยผลการวิเคราะห์จากทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นในบทที่ 5 โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 7.26 เป็นดังตารางที่ 7.1 และมีส่วนที่พิจารณาเพิ่มเติมจากระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7.23 แสดงดังตารางที่ 7.2 ซึ่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 7.27 ที่มีการกำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 1 และโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 160 W (40 V) และ 160 W (40 V) ตามลำดับ และทำการเปลี่ยนแปลงค่า K_f จาก 0 เพิ่มขึ้นทีละ 0.05 ไปจนถึง 0.3

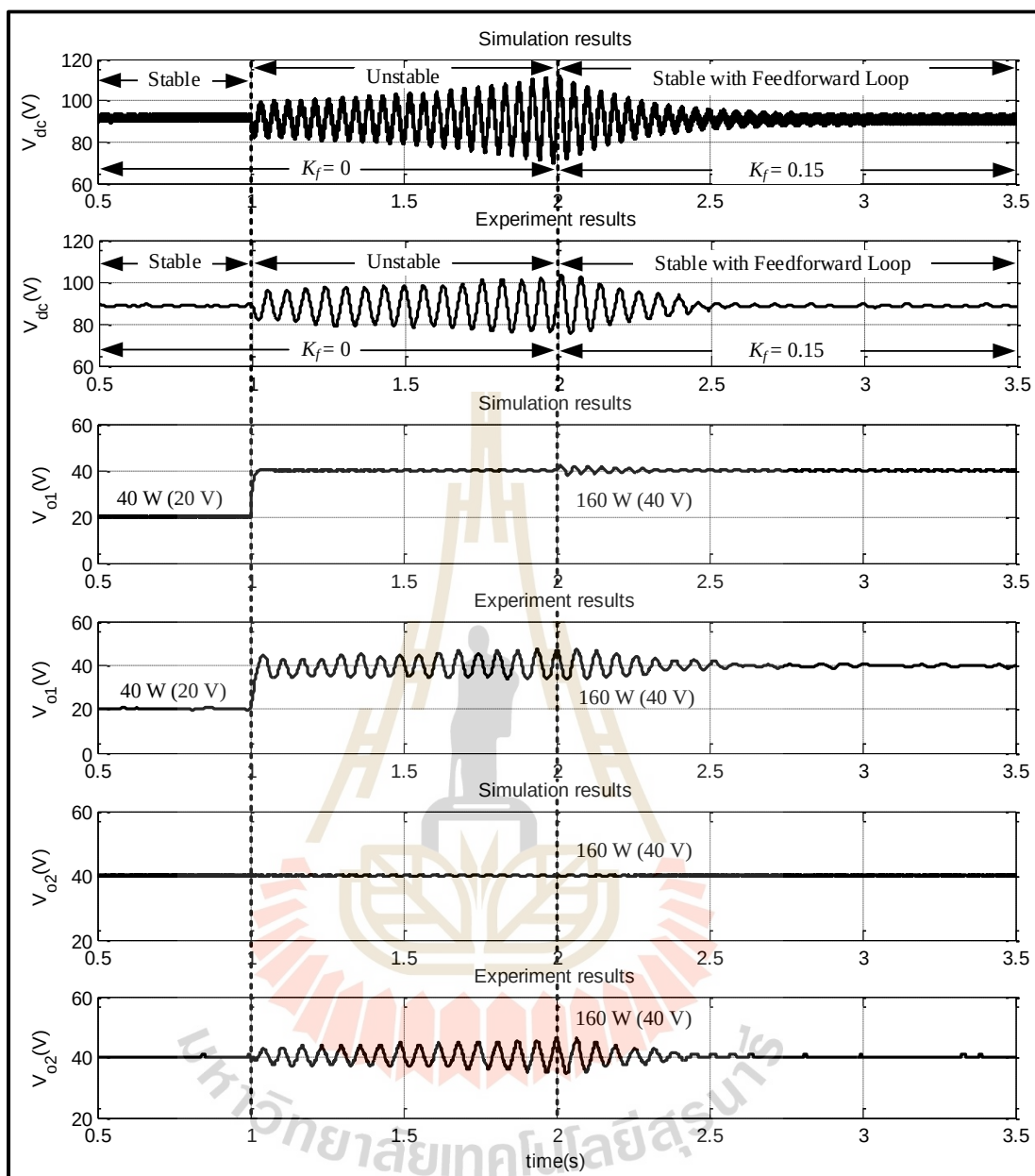
ตารางที่ 7.2 พารามิเตอร์ของตัวกรองผ่านแถบสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 7.26

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
ω_0	143.29 rad/s	ความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองผ่านแถบ ($\omega_0 = \omega_r$)
ω_L	71.64 rad/s	ความถี่ตัดข้างล่าง ($\omega_L = \omega_r/2$)
ω_H	286.57 rad/s	ความถี่ตัดข้างบน ($\omega_H = \omega_r \times 2$)



รูปที่ 7.27 ผลการคำนวณค่าเจาะจงเด่นที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพโดยกำหนดให้ผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเป็น 320 W

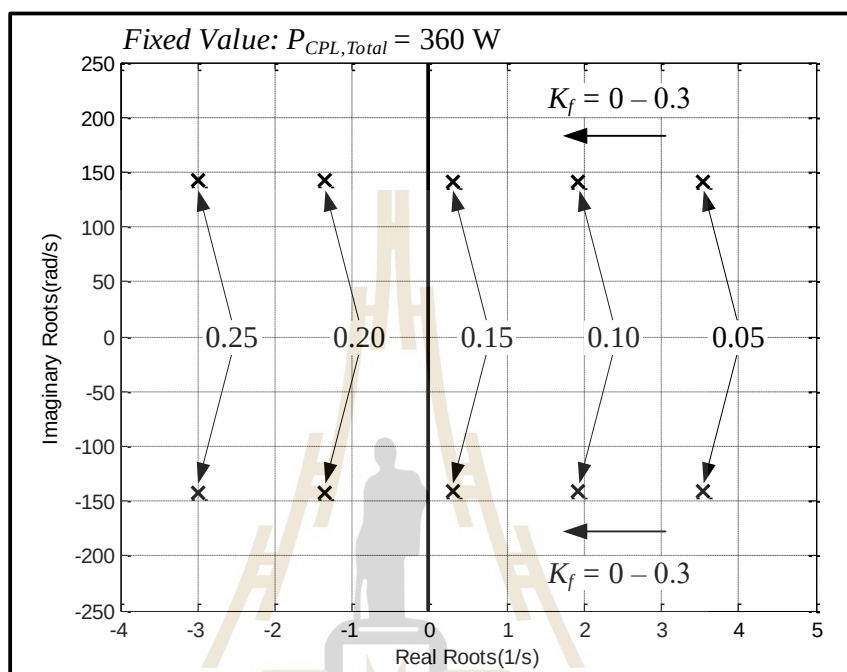
จากรูปที่ 7.27 จะสังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์มีระดับกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 320 W โดยที่ค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือ ยังไม่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยรูปป้อนไปหน้า ระบบที่พิจารณาในรูปที่ 7.26 จะเกิดการขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ แต่เมื่อค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0.15 ค่าเจาะจงเด่นของระบบจะเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมาอยู่ที่ฝั่งซ้าย ซึ่งหมายถึง ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง เพียงแค่เพิ่มค่า K_f จาก 0 ไปเป็น 0.15 สำหรับการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบ จะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ร่วมกับผลการทดสอบจากชุดทดสอบจริง ณ จุดปฏิบัติงานเดียวกันที่แสดงได้ในรูปที่ 7.28 โดยกำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 2 มีระดับกำลังไฟฟ้าค่าคงที่ 160 W (40 V) และโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับกำลังไฟฟ้าจาก 40 W (20 V) ไปเป็น 160 W (40 V) ที่เวลา 1.0 วินาที หรือผลรวมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวทั้ง 2 ชุดมีค่าเป็น 320 W หลังจากนั้น เมื่อเวลา 2.0 วินาที ได้กำหนดให้รูปป้อนไปหน้าเริ่มทำงานโดยที่ K_f มีค่าเท่ากับ 0.15



รูปที่ 7.28 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ค่า K_f เท่ากับ 0.15

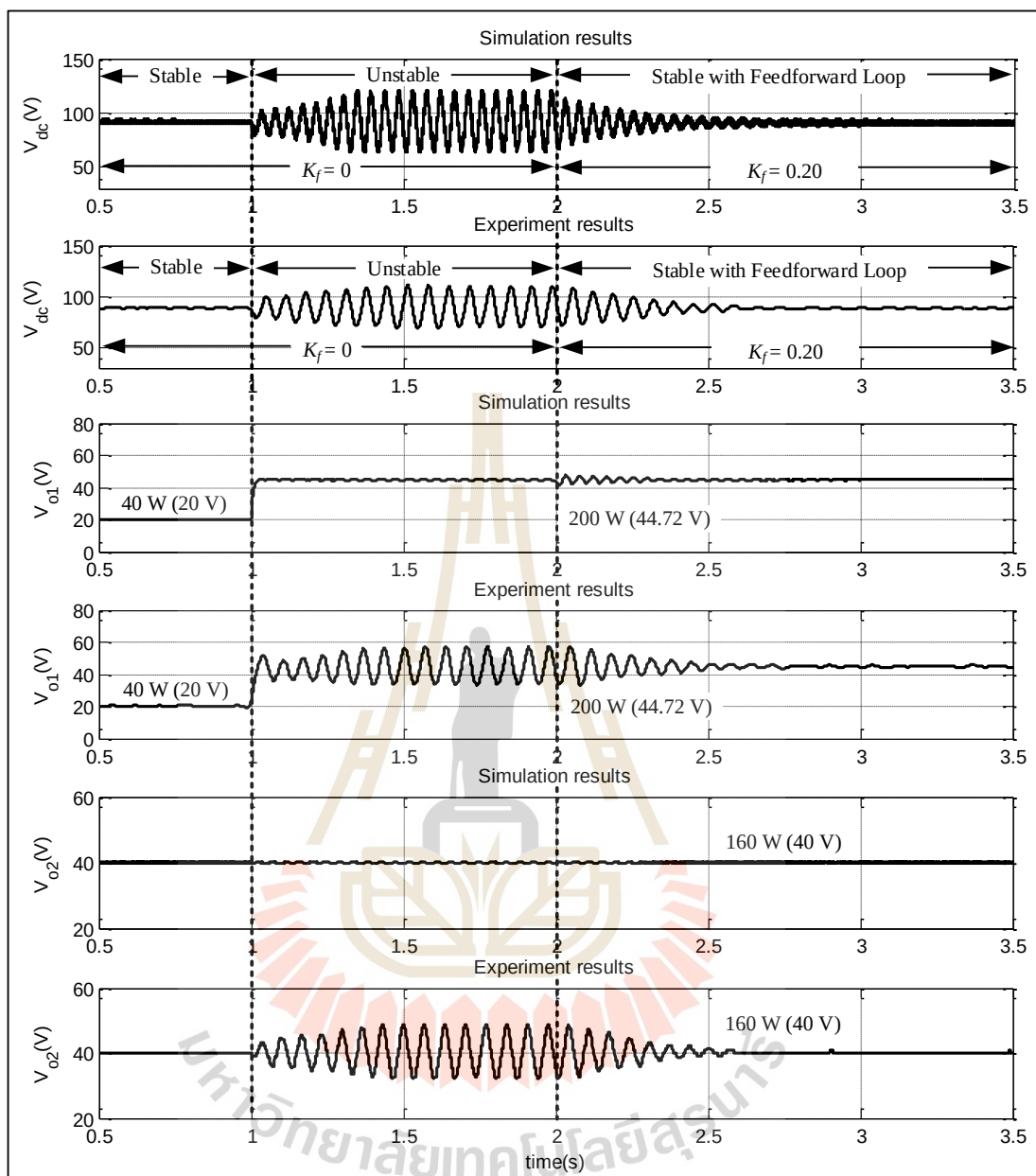
จากรูปที่ 7.28 จะสังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีระดับกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 320 W จะทำให้ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เกิดการขาดเสถียรภาพ และภายหลังจากถูบบ้อนไปหน้าเริ่มทำงาน โดยที่กำหนดให้ค่า K_f ให้มีค่าเท่ากับ 0.15 จะทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง อย่างไรก็ตาม เมื่อโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าไปเป็น 200 W อาจทำให้ระบบกลับมามี

เสถียรภาพอีกครั้ง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงสำหรับการวิเคราะห์ผลของค่า K_f ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพเมื่อ ผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีระดับกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 360 W ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 7.29



รูปที่ 7.29 ผลการคำนวณค่าเจาะจงเด่นที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพโดยกำหนดให้ผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเป็น 360 W

จากรูปที่ 7.29 จะสังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีระดับกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 360 W จะทำให้ระบบกลับมาขาดเสถียรภาพอีกครั้งที่ค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0.15 ดังนั้นค่า K_f จึงควรมีค่าเพิ่มตามระดับกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในที่นี้คือ 0.2 จึงทำให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมายู่ที่ฝั่งซ้ายอีกครั้ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ระบบสามารถทำงานในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ โดยการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบแสดงได้ดังในรูปที่ 7.30 ซึ่งแสดงผลการขาดเสถียรภาพเมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีค่าเท่ากับ 360 W และผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า เมื่อค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0.2



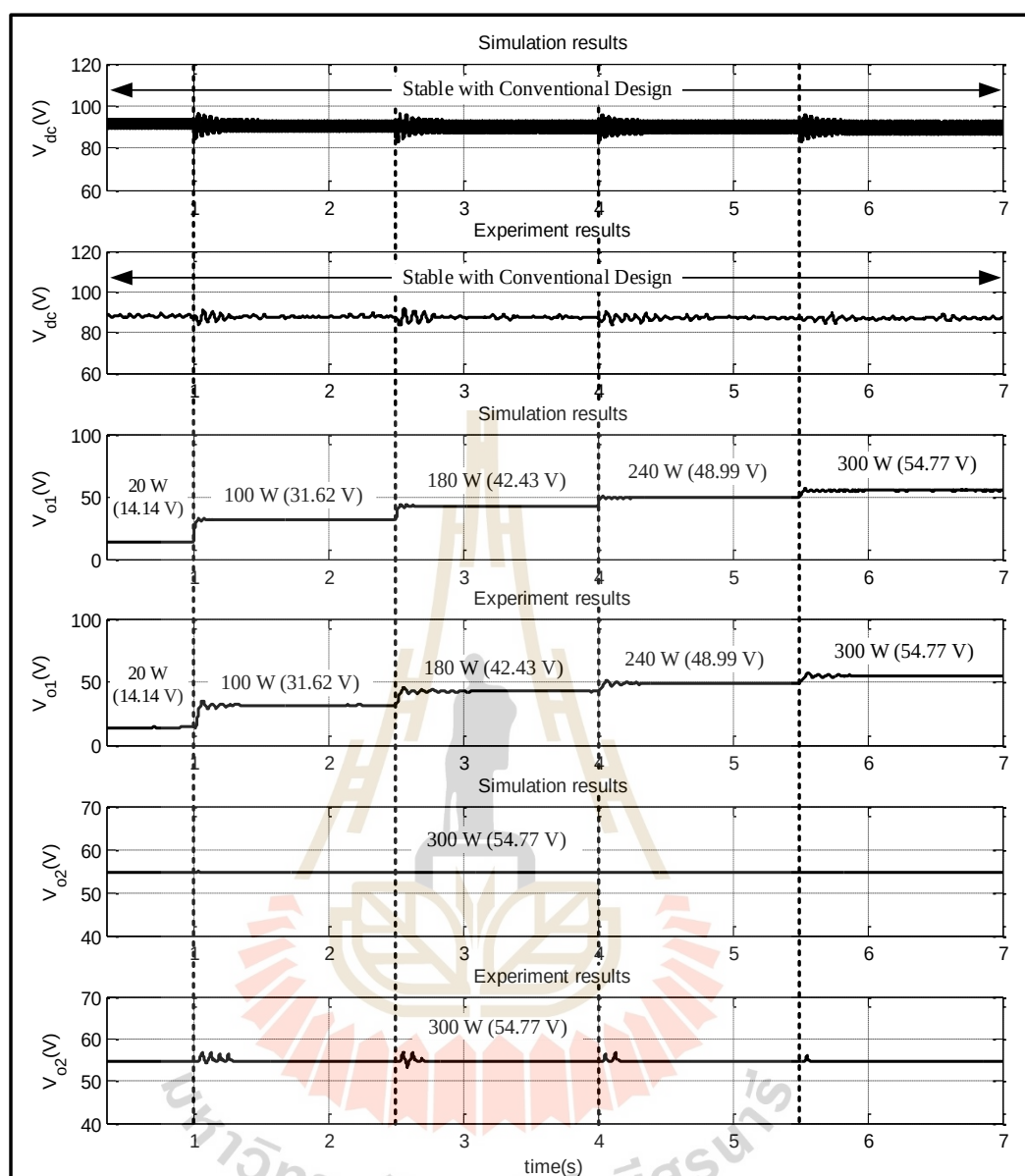
รูปที่ 7.30 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ค่า K_f เท่ากับ 0.2

จากรูปที่ 7.30 จะสังเกตได้ว่า เมื่อผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดมีระดับกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 360 W จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น ซึ่งดูได้จากแรงดันบัลลิสต์ที่มีการกระเพื่อมของแรงดันมากขึ้น และภายหลังจากเวลาที่ 2.0 วินาที ได้สั่งการให้ลูปป้อนไปหน้าเริ่มทำงานที่ค่า K_f เท่ากับ 0.2 จะพบว่าแรงดันบัลลิสต์จะค่อยๆ มีผลการกระเพื่อมของแรงดันที่ลดน้อยลง อีกทั้งยังทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันของวงจรแปลงผันแบบบักก์ดี

ขึ้น หรือกล่าวได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง จากการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่า เมื่อระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่า K_f จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระดับกำลังไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ดังนั้นในอนาคตจึงควรมีงานวิจัยในการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยลูปป้อนไปหน้าเพื่อทำการปรับเปลี่ยนค่า K_f ตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุดต่อไป แต่สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นในการทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดลดลงน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานด้วยการนำวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบลูปป้อนไปหน้า เพื่อลดข้อเสียของการหวนแบบแอกทีฟด้านโหลดตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5 แต่ถึงอย่างไรก็ตาม การออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวจำเป็นต้องอาศัยผลการตอบสนองของโหลดที่ได้จากการออกแบบลูปป้อนไปหน้าด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของผลตอบสนองที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการ ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบลูปป้อนไปหน้าด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม รวมถึงผลการทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบจริง จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป

7.3.3 การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการแบบดั้งเดิม

การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการแบบดั้งเดิมจะทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่มีการคงที่ค่า K_f ไว้ตลอดช่วงการทำงานจนถึงค่าพิกัดที่ตั้งไว้ โดยอาศัยหลักการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองผ่านแถบที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.3 ของบทที่ 5 ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 7.2 สำหรับในส่วนของการออกแบบค่า K_f จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าเจาะจงของระบบที่คำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยทำการปรับตั้งค่าโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 และโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 2 มีค่าคงที่เท่ากับ 300 W (54.77 V) และ 300 W (54.77 V) ตามลำดับ และทำการเปลี่ยนแปลงค่า K_f จาก 0 เพิ่มขึ้นทีละ 0.25 ไปจนถึง 5.0 ดังแสดงในรูปที่ 7.31



รูปที่ 7.32 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ค่าพิกัดของระบบ เมื่อ K_f มีค่าคงที่เท่ากับ 0.5

จากรูปที่ 7.32 จะเห็นได้ว่า เมื่อโหลดวงจรแปลงผันแบบบักกิ้งทั้ง 2 ชุดมีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นรวมเป็น 600 W โดยทำการคงค่า K_f ไว้ที่ 0.5 จะทำให้ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน โดยดูได้จากการสั่นไหวของแรงดันบัลติซึ่ที่ไม่มีผลของการกระเพื่อมที่สูงขึ้นของแรงดัน นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ผลการออกแบบในทางทฤษฎี ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB และผลการทดสอบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นมีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจน แต่ถึงอย่างไรก็ตาม

การห้วงแบบแอกทีฟด้วยลูป้อนไปหน้าจะทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ลดลง ดังนั้นในหัวข้อที่ 7.3.4 จะแสดงผลการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยการนำวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมาประยุกต์ใช้เพื่อให้สมรรถนะของโหลดดีกว่าผลการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ได้จากวิธีการแบบดั้งเดิม

7.3.4 การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวจะพิจารณาทั้งหมด 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบการมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน โดยจะพิจารณาจากผลตอบสนองของแรงดันบัสดิซี (V_{dc}) และส่วนที่ 2 แสดงการทดสอบสมรรถนะการควบคุมแรงดัน ไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 1 ซึ่งจะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_{o1}) ที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ของลูป้อนไปหน้าจากอัลกอริทึมการค้นหา ATS กับวิธีการแบบดั้งเดิม สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ลูป้อนไปหน้าในหัวข้อนี้จะอาศัยขั้นตอนการทำงานของการทำงานการค้นหาด้วยอัลกอริทึม ATS ทั้ง 4 ขั้นตอนที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.3.2 ของบทที่ 6 ซึ่งจะเพิ่มเติมในส่วนการปรับตั้งจุดปฏิบัติงานของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 1 และวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 2 ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้มีทั้งหมด 4 ช่วงการทำงาน ดังแสดงในตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 การปรับตั้งค่าโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ของระบบจริง

ช่วงการทำงานที่	ค่าโหลดวงจรแปลงผัน แบบบัคค์ชุดที่ 1	ค่าโหลดวงจรแปลงผัน แบบบัคค์ชุดที่ 2	ผลรวมของโหลด กำลังไฟฟ้า
1	เปลี่ยนจาก 20 W (14.14 V) เป็น 100 W (31.62 V)	300 W (54.77 V)	400 W
2	เปลี่ยนจาก 100 W (31.62 V) เป็น 180 W (42.43 V)	300 W (54.77 V)	480 W
3	เปลี่ยนจาก 180 W (42.43 V) เป็น 240 W (48.99 V)	300 W (54.77 V)	540 W
4	เปลี่ยนจาก 240 W (48.99 V) เป็น 300 W (54.77 V)	300 W (54.77 V)	600 W (ค่าพิกัดที่ตั้งไว้)

การออกแบบรูปปั้นไปหน้าด้วยอัลกอริทึม ATS จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง ค่ารัศมีการค้นหา และค่าอัตราปรับลดรัศมี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้การค้นหาด้วยอัลกอริทึม ATS มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของการทดสอบพารามิเตอร์ทั้ง 4 นั้นจะได้รับการนำเสนอไว้ที่ภาคผนวก ง ตารางที่ ง.6 - ตารางที่ ง.10

จากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบ ATS ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ในภาคผนวก ง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ทำการเลือกพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวที่ทำให้ค่า W มีค่าเฉลี่ยที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม ATS สำหรับระบบจริง

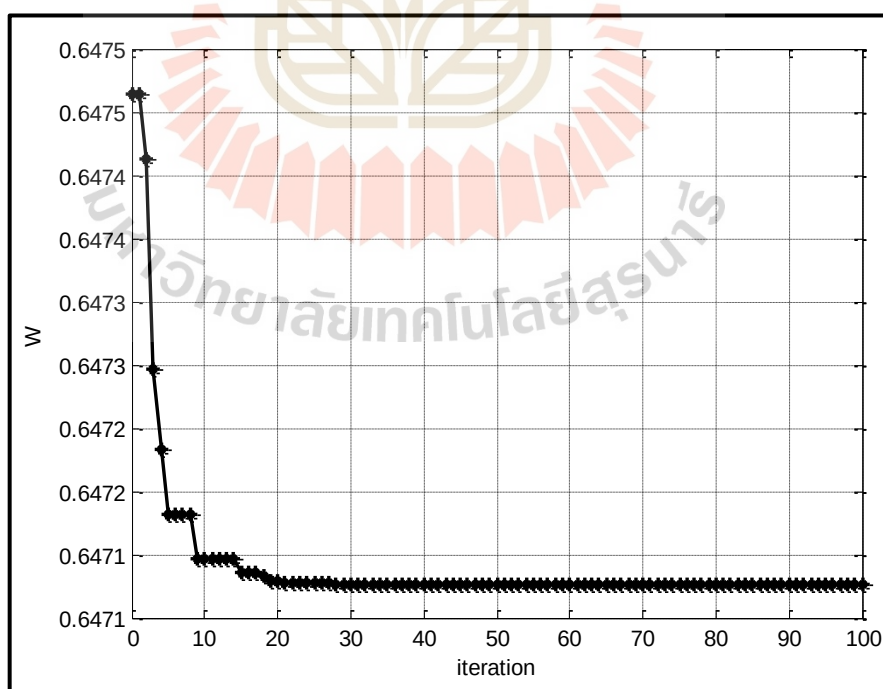
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
<i>Initial number neighbor</i>	50	จำนวนคำตอบเริ่มต้น
<i>Number neighbor</i>	30	จำนวนคำตอบรอบข้าง
<i>Radius</i>	40	ค่ารัศมีการค้นหาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของขอบเขต
<i>DF</i>	1.4	ค่าอัตราปรับลดรัศมี

นอกจากพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบ ATS จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการค้นหาแล้ว การกำหนดขอบเขตการค้นหายังเป็นส่วนที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการค้นหาด้วยเช่นกัน โดยการกำหนดขอบเขตการค้นหาอัตราขยาย K_r จะพิจารณาจากผลการคำนวณค่าเจาะจงในรูปที่ 7.31 และในส่วนขอบเขตของความถี่ตัด ω_L และ ω_H จะกำหนดจากค่าแบนด์วิดท์การทำงานดังนี้ $\omega_L = 0.1\omega_r - 0.5\omega_r$ rad/s และ $\omega_H = 2\omega_r - 10\omega_r$ rad/s ตามลำดับ ซึ่งค่าเหล่านี้คำนวณได้จากการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม ดังนั้นจะได้ขอบเขตการค้นหาพารามิเตอร์ของรูปปั้นไปหน้าดังตารางที่ 7.5

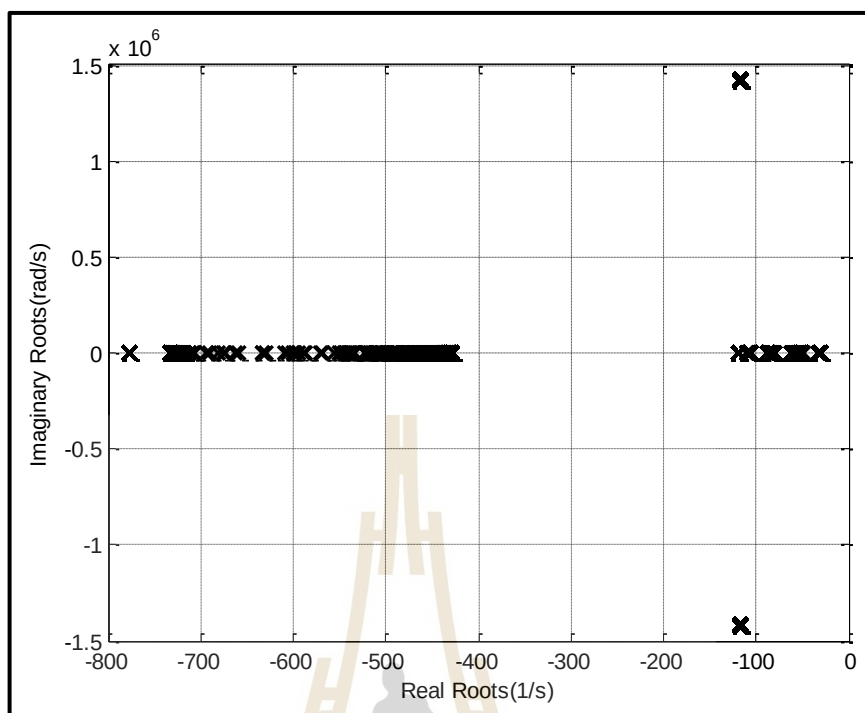
ตารางที่ 7.5 ขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของลูบป้อนไปหน้าของระบบจริง

พารามิเตอร์ของลูบป้อนไปหน้า	ขอบเขตการค้นหา	
	ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
K_f	0.5	5.0
ω_L	14.329 rad/s	91.29 rad/s
ω_H	286.57 rad/s	1432.9 rad/s

เมื่อทราบถึงจุดการทำงานของระบบ ค่าพารามิเตอร์ของการค้นหา และขอบเขตการค้นหาที่เหมาะสมแล้ว ในลำดับถัดไปจะเป็นการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ดีที่สุดที่ทำให้สมรรถนะการควบคุมของ V_{oi} ลดลงน้อยที่สุด โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณาผลการลู่เข้าของค่า W รวมถึงการตรวจสอบเสถียรภาพระหว่างกระบวนการค้นหาด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงทั้งหมด 5 ครั้ง เพื่อนำมาใช้ในการหาค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ดีที่สุดตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.6 อีกทั้งเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการออกแบบอีกด้วย สำหรับผลการออกแบบดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.33 และ รูปที่ 7.34 ซึ่งเป็นผลการออกแบบที่มีค่า W น้อยที่สุด



รูปที่ 7.33 การลู่เข้าหาค่าตอบ W ของระบบจริง



รูปที่ 7.34 ค่าเจาะจงในกระบวนการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H ของระบบจริง เมื่อ $P_{CPL,Total} = 600$ W

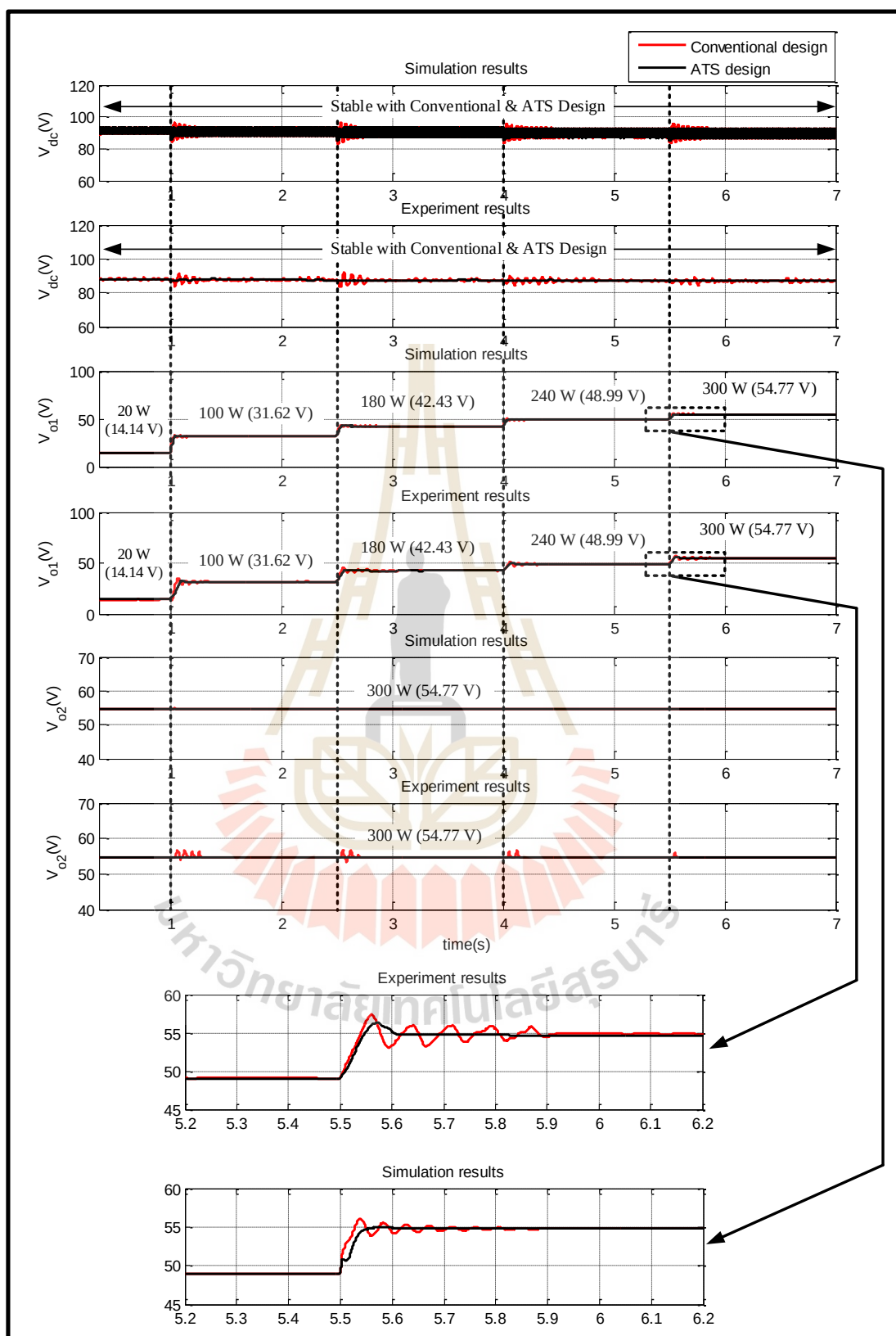
จากรูปที่ 7.33 แสดงการดูเข้าของค่า W ในจำนวนรอบการค้นหาล่าสุดเท่ากับ 100 จะเห็นได้ว่าค่า W มีค่าลดลงในแต่ละรอบการค้นหา ซึ่งเป็นการบ่งบอกอย่างชัดเจนว่าสามารถค้นหา K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้ผลการตอบสนองของ V_{oi} ดีขึ้นได้ เมื่อค่า W มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.6471 ในช่วงรอบการค้นหาค่าที่ 57 ถึง 100 ซึ่งทำให้สามารถค้นหาค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้ผลการตอบสนองของ V_{oi} มีสมรรถนะลดลงน้อยที่สุด แสดงดังตารางที่ 7.6

จากรูปที่ 7.34 แสดงการตรวจสอบเสถียรภาพในระหว่างการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H โดยทำการปรับตั้งค่าโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 1 และโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ชดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 300 W (54.77 V) และ 300 W (54.77 V) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าเจาะจงของระบบมีการกระจายตัวและซ้อนกันเป็นกลุ่ม ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ได้จากการสุ่มในแต่ละรอบการค้นหา อย่างไรก็ตามค่าเจาะจงทั้งหมดนี้มีส่วนจริงน้อยกว่าศูนย์ทุกค่า ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขการมีเสถียรภาพที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 6 ดังนั้นจึงถือได้ว่าค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ออกแบบได้ในแต่ละรอบการค้นหายังคงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ณ ค่าพิกัดที่ตั้งไว้

ตารางที่ 7.6 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ไปหน้าที่ได้จากการออกแบบด้วย ATS ของระบบจริง

ครั้งที่	ค่าที่ออกแบบ			ค่า W
	K_f	ω_L	ω_H	
1	2.9000	21.7731 rad/s	437.0248 rad/s	0.6477
2	2.9001	21.7431 rad/s	437.0248 rad/s	0.6476
3	2.9001	21.7401 rad/s	429.8605 rad/s	0.6471
4	2.9029	21.7428 rad/s	448.8277 rad/s	0.6482
5	2.9223	21.7439 rad/s	444.9600 rad/s	0.6490

จากตารางที่ 7.6 แสดงผลการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ทำให้สมรรถนะการควบคุมของโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชดที่ 1 ลดลงน้อยที่สุดทั้งหมด 5 ครั้ง ซึ่งพบว่าผลการออกแบบในครั้งที่ 3 ให้ค่า W มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ทำการเลือกใช้ค่า K_f , ω_L และ ω_H เท่ากับ 2.9001, 21.7401 rad/s และ 429.8605 rad/s ตามลำดับ การยืนยันประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของผลการออกแบบค่าดังกล่าวด้วยอัลกอริทึมการค้นหา ATS จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB และการโปรแกรมคำสั่งภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ที่ถูกปฏิบัติงานเดียวกัน เพื่อพิจารณาผลการสั่นไหวของแรงดัน V_{dc} และเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุต V_{oi} ที่ได้จากวิธีการแบบดั้งเดิมกับอัลกอริทึมการค้นหา ATS ซึ่งหลักการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะทำการปรับตั้งค่าโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชดที่ 2 ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 300 W (54.77 V) (ค่าพิกัด) และทำการเพิ่มโพลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชดที่ 1 จาก 20 W (14.14 V) ไปจนถึง 300 W (54.77 V) (ค่าพิกัด) โดยกำหนดให้ K_f มีค่าคงที่ตลอดช่วงการทำงาน ซึ่งผลการยืนยันดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่



รูปที่ 7.35 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว

จากรูปที่ 7.35 สังเกตได้ว่า เมื่อโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์มีการเปลี่ยนแปลงค่าระดับกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นรวมเป็น 600 W โดยที่กำหนดค่า K_f , ω_L และ ω_H มีค่าเท่ากับ 2.9001, 21.7401 rad/s และ 429.8605 rad/s ตามลำดับ จะทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน ซึ่งดูได้จากผลการเข้าสู่ของแรงดันบัลติซี (V_{dc}) ณ จุดปฏิบัติงานต่าง ๆ และเมื่อพิจารณาถึงสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ของลูปป้อนไปหน้าที่ได้รับการออกแบบผ่านอัลกอริทึมการค้นหา ATS นั้นให้ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{ol} มีการพุ่งเกินเพียงเล็กน้อยและสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการแบบดั้งเดิมที่มีการพุ่งเกินที่มากกว่า อีกทั้งยังประสบปัญหาการแกว่งของรูปสัญญาณเป็นเวลานาน นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ผลการออกแบบในทางทฤษฎี ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB และผลการทดสอบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นมีความสอดคล้องและคล้อยตามกันอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงถือได้ว่า การออกแบบค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึมการค้นหา ATS มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูง เหมาะสำหรับการนำไปใช้จริงในทางปฏิบัติ

7.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 7 ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งในเบื้องต้นได้อธิบายเกี่ยวกับส่วนประกอบต่าง ๆ และหน้าที่ของแต่ละวงจร ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแบบพีโอ วงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ซึ่งจะอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรทางดิจิทัลและวงจรทางแอนะล็อก โดยที่วงจรทางดิจิทัลจะใช้ชุดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA2560 สำหรับการอ่านค่าแรงดันบัลติซีผ่านตัวกรองผ่านแถบ (V_{bpf}) ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวกรองผ่านต่ำที่เป็นตัวกรองแอนะล็อก ตัวกรองผ่านสูงและวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสซึ่งเป็นวงจรดิจิทัล แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_{ol}) และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (I_{Ll}) เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาสัญญาณควบคุม (d_{x1}) ผ่านกระบวนการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับการควบคุมแบบพีโอ จากนั้นส่งข้อมูลออกไปยังไอซีเบอร์ MCP4922 เพื่อส่งค่า d_{x1} ให้กับวงจรทางแอนะล็อกเพื่อสร้างสัญญาณจุดชนวนเกิดให้อุปกรณ์สวิตช์ MOSFET พร้อมทั้งทำหน้าที่ในการแยกกราวด์ระหว่างฝั่งวงจรกำลังและฝั่งวงจรอิเล็กทรอนิกส์แรงต่ำในขณะเดียวกัน โดยวงจรดังกล่าวได้มีการอธิบายการใช้งานและการทำงานของไอซีแต่ละตัวในวงจรไว้พอสังเขป จากนั้นเมื่อชุดทดสอบสามารถทำงานได้ตรงตามการโปรแกรมคำสั่งที่ได้ตั้งไว้

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ดำเนินการวิเคราะห์หาจุดขาดเสถียรภาพของระบบผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงเพื่อคาดเดาจุดที่ระบบเริ่มเกิดการขาดเสถียรภาพ จากนั้นทำการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB และผลการทดสอบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงสามารถคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ในลำดับต่อไปจึงได้ทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 กรณี โดยกรณีแรกเป็นการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยรูปแบบไปหน้าโดยมีการเปลี่ยนแปลงจุดปฏิบัติงานและค่า K_f อยู่ด้วยกัน 2 ค่า เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของค่าอัตราขยาย K_f ที่มีต่อการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จากที่มีสถานะการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและสามารถกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้งภายหลังที่รูปแบบไปหน้าทำงาน โดยมีการโปรแกรมค่า K_f ที่จุดปฏิบัติงานเดียวกันกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 กรณีที่ 2 การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยรูปแบบไปหน้าร่วมกับวิธีการแบบดั้งเดิม เพื่อแสดงถึงสมรรถนะการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวของการหน่วงแบบแอกทีฟด้วยรูปแบบไปหน้า จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า การหน่วงแบบแอกทีฟด้วยรูปแบบไปหน้าที่อาศัยการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H จากวิธีการแบบดั้งเดิมสามารถทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทำงานได้จนถึงค่าพิกัดที่ตั้งไว้ โดยไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น และกรณีสุดท้ายเป็นการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว เพื่อยืนยันเงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานและแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ จากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่า ค่า K_f , ω_L และ ω_H ที่ได้รับการออกแบบผ่านวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวนั้นสามารถชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นภายใต้พิกัดของระบบ อีกทั้งยังให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงถือได้ว่า กลไกการตรวจสอบเสถียรภาพขณะทำการออกแบบและกระบวนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมีประสิทธิภาพ และความน่าเชื่อถือสูง เหมาะสำหรับการนำไปใช้จริงในทางปฏิบัติ

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอชียเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกัน โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เริ่มต้นจากการศึกษาค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันคือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง นอกจากนี้ยังได้เสนอแนวทางสำหรับการต่อ ยอดและพัฒนาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ถือได้ว่าเป็นองค์ความรู้และพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งเพื่อนำไปใช้ต่อยอดและพัฒนาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับผลงานวิจัยและการพัฒนาที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกันจะเริ่มพิจารณาจากระบบแบบวงเปิด (กรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม) ซึ่งเป็นเนื้อหาที่ได้รับการนำเสนอในบทที่ 3 โดยทั่วไปเมื่อทำการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นสวิตช์ของวงจรจะทำให้ได้แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนอย่างมากในการวิเคราะห์ระบบ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้อาศัยพื้นฐานและองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์ในบทที่ 2 เพื่อหาวิธีในการเปลี่ยนแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งพบว่าสามารถทำได้หลายวิธีเช่น วิธีดัดแปลง วิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เป็นต้น สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการแปลงดัดแปลงร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกันที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์วงจรด้วยทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐานสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ผ่านวิธีการที่

ได้นำเสนอทั้ง 2 วิธีนั้นจะทำการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากผลการตรวจสอบความถูกต้องแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขั้นนี้สามารถนำไปต่อยอดและพัฒนาเป็นแบบจำลองของระบบที่มีตัวควบคุม ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพ

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกันของระบบแบบวงปิด (กรณีที่มีตัวควบคุม) ซึ่งเป็นเนื้อหาที่ได้รับคำแนะนำในบทที่ 4 จะอาศัยการต่อยอดและพัฒนาโดยการเพิ่มในส่วนของตัวควบคุมพีไอเข้าไปในระบบแบบวงเปิด หลังจากนั้นทำการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพิ่มเติมเฉพาะส่วนของตัวควบคุมที่ใส่เข้าไปในระบบ แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถทำให้เป็นเชิงเส้นโดยอาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง การใช้วิธีการดังกล่าวจะทำให้ได้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของระบบที่มีเมตริกซ์จาโคเบียน $A(x_0, u_0)$, $B(x_0, u_0)$, $C(x_0, u_0)$ และ $D(x_0, u_0)$ ซึ่งค่าต่าง ๆ ในเมตริกซ์เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมการทำงานวงจรแปลงผันแบบบักกัด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมทางพลวัตของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในอุดมคติมากที่สุด พร้อมทั้งดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่ได้รับการออกแบบผ่านวิธีการแบบดั้งเดิมในลักษณะเช่นเดียวกับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในบทที่ 3 ที่ผ่านมา ลำดับต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกัน จากการศึกษาค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในบทที่ 2 พบว่ามีหลายแนวทางที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน เช่น การวิเคราะห์เสถียรภาพบนระนาบ S ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง การวิเคราะห์เสถียรภาพบนโดเมนความถี่ด้วยเกณฑ์ของมิตเติลบลูค การวิเคราะห์ระนาบเฟส และการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยตรงของเลียปูนอฟ เป็นต้น สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง การหาค่าเจาะจงของระบบสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์ $A(x_0, u_0)$ ของจาโคเบียนเมตริกซ์ ซึ่งระบบจะขาดเสถียรภาพก็ต่อเมื่อค่าเจาะจงเด่นของระบบมีการเคลื่อนที่ไปอยู่ทางด้านขวาของระนาบ S สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB เพื่อแสดงให้เห็นว่า ผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีมีความถูกต้องแม่นยำรวมถึงสามารถคาดเดาแนวโน้มการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างชัดเจน

จากการดำเนินงานที่ผ่านมาเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้ทราบจุดการขาดเสถียรภาพของระบบ แต่ถึงอย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพเป็นเพียงการคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเพื่อหลีกเลี่ยงผลเสียที่ตามมาเท่านั้น แต่ไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อไปจนถึงค่าพิกัดที่ตั้งไว้ ดังนั้นเนื้อหาในบทที่ 5 จึงนำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดิซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกันด้วยลูปย้อนไปหน้า ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียเนื่องจากการการเพิ่มวงจรช่วยเข้าไปในระบบ โดยจะอาศัยเพียงการตรวจจับแรงดันบัสดิซี (V_{dc}) ผ่านตัวกรองผ่านแถบ ($C_{bp}(s)$) โดยตัวกรองผ่านแถบนี้จะกรองสัญญาณความถี่รอบ ๆ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองสัญญาณดิซี จากนั้นนำมาปรับคูณกับค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_p) เพื่อทำหน้าที่ปรับอัตราขยายในการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นการสร้างแรงดันสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ (V_{stab}) และนำไปป้อนรวมกับแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ (V_{o1}^*) สำหรับใช้สร้างแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการใหม่ (V_{ref1}) ของวงจรแปลงผันแบบบักกั ซึ่งผลที่ได้จะทำให้แรงดันเอาต์พุต (V_{o1}) ปรับตามรูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการใหม่ ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านบัสดิซี (I_{dc}) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ (r_L) เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้แรงดันบัสดิซีลดลงเปรียบเสมือนกับการมีอิมพีแดนซ์เสมือน ซึ่งประกอบด้วย ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อขนานกับตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณดิซี จึงทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานได้ถึงค่าพิกัดที่ตั้งไว้ และจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันในบทที่ 2 ยังพบว่าไม่มีงานวิจัยใดนำลูปย้อนไปหน้ามาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดิซี ซึ่งในที่นี้คือวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่จ่ายโหลดวงจรแปลงผันแบบบักกัขนานกัน สำหรับการวิเคราะห์หาค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_p) จะอาศัยการคำนวณผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการเดียวกันกับวิธีการที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 และ บทที่ 4 โดยผลของค่าดังกล่าว เมื่อนำมาพิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง จะเห็นได้ว่าผลของการเพิ่มค่า K_p จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีขีดความสามารถจ่ายระดับกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นเมื่อค่า K_p มีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน อีกทั้งผลของค่าดังกล่าวที่สูงขึ้นจะมีผลต่อการแกว่งของแรงดันบัสดิซีและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองให้มีค่าน้อยลง แต่ถึงอย่างไรก็ตามการเพิ่มค่า K_p ที่มากเกินไปอาจทำให้ระบบกลับมาขาดเสถียรภาพได้ ซึ่งดูได้จากผลการคำนวณค่าเจาะจงที่นำเสนอไว้ในบทที่ 5 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักกั (V_{o1}) จะพบว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปย้อนไปหน้า ซึ่งถือได้ว่าเป็นการหน่วงแบบเอกทิฟด้าน โหลดจะส่งผลทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักกัลดลง ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้

นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของลูบป้อนไปหน้าด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของลูบป้อนไปหน้าที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน ซึ่งเป็นส่วนที่ได้นำเสนอในบทที่ 6 อย่างไรก็ตามการออกแบบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์นั้นจำเป็นต้องอาศัยผลการตอบสนองของโหนดวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ได้จากการออกแบบลูบป้อนไปหน้าด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของผลตอบสนองที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการ ดังนั้นจึงได้ดำเนินการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของลูบป้อนไปหน้า (K_f, ω_L, ω_H) ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดที่ตั้งไว้โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องด้วยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB จากผลการจำลองสถานการณ์ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูบป้อนไปหน้าที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ของลูบป้อนไปหน้าจากวิธีการแบบดั้งเดิมสามารถทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีขีดความสามารถในการจ่ายระดับกำลังไฟฟ้าได้จนถึงค่าพิกัดที่ตั้งไว้

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ลูบป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว สำหรับเนื้อหาในบทที่ 6 จะเป็นวงจรที่มีโครงสร้างเดียวกันกับวงจรที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 แต่จะอาศัยการออกแบบค่า K_f, ω_L และ ω_H ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน เพื่อปรับปรุงสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 ให้ดีขึ้น โดยสิ่งสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการค้นหาของวิธีการดังกล่าว คือ การทดสอบค่าพารามิเตอร์ และการกำหนดขอบเขตการค้นหาที่เหมาะสม สำหรับการนำเสนอผลการออกแบบค่า K_f, ω_L และ ω_H จะพิจารณาผลการลู่เข้าของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวน 5 ครั้ง เพื่อนำมาใช้ในการหาค่า K_f, ω_L และ ω_H ที่ดีที่สุด จากนั้นทำการยืนยันประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของผลการออกแบบด้วยการจำลองสถานการณ์การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 ทั้งหมด 5 ช่วงการทำงาน นอกจากนี้ยังได้แสดงการเปรียบเทียบค่าสมรรถนะของผลตอบสนองที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการในเชิงตัวเลข ซึ่งพบว่า กรณีค่า K_f, ω_L และ ω_H ที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมีสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 ได้ดีกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมอย่างชัดเจน อีกทั้งยังสามารถทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีขีดความสามารถในการจ่ายระดับกำลังไฟฟ้าได้ตลอดทั้ง 5 ช่วงการทำงาน โดยไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัว อย่างไรก็ตาม การยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์อาจไม่เพียงพอต่อความน่าเชื่อถือมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูบป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว เพื่อยืนยันความถูกต้อง

แม่นยำของผลการออกแบบในทางทฤษฎีและผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในลำดับสุดท้ายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยรูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว ซึ่งเป็นเนื้อหาในบทที่ 7 โดยในเบื้องต้นได้ดำเนินการอธิบายเกี่ยวกับอุปกรณ์ของแต่ละวงจรที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูลที่สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ไดโอดเรียงกระแสสามเฟส วงจรแปลงผันแบบบักที่มี การควบคุมแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานฝั่งขาออก และอุปกรณ์สุดท้ายที่เป็นจุดเด่นสำคัญสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์คือ วงจรการสร้างเสถียรภาพด้วยรูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว ซึ่งภายในของวงจรนี้จะอาศัยการทำงานประสานกันระหว่างวงจรทางดิจิทัลและวงจรทางแอนะล็อก ทั้งนี้การนำทั้ง 2 วงจรมาใช้งานด้วยกันเนื่องจากการประมวลผลภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR หรือวงจรทางดิจิทัลอย่างเดียวอาจมีความเร็วของการประมวลผลไม่เพียงพอต่อการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการนำวงจรทางแอนะล็อกมาใช้ร่วมกับวงจรทางดิจิทัล โดยวงจรทางดิจิทัลจะมีหน้าที่ในการอ่านค่าแรงดันบัลลิสต์ที่ผ่านตัวกรองผ่านแถบซึ่งประกอบไปด้วย ตัวกรองผ่านต่ำที่เป็นตัวกรองแอนะล็อก ตัวกรองผ่านสูง และวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสซึ่งเป็นวงจรดิจิทัล แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาสัญญาณควบคุม d_{x1} ตามกระบวนการของรูปป้อนไปหน้าร่วมกับการควบคุมแบบพีไอที่ได้รับการนำเสนอในบทที่ ผ่านมา จากนั้นส่งค่า d_{x1} ไปยังวงจรทางแอนะล็อก ซึ่งโครงสร้างการทำงานของวงจรดังกล่าวได้มีการอธิบายไว้พอสมควร เมื่อชุดทดสอบสามารถทำงานได้อย่างมั่นคง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ดำเนินการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ไว้ ในบทที่ 4 ร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจงเพื่อคาดเดาจุดที่ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ หลังจากนั้นจึงได้ทำการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพไว้ 3 กรณี โดยกรณีแรกเป็นการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยรูปป้อนไปหน้าโดยมีการเปลี่ยนแปลงจุดปฏิบัติงานและค่า K_f อยู่ด้วยกัน 2 ค่า เพื่อแสดงให้เห็นถึง ผลของค่าอัตราขยาย K_f ที่มีต่อการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จากที่มีสถานะการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและสามารถกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้งภายหลังจากที่รูปป้อนไปหน้าทำงาน กรณีที่ 2 การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยรูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการแบบดั้งเดิม เพื่อแสดงถึงสมรรถนะการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวของการหน่วงแบบแอกทิฟด้วยรูปป้อนไปหน้า จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า การหน่วงแบบแอกทิฟด้วยรูปป้อนไปหน้าที่อาศัยการออกแบบค่า K_f , ω_L และ ω_H จากวิธีการแบบดั้งเดิมสามารถทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทำงานได้ตลอดช่วงการ

ทำงาน โดยไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่เพิ่มสูงขึ้น และกรณีที่ 3 เป็นการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว เพื่อยืนยันเงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานและแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักก์ จากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่า ค่า K_r , ω_L และ ω_H ที่ได้รับการออกแบบผ่านวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวนั้นสามารถชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นภายใต้พิกัดของระบบ อีกทั้งยังทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ชุดที่ 1 ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงถือได้ว่า กลไกการตรวจสอบเสถียรภาพขณะทำการออกแบบและกระบวนการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่า W น้อยที่สุดภายในอัลกอริทึม ATS มีประสิทธิภาพ และความน่าเชื่อถือสูง จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้จริงในทางปฏิบัติ

8.2 สรุปจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

- ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ขนานกัน โดยใช้วิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการเปลี่ยนแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ง่ายต่อวิเคราะห์ห้วงจรด้วยทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน รวมถึงสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น นั่นคือ การใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง อีกทั้งยังสามารถนำวิธีการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้แล้วมาประยุกต์ใช้กับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยอุปกรณ์ไปหน้า ซึ่งแบบจำลองที่ได้สามารถนำมาใช้ในการคาดเดาจุดการทำงานที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

- ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำการห้วงแบบแยกทีฟด้านโหลดด้วยอุปกรณ์ไปหน้ามาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ขนานกัน ซึ่งยังไม่พบเห็นงานวิจัยในอดีตถึงปัจจุบันที่นำวิธีการดังกล่าวมาพิจารณาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซี และยิ่งไปกว่านั้นยังได้นำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่าวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมาประยุกต์ใช้กับการห้วงแบบแยกทีฟด้านโหลดด้วยอุปกรณ์ไปหน้าเพื่อใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวิธีการดังกล่าวที่ทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม พร้อมทั้งตรวจสอบเสถียรภาพของระบบในขณะเดียวกัน ซึ่งพบว่าตั้งแต่ในอดีตถึงปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยใด ๆ ดำเนินการในลักษณะเช่นนี้กับการห้วงแบบแยกทีฟด้านโหลด

- ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว เพื่อยืนยันผลการออกแบบลูปป้อนไปหน้าที่ได้จากวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว รวมถึงผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น และเป็นแนวทางในการนำลูปป้อนไปหน้าและวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้กับระบบอื่น ๆ ได้อย่างหลากหลาย ซึ่งได้อธิบายวิธีการออกแบบสำหรับการสร้างวงจรและหลักการทำงานไว้อย่างละเอียดครบถ้วน รวมถึงองค์ความรู้เกี่ยวกับการโปรแกรมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น Mega2560

8.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

- ควรมีการพิจารณาระบบไฟฟ้าที่สอดคล้องกับโครงสร้างที่มีสถาปัตยกรรมใหม่ ตัวอย่างเช่น ระบบไฟฟ้าสำหรับยานพาหนะ ระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน หรือระบบไฟฟ้าที่มีการนำพลังงานทดแทนมาใช้งานในปัจจุบัน เพื่อแสดงถึงการนำองค์ความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น
- ควรมีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูคซึ่งมีสมการในรูปทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบ เนื่องจากจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเมื่อมีการเพิ่มโหลดของระบบมากขึ้นจำเป็นต้องทำการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่ทั้งหมด และยิ่งไปกว่านั้นแบบจำลองที่ได้จะมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก
- ควรมีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยลูปป้อนไปหน้า โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายสำหรับนำมาใช้ในการคำนวณค่า K_f ที่แปรเปลี่ยนไปตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เพื่อให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจนถึงค่าพิกัดของระบบ
- ควรมีการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์อื่น ๆ มาประยุกต์ใช้กับงานด้านการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ตัวอย่างเช่น วิธีจินเนติกอัลกอริทึม (GA) วิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่ม (PSO) เครือข่ายประสาทเทียม (ANN) หรือฟัซซี่ลอจิก (FL) เพื่อให้การบรรเทาการขาดเสถียรภาพมีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- เทพพนม โสภะเพิ่ม (2554). การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกัน. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**
- จักรกริช ภัคดีโต (2557). การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.**
- Middlebrook, R.D. (1967). Input Filter Consideration in Design and Application of Switching Regulators. **IEEE Industry Application Society Annual Meeting.** : 366-382.
- Rivetta, C., Williamson, G. A. and Emadi, A. (2005). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Sea and Undersea Vehicles: Statement of the Problem and Comprehensive Large-Signal Solution. **Proc. IEEE Electric Ship Tech. Symposium.** : 313-320.
- 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.
- Chaijarunudomrung, K., Areerak, K-N. and Areerak, K-L. (2010). Modeling of Three-phase Controlled Rectifier using a DQ method. **2010 International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE 2010).** : 56-59.
- 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.
- 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(8): 767-770.

- 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(3): 992-1000.
- Areerak, K-N., WU, T., Bozhko, S.V., Asher, G.M. and Thomas, D.W.P. (2011). Aircraft power system stability study including effect of voltage control and actuators dynamic. **IEEE Trans. Aerospace and electronic systems.** 47(7): 2574-2589.
- Feng, X., Liu, J. and Lee, F.C. (2002). Impedance Specifications for Stable DC Distributed Power Systems. **IEEE Trans. on Power Electronics.** 17(2): 157-162.
- Griffo, A. and Wang, J. (2008). Large Signal Stability Analysis of DC Power Systems with Constant Power Loads. **Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC'08).**
- Weijing, Du., Junming, Zhang., Yang, Zhang., and Zhaoming, Qian. (2011). Large Signal Stability Analysis Based on Gyrator Model with Constant Power Load. **IEEE Power and Energy Society General Meeting.**
- Griffo, A., and Wang, J. (2012). Large Signal Stability Analysis of More Electric Aircraft Power Systems with Constant Power Loads. **IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems.** 48(1): 477-489.
- Cespedes, M., Xing, L. and Sun, J. (2011). Constant-Power Loads System Stabilization by Passive Damping. **IEEE Trans. Power Electronics.** 26(7): 1832-1836.
- Liu, X. and Ma, S. (2015). Large signal stabilization method of constant power loads by adding R parallel damping filters. **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) :** 1314–1319.
- Rahimi, A. M. and Emadi, A. (2009). Active Damping in DC/DC Power Electronic Converters: A Novel Method to Overcome the Problems of Constant Power Loads. **IEEE Trans. Industrial Electronics.** 56(5): 1428-1439
- Rahimi, A. M., Williamson, G.A. and Emadi, A. (2010). Loop-Cancellation Technique: A Novel Nonlinear Feedback to Overcome the Destabilizing Effect of Constant-Power Loads. **IEEE Trans. Vehicular Tech.** 59(2): 650-661.

- Wu, M., and Lu, D.D.C (2015). A Novel Stabilization Method of LC Input Filter With Constant Power Loads Without Load Performance Compromise in DC Microgrids **IEEE Trans. Industrial Electronics**. 62(7): 4552-4562.
- 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.
- Wu, M., Lu, D. D. C. and Tse, C. (2015). Direct and Optimal Linear Active Methods for Stabilization of LC Input Filters and DC/DC Converters Under Voltage Mode Control. **IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst**. 5(3): 402-412.
- Wu, M. and Lu, D.D.C. (2015). Investigation on Active Method for Stabilization of LC Input Filter and DC/DC Buck Converter under Voltage Mode Control. **IEEE Power Electron. Drive Syst. (PEDS)**. : 721-726.
- Zhang, X., Ruan, X., Kim, H. and Tse, C. K. (2013). Adaptive Active Capacitor Converter for Improving Stability of Cascaded DC Power Supply System. **IEEE Trans. Industrial Electronics**. 59(12): 1807-1816.
- Areerak, K-N., Sopapirm, T., Bozhko, S., Hill, C.I., Suyapan, A. and Areerak, K-L. (2018). Adaptive Stabilization of Uncontrolled Rectifier Based AC-DC Power Systems Feeding Constant Power Loads. **IEEE Trans. Power Electronics**. 33(10): 8927-8935.
- Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Sujitjorn, S. and Kulworawanichpong, T. (2004). Convergence Analysis of Adaptive Tabu Search. **ScienceAsia Research Article**. 30(2): 183-190.
- 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.
- Pakdeeto, J., Chanpittayagit, R., Areerak, K-N. and Areerak, K-L. (2017). The Optimal Controller Design of Buck-Boost Converter by using Adaptive Tabu Search Algorithm Based on State - Space Averaging Model. in **Journal of Electrical Engineering and Technology**. 3(12): 1146-1155.
- Jusoh, A.B. (2004). The Instability Effect of Constant Power Loads. **National Power & Energy Conference (PECon)**. : 175-179.

- Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H. and Williamson, G.A. (2006). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives. **IEEE Trans. on Vehicular Tech.** 55(4): 1112- 1125.
- Sudhoff, S. D. and Wasynczuk, O. (1993) . Analysis and Average-Value Modeling of LineCommutated Converter-Synchronous Machine Systems. **IEEE Trans. on Energy Conversion.** 8(1): 92-99.
- Rim, C.T., Choi, N.S., Cho, G.C. and Cho, G.H. (1994). A Complete DC and AC Analysis of ThreePhase Controlled-Current PWM Rectifier Using Circuit D-Q Transformation. **IEEE Trans. on Power Electronics.** 9(4): 390-396.
- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M. and Thomas, D.W.P. (2008). DQ-transformation approach for modelling and stability analysis of AC-DC power system with controlled PWM rectifier and constant power loads. **Power Electronics and Motion Control Conference.** : 2049-2054.
- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., de Lillo, L., Asher, G.M., Thomas D.W.P., Watson A. and Wu T. (2009). The stability analysis of AC-DC systems including actuator dynamics for aircraft power systems. **13th European Conference on Power Electronics and Applications.** : 1-10.
- Chaijarunudomrung, K., Areerak, K-N. and Areerak, K-L. (2011). Modeling and Stability Analysis of AC-DC Power System with Controlled Rectifier and Constant Power Loads. **WSEAS Transactions on Power Systems.** : 31-41.
- Chanpittayagit, C., Areerak, K-N. and Areerak, K-L. (2014). Modeling of AC-DC Power System Feeding a Controlled Buck-Boost Converter. **11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON).**
- 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.
- Liu, X.Y. and Forsyth, A.J. (2005). Comparative Study of Stabilizing Controllers for Brushless DC Motor Drive Systems. **IEEE International Conference on Electric Machines and Drives.** : 1725-1731.

- Liu, X.Y., 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.
- Usman Iftikhar, M., Godoy, E., Lefranc, P., Sadarnac D. and Karimi C. (2008). A Control Strategy to Stabilize PWM DC-DC Converters with Input Filters Using State-Feedback and Pole-Placement. **INTELEC 2008 - 2008 IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference**. : 1-5.
- Weaver, W.W. and Krein, P.T. (2009). Optimal Geometric Control of Power Buffer. **IEEE Trans. On Power Electronics**. 24(6): 1248-1258.
- 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.
- Zhang, X., Ruan, X. and Kim, H. (2013). Adaptive active capacitor converter for improving stability of cascaded DC power supply system. **IEEE Trans Power Electron**. 28(4): 1807–1816.
- Inoue, K., Kato, T. and Inoue, M. (2012). An oscillation suppression method of a DC power supply system with a constant power load and a LC filter. **IEEE 13th workshop on control and modeling for power electronics (COMPEL'12)**.
- Magne, P., Marx, D., Nahid-Mobarakkeh, B. and Pierfederic, S. (2012). Large-Signal Stabilization of a DC-Link Supplying a Constant Power Load Using a Virtual Capacitor: Impact on the Domain of Attraction. **IEEE Trans. on Indus. Appl**. 48(3): 878-887.
- Zhao, Y., Qiao, W. and Ha, D. (2014). A Sliding-Mode Duty-Ratio Controller for DC/DC Buck Converters With Constant Power Loads. **IEEE Trans. on Indus. Appl**. 50(2): 1448-1458.
- Sopapirm, T., Areerak, K-N. and 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.
- Sopapirm, T. (2018). Instability Mitigation of a Three-Phase Diode Rectifier Feeding a Controlled Buck Converter By using the Active Damping Method. **International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**. : 745–748.
- Gamelin, T.W. (2000). Complex Analysis.

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular emblem with a book and a sunburst. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' (Mahavithayalai Technology Suranaree) is written in a circular path around the emblem.

ภาคผนวก ก

โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณหาค่า λ
ด้วยการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราบฟสัน

โปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าและการคำนวณหาค่า λ ด้วยการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์
ของนิวตัน – رافสัน โดยนายรัฐพล โพธิ์สังข์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2564

%%%ประกาศค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้สำหรับการคำนวณค่าในสภาวะคงตัว%%%

clc

clear all

Vs=50;

f=50;

Req=0.1;

Leq=24e-6;

Ceq=2e-9;

w=2*pi*f;

ru=3*w*Leq/pi;

rf=0.01;

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

r=atand(w*Leq/Req);

Z=sqrt(Req^2+(w*Leq)^2);

%%%พารามิเตอร์ของวงจร buck converter ตัวที่ 1

R1=10;

L1=15e-3;

C1=1000e-6;

d1=0.4;

%%%พารามิเตอร์ของวงจร buck converter ตัวที่ 2

R2=10;

L2=15e-3;

C2=1000e-6;

d2=0.4;

%%%% ค่าแรงดัน และกำลังไฟฟ้า %%%%%%%%%%

```

vo_1=(3*sqrt(3)*Vs*sqrt(2)/pi)*d1;
vo_2=(3*sqrt(3)*Vs*sqrt(2)/pi)*d2;
P_Total=((vo_1^2)/R1)+((vo_2^2)/R2);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
eaVbus=100;
ealampda=100;
es=1e-10;
k=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
while eaVbus>=es & ealampda>=es
    if k~=0
        du= Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*cosd(r)/Z;
        DU=Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z;
        dv= Vs*sind(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*sind(r)/Z;
        DV=-Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z;
        U= Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*cosd(r)/Z - P_Total/3;
        V= Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*sind(r)/Z;
        Vbus(k+1)= Vbus(k)- (U*Dv-V*Du)/(du*Dv-DU*dv);
        lampda(k+1)= lampda(k)- (V*du-U*dv)/(du*Dv-DU*dv);
        eaVbus=abs((Vbus(k+1)-Vbus(k))/Vbus(k+1))*100 ;
        ealampda=abs((lampda(k+1)-lampda(k))/lampda(k+1))*100;
        V_bus=Vbus(k+1);
        L=lampda(k+1);
        A1=Vs-Vbus(k+1)*(cosd(lampda(k+1))-i*sind(lampda(k+1)));
        B1=Z*(cosd(r)+i*sind(r));
        Idc=(pi/(sqrt(6)))*abs(A1/B1);
        Vout(k+1)=(3*sqrt(6)*Vbus(k+1)/pi) - 3*Leq*w*Idc/pi - rf*Idc;
        V=Vout(k+1);
    else
        Vbus(k+1)=60;

```

```

    lampda(k+1)=0.0001;
end
k=k+1;
end
%%%ค่าในสภาวะคงตัวทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีของนิวตัน - رافสัน
Lampda_degree=L
Lampda_radian=(1/180)*pi*Lampda_degree
vdc=V;

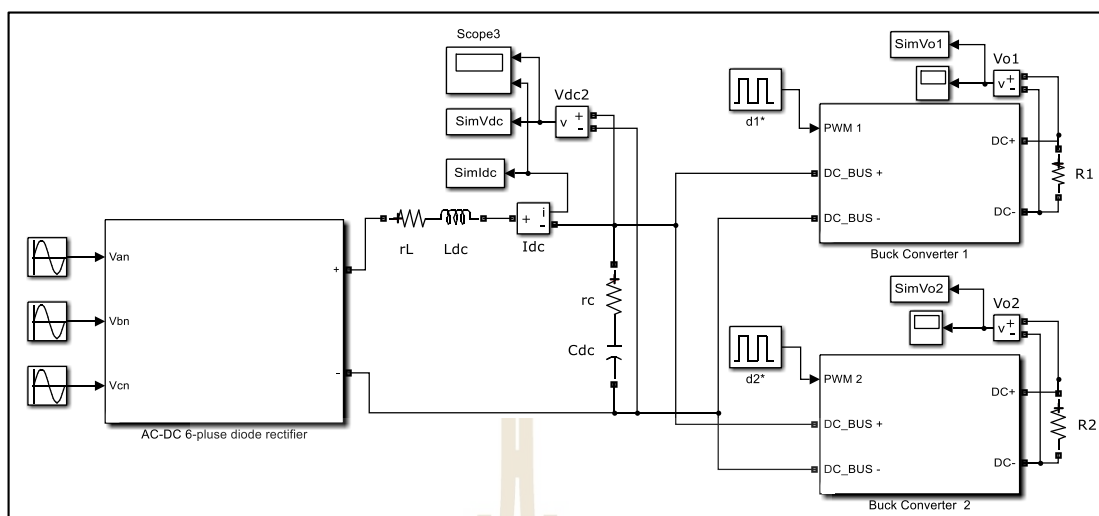
```



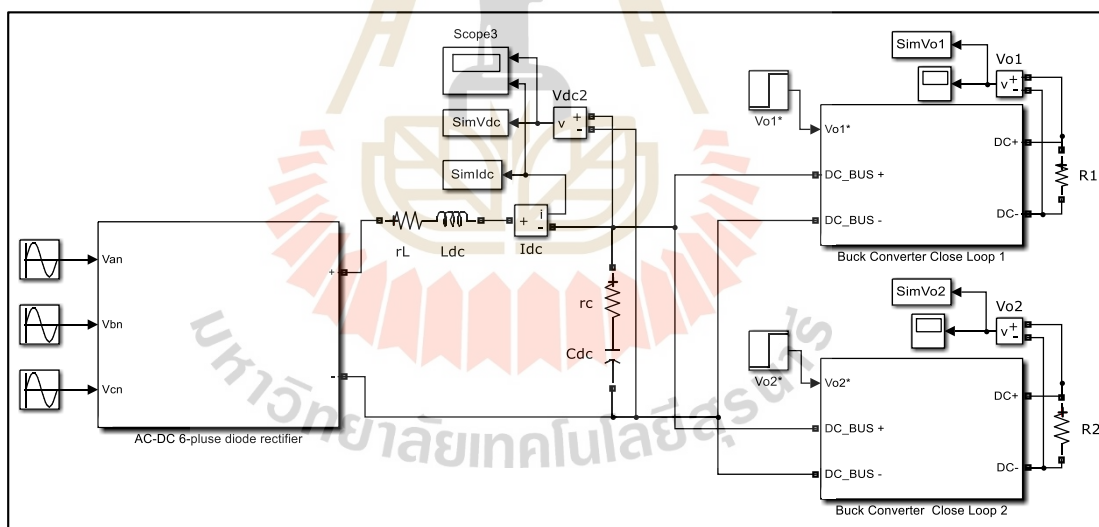


ภาคผนวก ข

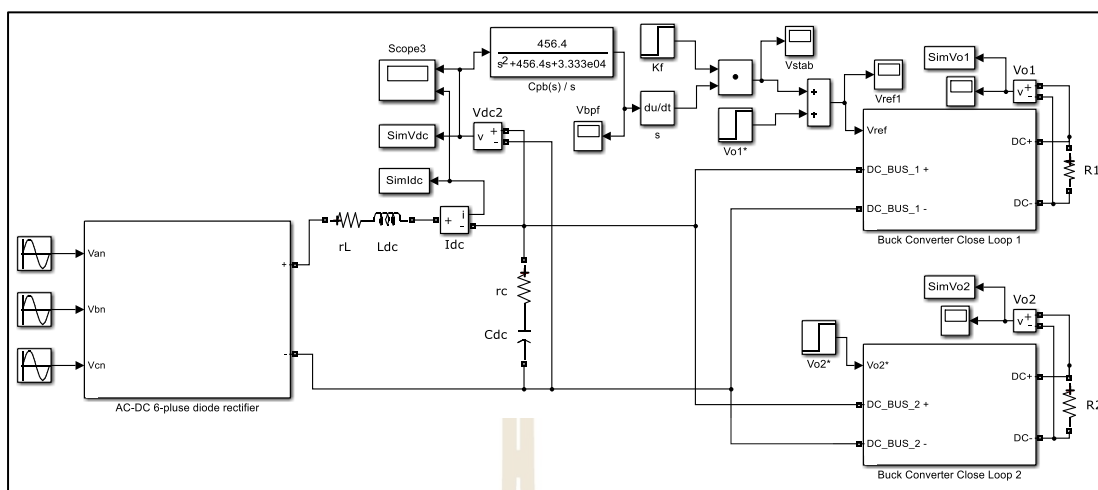
ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB



รูปที่ ข.1 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้า
ที่พิจารณากรณีไม่มีการควบคุม



รูปที่ ข.2 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้า
ที่พิจารณากรณีมีการควบคุม



รูปที่ ข.3 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้า
ที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยอุปกรณ์ไปหน้า

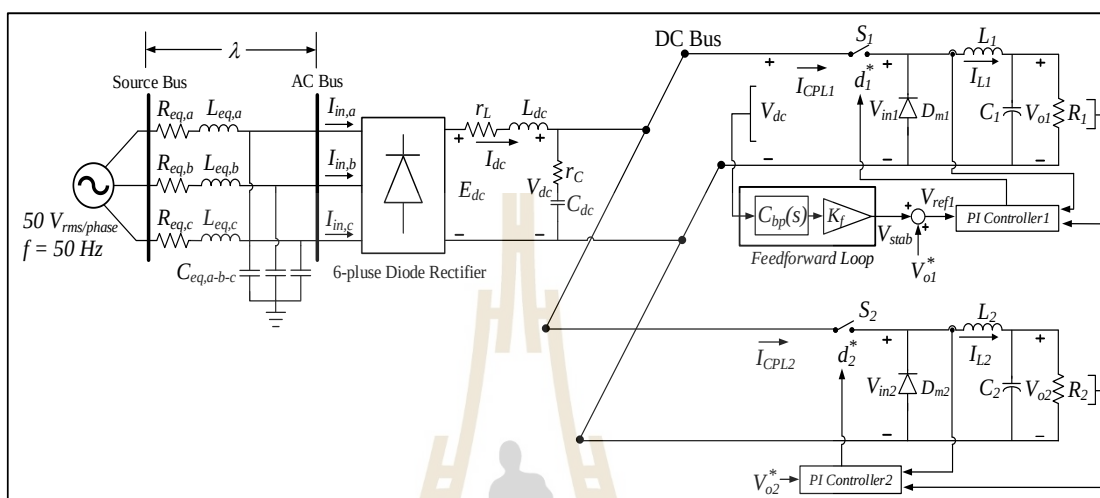
The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a pedestal, flanked by two stylized, upward-curving lines that resemble a traditional Thai architectural element. Below the figure is a circular emblem with a book and a torch. The entire logo is surrounded by a circular border with Thai text.

ภาคผนวก ค

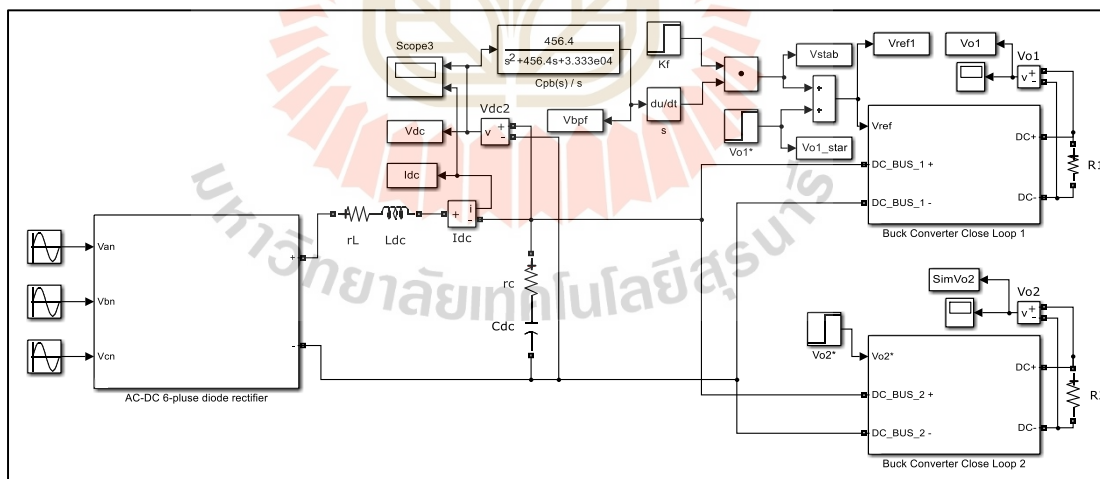
ผลการจำลองสถานการณ์หลักการทำงานของตู้ป้อนไปหน้า
ด้วยโปรแกรม MATLAB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การจำลองสถานการณ์หลักการทำงานของวงจรรูปเปลี่ยนไปหน้าในรูปที่ ค.1 จะอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะแสดงการต่อวงจรได้ดังรูปที่ ค.2

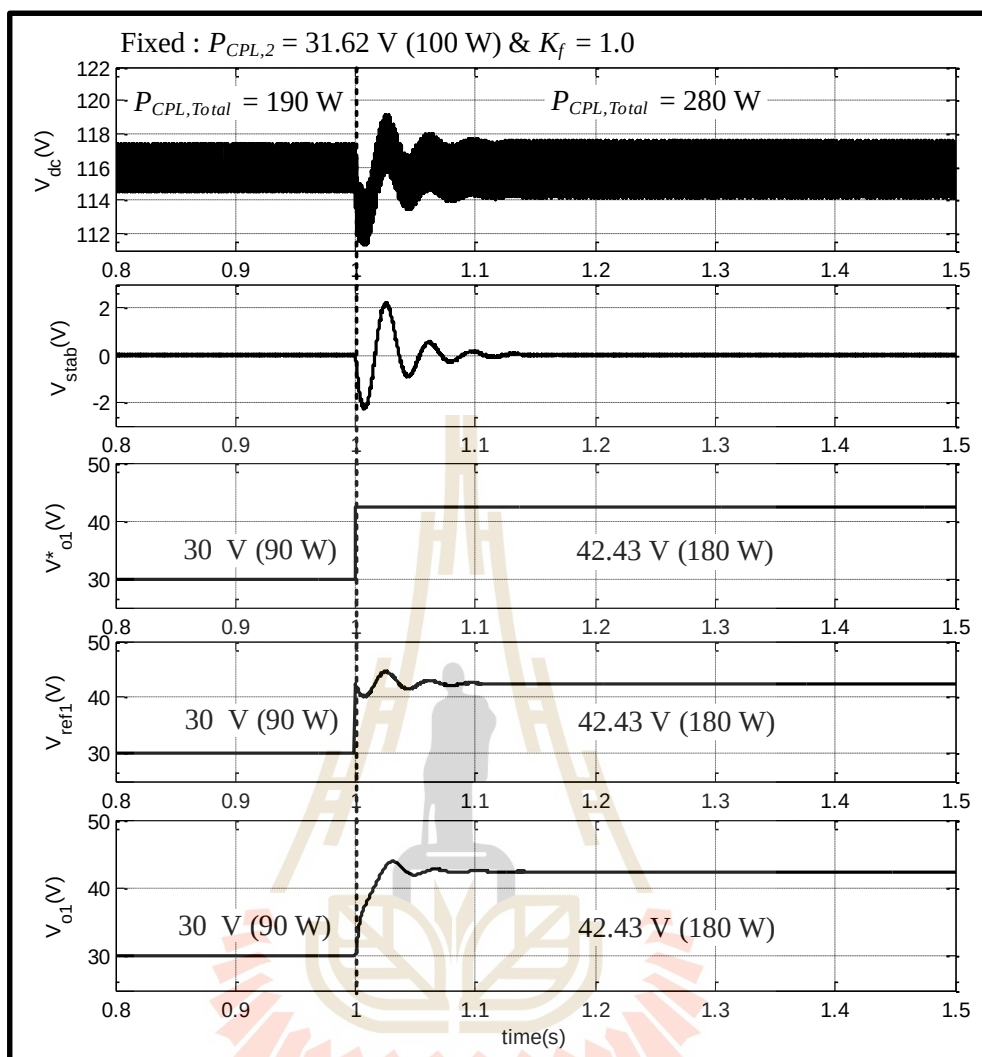


รูปที่ ค.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาหลักการทำงานของรูปเปลี่ยนไปหน้า



รูปที่ ค.2 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

ผลการจำลองสถานการณ์ของ V_{dc} , V_{stab} , V_{o1}^* , V_{ref1} และ V_{o1} เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงผลรวมของระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก์ทั้ง 2 ชุด ($P_{CPL, Total}$) จาก 190 W ไปเป็น 280 W ที่เวลา 1.0 วินาที และกำหนดให้ K_f มีค่าเท่ากับ 1.0 แสดงดังรูปที่ ค.3



รูปที่ ค.3 ผลการจำลองสถานการณ์ของ V_{dc} , V_{stab} , V_{o1}^* , V_{ref1} และ V_{o1} เมื่อกำหนดให้ $K_f = 1.0$

จากรูปที่ ค.3 จะสังเกตเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ (V_{stab}) ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของลูบป้อนไปหน้า ในสถานะชั่วคราวจะมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตดีซี (V_{dc}) ที่ผ่านตัวกรองผ่านแถบ ($C_{bp}(s)$) และนำมาปรับคูณกับค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_f) ในขณะที่ในสถานะอยู่ตัว V_{stab} จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากได้ผ่านพจน์การอนุพันธ์ (du/dt หรือ s) ดังแสดงในรูปที่ ค.2 จากพฤติกรรมทางพลวัตดังกล่าวจึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ต้องการใหม่ (V_{ref1}) ซึ่งเกิดจากการนำเอาแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ต้องการของวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 1 (V_{o1}^*) มารวมกับ V_{stab} มีค่าในสถานะอยู่ตัวเท่ากับ V_{o1}^* หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ วงจรการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูบป้อนไปหน้าจะส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัก์ชดที่ 1 (V_{o1}) เพียงในสถานะชั่วคราวเท่านั้น

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a pedestal, flanked by two stylized 'H' shapes. Below this is a circular emblem with a book and a sunburst. The entire logo is encircled by a red and white border.

ภาคผนวก ง

ตารางผลการทดสอบพารามิเตอร์ของการค้นหาสำหรับวิธีการทาง

ปัญญาประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวเพื่อใช้ในการออกแบบรูปป้อนไปหน้า

การทดสอบหาค่าจำนวนคำตอบเริ่มต้นได้ทำการทดสอบที่ค่าเท่ากับ 10 20 30 40 และ 50 คำตอบ ดังตารางที่ ง.1 โดยกำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 10 รอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ ค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 20 เปอร์เซนต์ และอัตราปรับลดรัศมีการค้นหาเท่ากับ 1.3

ตารางที่ ง.1 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ครั้งที่	ค่า W				
	จำนวนคำตอบเริ่มต้น (คำตอบ)				
	10	20	30	40	50
1	0.7902	0.7847	0.7869	0.8011	0.7963
2	0.7894	0.7847	0.7989	0.7876	0.7993
3	0.7950	0.7986	0.7907	0.7848	0.7845
4	0.8023	0.7920	0.7901	0.7944	0.7835
5	0.7964	0.7877	0.7930	0.7950	0.7923
ค่าเฉลี่ย	0.7947	0.7895	0.7919	0.7926	0.7912

การทดสอบหาค่าจำนวนคำตอบรอบข้างได้ทำการทดสอบที่ค่าเท่ากับ 10 20 30 40 และ 50 คำตอบ ดังตารางที่ ง.2 โดยกำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 10 รอบ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ ค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 20 เปอร์เซนต์ และอัตราปรับลดรัศมีการค้นหาเท่ากับ 1.3

ตารางที่ ง.2 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ค่า w					
ครั้งที่	จำนวนคำตอบรอบข้าง (คำตอบ)				
	10	20	30	40	50
1	0.7913	0.7873	0.7812	0.7954	0.7959
2	0.7946	0.8003	0.7832	0.7853	0.7813
3	0.7977	0.8006	0.7928	0.789	0.783
4	0.7976	0.8002	0.7926	0.7854	0.7959
5	0.7943	0.8009	0.7832	0.7890	0.7830
ค่าเฉลี่ย	0.7951	0.7979	0.7866	0.7888	0.7878

การทดสอบหาค่ารัศมีการค้นหาได้ทำการทดสอบที่ค่าเท่ากับ 20 30 40 50 และ 60 เปอร์เซนต์ ดังตารางที่ ง.3 โดยกำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 10 รอบ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ และอัตราปรับลดรัศมีการค้นหาเท่ากับ 1.3

ตารางที่ ง.3 การทดสอบค่ารัศมีการค้นหา

ค่า w					
ครั้งที่	ค่ารัศมีการค้นหา (เปอร์เซนต์)				
	20	30	40	50	60
1	0.7878	0.7938	0.7827	0.7814	0.7976
2	0.7836	0.7863	0.7831	0.7917	0.7908
3	0.7815	0.7827	0.7936	0.7837	0.7932
4	0.7934	0.7938	0.7969	0.7823	0.7835
5	0.7876	0.7988	0.7902	0.7832	0.7967
ค่าเฉลี่ย	0.7868	0.7911	0.7893	0.7845	0.7924

การทดสอบหาค่าอัตราปรับลดครีมีได้ทำการทดสอบที่ค่าเท่ากับ 1.1 1.2 1.3 1.4 และ 1.5 ดังตารางที่ ง.4 โดยกำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 10 รอบ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ และค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ง.4 การทดสอบค่าอัตราปรับลดครีมี

ค่า w					
ครั้งที่	ค่าอัตราปรับลดครีมี				
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
1	0.8024	0.8014	0.7953	0.7829	0.7854
2	0.7903	0.7839	0.7946	0.7869	0.7994
3	0.7863	0.7860	0.7971	0.7927	0.8007
4	0.7986	0.7905	0.7865	0.7988	0.7919
5	0.8035	0.8001	0.7818	0.798	0.7989
ค่าเฉลี่ย	0.7962	0.7924	0.7911	0.7919	0.7953

จากตารางที่ ง.1 – ง.4 เมื่อพิจารณาจากค่า w เฉลี่ยที่มีค่าน้อยที่สุดผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกใช้ค่าจำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 20 คำตอบ, จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ, ค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ และอัตราปรับลดครีมีเท่ากับ 1.3

ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวเพื่อใช้ในการออกแบบรูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบจริง

การทดสอบหาค่าจำนวนคำตอบเริ่มต้นได้ทำการทดสอบที่ค่าเท่ากับ 20 30 40 50 และ 60 คำตอบ ดังตารางที่ ๖.5 โดยกำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 10 รอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ ค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 50 เปอร์เซนต์ และอัตราปรับลดรัศมีการค้นหาเท่ากับ 1.3

ตารางที่ ๖.5 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้นของระบบจริง

ครั้งที่	ค่า W				
	จำนวนคำตอบเริ่มต้น (คำตอบ)				
	20	30	40	50	60
1	0.6343	0.6358	0.6346	0.6341	0.6345
2	0.6348	0.6344	0.6345	0.6343	0.6394
3	0.6345	0.6349	0.6344	0.6345	0.6498
4	0.6362	0.6344	0.6345	0.6344	0.6303
5	0.6344	0.6344	0.6350	0.6350	0.6407
ค่าเฉลี่ย	0.63484	0.63478	0.6346	0.63446	0.63894

การทดสอบหาค่าจำนวนคำตอบรอบข้างได้ทำการทดสอบที่ค่าเท่ากับ 10 20 30 40 และ 50 คำตอบ ดังตารางที่ ๖.6 โดยกำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 10 รอบ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ ค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 50 เปอร์เซนต์ และอัตราปรับลดรัศมีการค้นหาเท่ากับ 1.3

ตารางที่ ง.6 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้างของระบบจริง

ค่า w					
ครั้งที่	จำนวนคำตอบรอบข้าง (คำตอบ)				
	10	20	30	40	50
1	0.6357	0.6344	0.6348	0.6345	0.6343
2	0.6373	0.6348	0.6343	0.6351	0.6344
3	0.6358	0.6349	0.6345	0.6343	0.6358
4	0.6348	0.6344	0.6342	0.6343	0.6349
5	0.6353	0.6365	0.6345	0.6344	0.6351
ค่าเฉลี่ย	0.63578	0.635	0.63446	0.63452	0.6349

การทดสอบหาค่ารัศมีการค้นหาได้ทำการทดสอบที่ค่าเท่ากับ 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซนต์ ดังตารางที่ ง.7 โดยกำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 10 รอบ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ และอัตราปรับลดรัศมีการค้นหาเท่ากับ 1.3

ตารางที่ ง.7 การทดสอบค่ารัศมีการค้นหาของระบบจริง

ค่า w					
ครั้งที่	ค่ารัศมีการค้นหา (เปอร์เซนต์)				
	10	20	30	40	50
1	0.6365	0.6342	0.6366	0.6342	0.6344
2	0.6349	0.6371	0.6358	0.6349	0.6345
3	0.636	0.6342	0.6351	0.6342	0.6344
4	0.6358	0.6342	0.6343	0.6345	0.6343
5	0.6346	0.6344	0.6343	0.6343	0.6351
ค่าเฉลี่ย	0.63556	0.63482	0.63522	0.63442	0.63454

การทดสอบหาค่าอัตราปรับลดครีมีได้ทำการทดสอบที่ค่าเท่ากับ 1.2 1.3 1.4 1.5 และ 1.6 ดังตารางที่ ง.8 โดยกำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 10 รอบ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ และค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ง.8 การทดสอบค่าอัตราปรับลดครีมีของระบบจริง

ค่า w					
ครั้งที่	ค่าอัตราปรับลดครีมี				
	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
1	0.6346	0.6343	0.6342	0.6342	0.635
2	0.6344	0.6343	0.6344	0.6342	0.6344
3	0.6343	0.6349	0.6344	0.6350	0.6353
4	0.6345	0.6343	0.6343	0.6352	0.6352
5	0.6358	0.6342	0.6343	0.6355	0.6345
ค่าเฉลี่ย	0.63472	0.6344	0.63432	0.63482	0.63488

จากตารางที่ ง.5 – ง.8 เมื่อพิจารณาจากค่า w เฉลี่ยที่มีค่าน้อยที่สุดผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกใช้ค่าจำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 คำตอบ, จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 30 คำตอบ, ค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ และอัตราปรับลดครีมีเท่ากับ 1.4

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular emblem with a book and a sunburst. The text "มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี" (Mahavithayalai Technology Suranaree) is written in a circular path around the emblem.

ภาคผนวก จ

รายละเอียดการโปรแกรมตัวควบคุมไฟที่มีดูป้อนไปหน้าสำหรับ
การสร้างเสถียรภาพโดยใช้บอร์ด Arduino Mega2560

```

*****
โปรแกรมการควบคุมวงจรรูปป้อนไปหน้าด้วยชุดบอร์ด Arduino Mega2560
โดยนายรัฐพล โพธิ์สังข์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
พ.ศ. 2564
*****

%การประกาศเรียกใช้งานไฟล์ในไลบรารีของบอร์ด Arduino Mega2560

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include<compat/deprecated.h>
%ประกาศตัวแปรที่ใช้สำหรับการรับค่าแอนะล็อกเป็นดิจิตอลของตัวควบคุมพีไอและส่วนอื่น ๆ
float V_o_buck=0,V_o_act,V_o,V=40;
float I_L_buck=0,I_L_act,I_L;
int d;
%ประกาศตัวแปรที่ใช้งานสำหรับการรับค่าแอนะล็อกเป็นดิจิตอลของรูปป้อนไปหน้าและส่วนอื่น ๆ
float V_L_buck=0,V_L_act,V_L,V_bpf,V_stab,V_ref,WL=71.64,WH=286.57;
float V_L_old=0,VH_keep_old=0,VH_keep,K_BPF=(WL+WH)/WH,K_f=0.25;
%กำหนดตัวแปรที่ใช้งานของตัวควบคุมพีไอ
float kp=0.1513,kiv=15.7914,kpi=1.4102,kii=1265.8,Ts=0.00058;
float err_v,Upv,Uiv,Uiv_1=0,Upi_v;
float err_i,Upi,Uii,Uii_1=0,Upi_i;
int Upi_max=4095,Upi_min=0;
%กำหนดช่องสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะล็อก
int CS = 41;
int SCX= 43;
int SDI = 45;
int LDAC = 47;
int SHDN = 49;
% เข้าสู่ฟังก์ชันการตั้งค่า CPU ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เพื่อใช้งาน
ช่องสื่อสาร DAC
void Write_MCP4922(unsigned char DAC_Chanel,unsigned int DAC_Data)

```

```

{ digitalWrite(CS,LOW);
switch(DAC_Chanel)
{
    case 0x00 : DAC_Data |=0x3000;
break;
    case 0x01 : DAC_Data |=0xB000;
break;
}
shiftOut(SDI,SCX,MSBFIRST,(DAC_Data>>8)&0xFF);
shiftOut(SDI,SCX,MSBFIRST,DAC_Data&0xFF);
digitalWrite(CS,HIGH) ;
digitalWrite(LDAC,LOW) ;
digitalWrite(LDAC,HIGH);
}

```

% เข้าสู่ฟังก์ชัน setup เพื่อตั้งค่าต่าง ๆ

```

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    pinMode(CS,OUTPUT);
    pinMode(SCX,OUTPUT);
    pinMode(SDI,OUTPUT);
    pinMode(LDAC,OUTPUT);
    pinMode(SHDN,OUTPUT);
    digitalWrite(CS,HIGH);
    digitalWrite(SCX,LOW);
    digitalWrite(SDI,LOW);
    digitalWrite(LDAC,HIGH);
    digitalWrite(SHDN,HIGH); }

```

% เข้าสู่ฟังก์ชันการทำงานลูปไม่รู้จบ

```

void loop() {

```

```

while(1){
% อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจากวงจรตรวจจับสนแรงดันไฟฟ้า
V_o_buck=analogRead(A0);
V_o_act=(V_o_buck*5)/1023;
V_o = V_o_act*100+0.8768;
% อ่านค่ากระแสไฟฟ้าจากวงจรตรวจจับสนกระแสไฟฟ้า
I_L_buck=analogRead(A1);
I_L_act=I_L_buck*5/1023;
I_L = (6.352*I_L_act)+0.06818;
% อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจากวงจรตรวจจับสนแรงดันแบตเตอรี่ที่ผ่านตัวกรองผ่านต่ำ
V_L_buck=analogRead(A3);
V_L_act=(V_L_buck*5)/1023;
V_L=(50.6*V_L_act)+1.3288;
% เข้าสู่กระบวนการของลูปป้อนไปหน้าและการควบคุมแบบพีไอ
VH_keep= VH_keep_old+ V_L-V_L_old-WL*Ts* VH_keep
V_bpf=K_BPF*VH_keep;
V_stab=K_f*V_bpf;
V_ref=V+V_stab;
err_v=V_ref-V_o;
Upv=kpv*err_v;
Uiv=(kiv*Ts*err_v)+Uiv_1;
Upi_v=Upv+Uiv;
if (Upi_v >= Upi_max)
{Upi_v= Upi_max;}
else if (Upi_v <= Upi_min)
{Upi_v= Upi_min;}
err_i=Upi_v-I_L;
Upi=kpi*err_i;
Uii=(kii*Ts*err_i)+Uii_1;
Upi_i=Upi+Uii;

```

```

if (Upi_i >= Upi_max)
    {Upi_i= Upi_max;}
else if (Upi_i <= Upi_min)
    {Upi_i= Upi_min;}
d=Upi_i;
Write_MCP4922(0,d);
% อัปเดตค่าความผิดพลาดของตัวควบคุมพีไอและอัปเดตค่าแรงดันไฟฟ้าของดูป้อนไปหน้า
    Uiv_1=Uiv;
    Uii_1=Uii;
V_L_old=V_L;
VH_keep_old=VH_keep;
    }
}

```





รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รัฐพล โพธิ์สังข์, เทพพนม โสภะเพิ่ม, กองพันธ์ อารีรักษ์. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดัชนีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ดูป้อนไปหน้า. การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 11, อุบลราชธานี, 4-7 มิถุนายน 2562, Vol. 1, หน้า 98- 101.

รัฐพล โพธิ์สังข์, เทพพนม โสภะเพิ่ม, กองพันธ์ อารีรักษ์. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดัชนีที่จ่ายโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ขนานกันที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยดูป้อนไปหน้า. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42, นครราชสีมา, 30 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน 2562, Vol. 1, หน้า 137- 140.

รัฐพล โพธิ์สังข์, เทพพนม โสภะเพิ่ม, กองพันธ์ อารีรักษ์. การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่จ่ายโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมโดยใช้วงรอบป้อนไปหน้า. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน- ธันวาคม 2562 หน้า 22-34.



บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประจักษ์ ครั้งที่ 11

11th ECTI-CARD 2019, Ubon Ratchathani Thailand

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ลูปป้อนไปหน้า

Mathematical Model of AC-DC Power Systems Feeding Constant Power Loads for Instability Mitigation by Using Feedforward Loop

รัฐพล โพธิ์สังข์¹ เทพพนม โสภณพิน² กองพัน อารีรักษ์¹¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โทรศัพท์ 044-224-520 E-mail: kongpan@sut.ac.th²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร โทรศัพท์ 02-988-3655 E-mail: sthepp68@mut.ac.th

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ลูปป้อนไปหน้า ซึ่งโดยทั่วไปการหาแบบจำลองของระบบดังกล่าวจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นกับเวลา อันเนื่องมาจากอุปกรณ์สวิตช์ และเมื่อนำแบบจำลองไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ จะทำให้มีความซับซ้อนยุ่งยาก ดังนั้นในบทความนี้จะนำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นแบบจำลองไม่ขึ้นกับเวลา โดยใช้วิธีร่วมกันระหว่างวิธีดิคคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งจะช่วยให้การวิเคราะห์เสถียรภาพการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยผลการเปรียบเทียบด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองให้ผลตอบสนองถูกต้องทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ, ลูปป้อนไปหน้า, วิธีดิคคิว, วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

Abstract

This paper presents mathematical model for systems that have instability mitigation by using feedforward loop. Generally, the mathematical model is time-varying due to the switching action. The time-varying model is very complex for the stability analysis. Thus, this paper presents how to derive the time-invariant model using the combination between the DQ method and the generalized state-space averaging method which is easy for the stability analysis. The proposed model is validated by the intensive time-domain in MATLAB. The results perform that the proposed model can provide the accurate response in both transient and steady-state.

Keywords: Mathematical model, Instability mitigation, Feedforward loop, DQ method, GSSA-method

1. บทนำ

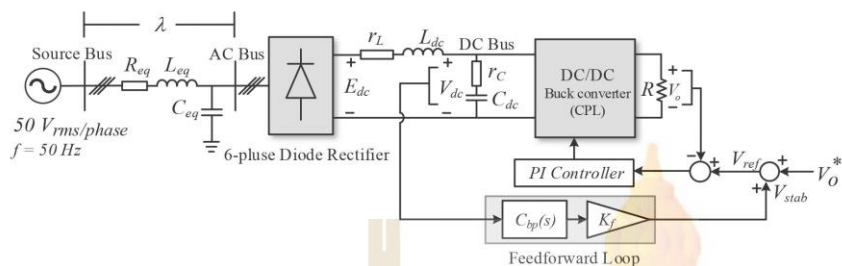
ในปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นที่นิยมใช้งานด้านอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน อาทิเช่น วงจรแปลงผันไฟฟ้าดิซีเป็นดิซี และมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมความเร็ว เป็นต้น ซึ่งโหลดดังกล่าวมักมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว [1] และจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง หรือส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ จากสาเหตุดังกล่าว จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องแก้ปัญหาเหล่านี้โดยการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ในบทความนี้เลือกวิธีการหนึ่งแบบแอคทีฟ (Active Damping Method) โดยใช้ลูปป้อนไปหน้า [2] ซึ่งอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่ช่วงเวลาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบพร้อมทั้งการออกแบบลูปป้อนไปหน้า เมื่อพิจารณาถึงระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้ประกอบไปด้วยวงจรแปลงผันกำลังพบว่าแบบจำลองของระบบดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่ช่วงเวลา อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ในวงจร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการกำจัดผลของกรตวิคซ์ในวงจร ด้วยเหตุผลดังกล่าวในบทความนี้จะนำเสนอวิธีที่สุ่มหาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่ช่วงเวลา [3] ของระบบดังกล่าวด้วยวิธีการผสมผสานระหว่างวิธีดิคคิว (DQ method) [4] และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method: GSSA method) [5] สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจะอาศัยการเปรียบเทียบผลตอบสนองทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัวที่ได้จากแบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้ กับผลการตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB จากผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่าการสุ่มหาแบบจำลองที่ได้นำเสนอในบทความนี้ให้แบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบพร้อมทั้งการออกแบบลูปป้อนไปหน้าต่อไปได้ในอนาคต

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประจักษ์ ครั้งที่ 11

11th ECTI-CARD 2019, Ubon Ratchathani Thailandงานประชุมวิชาการระดับชาติ
ECTI-CARD 2019

99



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

บทความนี้ประกอบไปด้วย 5 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 อธิบายเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่ 3 กล่าวถึง การพิสูจน์แบบจำลองด้วยวิธีวิเคราะห์และวิธีแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ทั่วไป การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้รับการนำเสนอในส่วนที่ 4 และส่วนที่ 5 เป็นการสรุปข้อดีของวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

บทความนี้ได้พิจารณาในระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุลสามสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ผ่านวงจรกรองสัญญาณคลื่นที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันแบบบัลคที่มีกรควบคุมซึ่งต่อกับอุปป์้อนไปหน้า แสดงได้ดังรูปที่ 1 สำหรับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทความนี้ได้อธิบายไว้ของการทำงานแบบจำลองคือ พิจารณาเฉพาะโหมดการทำงานกระแสต่อเนื่องและ ไม่พิจารณาโหมดอื่นที่เกิดขึ้นในระบบ โดยจะใช้วิธีวิเคราะห์ร่วมกับวิธีแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ทั่วไปในการแปลงระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ให้เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนดิกัว และทำให้แบบจำลองที่ได้เปลี่ยนไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา เพื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพและ ออกแบบอุปป์้อนไปหน้าต่อไป

3. การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับบทความนี้ อาศัยวิธีวิเคราะห์เพื่อแปลงวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ให้อยู่บนแกนดิกัว โดยเมื่อพิจารณาผลจาก L_{dc} ด้านไฟฟ้ากระแสส่งผลให้เกิดมุมเลื่อน ซึ่งทำให้แรงดันเอาต์พุตตก ผลกระทบเหล่านี้สามารถแทนด้วยค่าความต้านทานปรับค่าได้ r_μ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

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

เมื่อพิจารณาถึงฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟส โดยใช้วิธีวิเคราะห์เพื่อเปลี่ยนสมการฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอด จะได้ดังสมการที่ (2) ซึ่งพบว่าสมการดังกล่าวไม่มีตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา

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

โดยที่ ϕ_1 คือ มุมเฟสของแกนหมุนดิกัว และ ϕ คือ มุมเฟสของบัสแรงดันเอซี

สำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ต่อผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าสามารแปลงให้อยู่บนแกนดิกัว [6] ซึ่งจะให้เป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นสามารถนำไปเขียนเป็นวงจรสมมูลบนแกนดิกัวได้ ดังรูปที่ 2 โดยกำหนดให้มุมเฟสของแกนหมุนดิกัวเท่ากับมุมเฟสของบัสแรงดันเอซี ($\phi_1 = \phi$) เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง จากรูปที่ 2 พบว่าทางฝั่งแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อใช้วิธีดิกัวจะทำให้ได้วงจรสมมูลบนแกนดิกัว ซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์วงจรด้วยทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน รวมไปถึงการกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าจะได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับเวลา

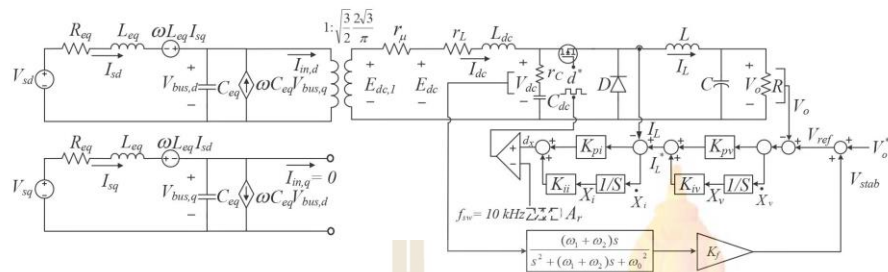
ถ้าดับลดไปจะใช้วิธีแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ทั่วไปพิจารณาไดโอด คือ วงจรแปลงผันแบบบัลคที่มีการควบคุมเชื่อมต่อกับอุปป์้อนไปหน้า ซึ่งประกอบไปด้วยตัวกรองผ่านแถบ ($C_{bf}(s)$) และอัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_f) เพื่อการวัดฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัลค โดยฟังก์ชันการสวิตช์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ (3)

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

เมื่อ T_s และ d คือ คาบการสวิตช์และค่าวัฏจักรหน้าที่ ตามลำดับ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประจักษ์ ครั้งที่ 11

11th ECTI-CARD 2019, Ubon Ratchathani Thailand

รูปที่ 2 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว

โดยในบทความนี้จะพิจารณาเฉพาะความถี่มูลฐานและโหมดนำกระแสต่อเนื่องเท่านั้น ดังนั้นฟังก์ชันการสวิตช์แสดงดังสมการที่ (4)

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

$$d^* = \frac{1}{A_r} (-K_{pi} I_L - K_{pi} K_{pi} V_o + K_{pi} K_{pi} X_v + K_{pi} X_i + K_{pi} K_{pi} V_o + K_{pi} K_{pi} V_{stab}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{sd} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega L_{eq} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_c \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} &= -\omega L_{eq} I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_c \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_c}{C_{eq}} \cos(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_c}{C_{eq}} \sin(\lambda) \\ \dot{I}_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_c}{L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_s + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c K_{pi} K_{pi}}{A_i L_{dc}} I_L V_o \\ &\quad + \frac{r_c K_{pi} K_{pi}}{A_i L_{dc}} I_L X_v + \frac{r_c K_{pi} K_{pi}}{A_i L_{dc}} I_L V_o + \frac{r_c K_{pi} K_{pi}}{A_i L_{dc}} I_L V_{ref} \\ \dot{V}_{dc} &= \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi}}{A_i C_{dc}} I_L^2 + \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_i C_{dc}} I_L V_o - \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_i C_{dc}} I_L X_v - \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_i C_{dc}} I_L V_{ref} \\ &\quad - \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_i C_{dc}} I_L V_o + \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_i C_{dc}} I_L V_{ref} \\ \dot{I}_L &= \frac{K_{pi}}{A_i L} V_{dc} I_L - \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_i L} V_o V_o - \frac{1}{L} V_o + \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_i L} V_o X_v + \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_i L} V_o V_{ref} \\ &\quad + \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_i L} V_o V_o + \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_i L} V_o V_{ref} \\ \dot{V}_o &= \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\ \dot{X}_v &= -V_o + V_o + K_{pi} V_{ref} \\ \dot{X}_i &= -I_L - K_{pi} V_o + K_{pi} X_v + K_{pi} V_o + K_{pi} K_{pi} V_{ref} \\ \dot{V}_{ref} &= V_{ref} \\ \dot{V}_{ref} &= (\omega_1 + \omega_2) V_{dc} - \omega_1^2 V_{ref} - (\omega_1 + \omega_2) V_{ref} \end{aligned} \quad (6)$$

การวิเคราะห์ห้วงจร โดยไม่พิจารณาตัวควบคุมพีไอ จะกำหนดให้ค่า d เป็นตัวแปรตัวหนึ่งในแบบจำลอง เมื่อพิจารณาเฉพาะในส่วนตัวควบคุมแบบพีไอ จะพบว่าอินพุต คือ แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด (V_o^*) รวมกับ แรงดันไฟฟ้าสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ (V_{stab}) ดังนั้นในส่วนของตัวควบคุมสามารถหาค่าวัฏจักรหน้าที่ ได้ดังสมการที่ (5) โดยนำค่าดังกล่าวไปแทนค่าในตัวแปร d จะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงดังสมการที่ (6)

4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากสมการที่ (6) เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้เทคนิคการแปลงออร์ธอนอร์มัล เมื่อทำให้เป็นเชิงเส้นแล้วจะได้สมการที่มีรูปแบบดังสมการที่ (7) ซึ่งต่างจาก ในเมทริกซ์ A B C และ D จะขึ้นอยู่กับจุดการทำงานของระบบ โดยทั่วไปแบบจำลองในสมการที่ (7) จะเรียกว่า แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก ซึ่งแบบจำลองนี้ นิยมนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเฉพาะ [6]

$$\begin{cases} \dot{\delta x} = A(x_o, u_o) \delta x + B(x_o, u_o) \delta u \\ \delta y = C(x_o, u_o) \delta x + D(x_o, u_o) \delta u \end{cases} \quad (7)$$

การตรวจสอบความถูกต้องจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ โดยใช้ชุดบล็อกกำลังไฟที่ร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB เพื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการยืนยันความถูกต้อง ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องแสดงดังนี้

$$R_{eq} = 0.1 \, \Omega, \, L_{eq} = 24 \, \mu\text{H}, \, C_{eq} = 2 \, \text{nF}, \, r_c = 0.01 \, \Omega, \, L_{dc} = 30 \, \text{mH} \\ r_s = 0.4 \, \Omega, \, C_{dc} = 1000 \, \mu\text{F}, \, L = 15 \, \text{mH}, \, C = 1000 \, \mu\text{F}, \, R = 20 \, \Omega$$

บทความวิจัย

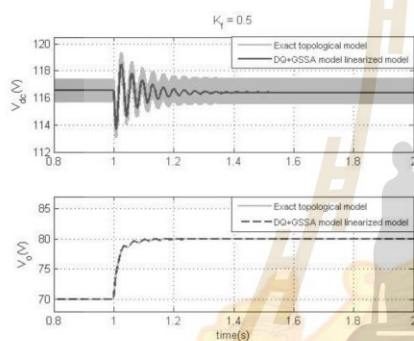
การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประจักษ์ ครั้งที่ 11

11th ECTI-CARD 2019, Ubon Ratchathani Thailand

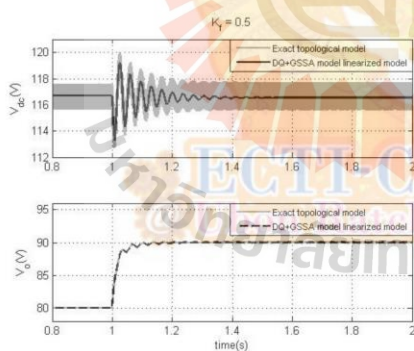
$$K_p = 0.08, K_v = 2.5, K_{pi} = 12, K_H = 3750, A_r = 10, K_f = 0.5$$

$$\omega_1 = 100 \text{ rad/s}, \omega_2 = 333.33 \text{ rad/s}, \omega_0 = 182.57 \text{ rad/s}$$

สำหรับรูปที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบของรูปสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตที่กำหนด จาก 70V ไป 80 V และ รูปที่ 4 เป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตที่กำหนด จาก 80 V ไป 90 V ที่เวลา 1.0 วินาที จะสังเกตได้ว่า ผลตอบสนองของแบบจำลองมีรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ทางทฤษฎีมีความถูกต้อง แม่นยำ และความน่าเชื่อถือ รวมถึงสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพและออกแบบอุปกรณ์ไปหน้าได้



รูปที่ 3 ผลตอบสนองของ V_{dc} และ V_g ของระบบ ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_g จาก 70V ไป 80 V



รูปที่ 4 ผลตอบสนองของ V_{dc} และ V_g ของระบบ ที่มีการเปลี่ยนแปลง



V_g จาก 80 V ไป 90 V

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเป็นดิจิทัลที่มีโหนดกำลังไฟฟ้าทั้งตัวสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ โดยใช้วิธีวิเคราะห์ในส่วนของการเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวิเคราะห์วงจรแปลงผันแบบบิลท์ที่มีการควบคุมและเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ไปหน้า โดยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ พบว่าแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์สามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นแบบจำลองที่ได้นำเสนอในบทความนี้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบและการออกแบบอุปกรณ์ไปหน้าต่อไปได้อีกในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Grigore, J. Hatonen, J. Kyyra, and T. Suintio, "Dynamics of a buck converter with a constant power load," in Proc. IEEE 29th Power Electron. Spec. Conf., Fukuoka, Japan, May 1998, pp. 72-78.
- [2] M. Wu and D. D. C. Lu, "Investigation on active method for stabilization of LC input filter and de/dc buck converter under voltage mode control," in Proc. IEEE Power Electron. Drive Syst. (PEDS), Jun. 2015, pp. 721-726.
- [3] T. Sopapim, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "Mathematical of a Three-Phase Diode Rectifier Feeding a Controlled Buck Converter," International Review on Modeling and Simulations, August 2011, pp. 1426-1439.
- [4] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, and D.W.P. Thomas, "Stability analysis and modelling of AC-DC system with mixed load using DQ transformation method," in Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron., Cambridge, U.K., Jun./Jul. 2008, pp. 19-24.
- [5] A. Emadi, "Modeling of power electronic loads in AC distribution systems using the generalized state-space averaging method," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 51, no. 5, pp. 992-1000, Oct. 2004.
- [6] K. Chajarnudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "The Stability Study of AC-DC Power System with Controlled Rectifier Including Effect of Voltage Control," European Journal of Scientific Research, October 2011, pp. 463-480.

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซียที่จ่ายโหลดวงจรแปลงผันแบบบักก้านานกัน
ที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า

Mathematical Model of AC-DC Power Systems Feeding Paralleled Buck Converter Loads
with Stabilization by Using Feedforward Loop

รัฐพล โพธิ์สังข์¹ เทพพนม โสภะเพิ่ม² และ กองพัน อวีร์รักษ์¹

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี kongpan@sut.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบักก้านานกันที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก้านานกันที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยลูปป้อนไปหน้า ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีการดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจจ ดังนั้นอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่งจึงถูกนำมาใช้ในการทำให้แบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบต่อไป การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองให้ผลตอบสนองถูกต้องทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว

คำสำคัญ: วิธีดิคว วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป วงจรแปลงผันแบบบักก้านานกัน การสร้างเสถียรภาพ ลูปป้อนไปหน้า

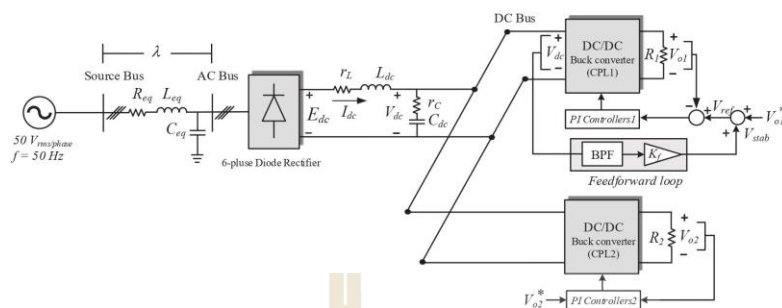
Abstract

This paper presents a mathematical model using the combination between the DQ modeling method and the GSSA modeling approach for a three-phase diode rectifier feeding paralleled controlled buck converters with stabilization by using feedforward loop. The mathematical model derived from the proposed method is nonlinear. The linear dynamic model is needed to analyze the stability of the power system with the eigenvalue theorem. Thus, the first order term of Taylor's series expansion is applied to obtain the linearized model. This linearized model is appropriate for further the stability analysis. The model is validated by the simulation via the exact topological model of MATLAB program. The results show that the proposed model can provide the accurate response in both transient and steady-state.

Keywords: DQ method, GSSA-method, Paralleled controlled buck converters, Stabilization, Feedforward loop

1. บทนำ

ในปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังถูกนำมาใช้ในระบบต่างๆ เป็นจำนวนมาก เช่น ระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน รถไฟฟ้า หรือระบบควบคุมในสายการผลิตของภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น โดยระบบดังกล่าวมักใช้วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย มีประสิทธิภาพสูง และมีการดูแลบำรุงรักษาที่ต่ำ แต่ถึงอย่างไรก็ตามวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมมักแสดงพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power loads : CPL) และเมื่อนำโหลดดังกล่าวมาต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมเป็นอย่างมาก ซึ่งการขาดเสถียรภาพนั้นอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ [1 - 2] จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาและการแก้ปัญหาเหล่านี้โดยการสร้างเสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในบทความนี้เลือกวิธีการสร้างเสถียรภาพแบบแอคทีฟ (active stabilization method) ด้วยลูปป้อนไปหน้า [3] ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความสำคัญ โดยทั่วไปการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับการเวลา (time varying model) อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจร ซึ่งจะทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์ระบบ ดังนั้นในบทความนี้จึงเสนอวิธีการพิสูจน์หาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการเวลา (time-invariant model) [4] โดยใช้วิธีดิคว (DQ method) [5-6] ผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method: GSSA method) [7] พร้อมทั้งทำให้แบบจำลองที่ได้จากวิธีการดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่ง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาคำอธิบายเชิงสัจส่วน ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของลูปป้อนไปหน้าที่ส่งผลต่อการชดเชยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวอย่างมีนัยสำคัญ [3] ผ่านทฤษฎีบทค่าเจจต่อไปในอนาคต



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการสร้างเสถียรภาพด้วยอุปกรณ์ไปหน้า

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่กระแสสลับสามเฟส สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองสัญญาณดิซีส ฟิลเตอร์วงจรแปลงผันแบบบัคที่มีแรงดันควบคุมทั้ง 2 ชุด และอุปกรณ์ไปหน้าที่เชื่อมต่อกับระบบควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัคชุดที่ 1 โดยอุปกรณ์ไปหน้ามีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ตัวกรองผ่านแถบและตัวอัตราขยายเชิงสัดส่วน สำหรับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 3 จะใช้วิธีคิดเพื่อแปลงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสผ่านสายส่งต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ให้อยู่บนแกนดิกซ์เพื่อการจัดฟังก์ชันการสวิตช์ด้านแหล่งจ่ายและใช้วิธีจำลองปริภูมิสถานะทั่วไปทางด้านโวลต์จอร์ของระบบไฟฟ้าเพื่อการจัดฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคกันที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ไปหน้า ซึ่งทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการวัดความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาข้อผิดพลาดเชิงสัดส่วนที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพต่อไป

3. การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับบทความนี้จะอาศัยวิธีคิดเพื่อแปลงระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยแหล่งจ่ายให้อยู่บนแกนดิกซ์โดยเมื่อพิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ใช้ไดโอดพบว่าสามารถใช้วิธีคิดเพื่อเปลี่ยนสมการฟังก์ชันการสวิตช์ของไดโอด จะได้สมการที่ (1) ซึ่งจะเห็นว่าสามารถลดความซับซ้อนของแบบจำลองได้โดยการกำหนดให้มุมเฟสการหมุนของฟังก์ชันการสวิตช์ ($\phi = \phi$) [4-5] ดังนั้นจะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi - \phi_i) \\ \sin(\phi - \phi_i) \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดยที่ ϕ_i คือ มุมเฟสของแกนหมุนดิกซ์ และ ϕ คือ มุมเฟสของบัสแรงดันเฉลี่ย

จากรูปที่ 2 พิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์รวมทั้งแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสและสายส่งฝั่งเฉลี่ยจะถูกแปลงให้อยู่บนแกนหมุนดิกซ์ โดยวงจรเรียงกระแสสามเฟสได้ออกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับการวัด

ลำดับถัดไปจะใช้วิธีจำลองปริภูมิสถานะทั่วไปกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ด้านโวลต์ $u_1(t)$ และ $u_2(t)$ ของวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีแรงดันควบคุมทั้ง 2 ชุด ซึ่งฟังก์ชันการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัค [7] แสดงดังสมการที่ (2)

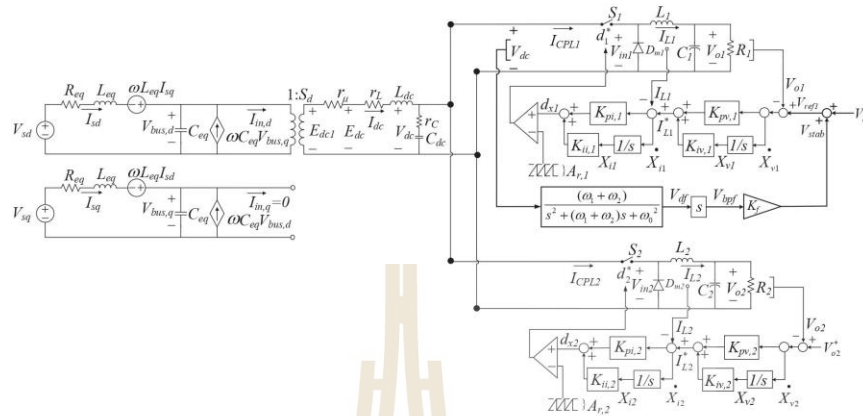
$$u_1(t) = u_2(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (2)$$

เมื่อ d และ T_s คือ ค่าวัฏจักรหนึ่งๆและคาบการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัค ตามลำดับ

จากฟังก์ชันการสวิตช์ที่เกิดขึ้นในวงจรแปลงผันแบบบัคทั้ง 2 ชุดของสมการที่ (2) จะใช้สมการปริภูมิสถานะฟูริเยร์เชิงซ้อนของตัวแปรสถานะในวงจรดังกล่าวให้เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองโดยอาศัยคุณสมบัติใน [7] ดังนั้นจะได้สมการปริภูมิสถานะค่าอันดับสูงของฟังก์ชันการสวิตช์แสดงดังสมการที่ (3)

$$\begin{cases} \langle u_1(t) \rangle_0 = d_1 \\ \langle u_2(t) \rangle_0 = d_2 \end{cases} \quad (3)$$

การวิเคราะห์วงจรของระบบแบบวงเปิด จะกำหนดให้ค่า d_1 และ d_2 เป็นตัวแปรค่าหนึ่งๆในแบบจำลอง เมื่อพิจารณาตัวควบคุมที่ 1 ในรูปที่ 2 จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 2 ชุด คือ $K_{p,1}, K_{i,1}, K_{p,2}, K_{i,2}$ และ $K_{v,2}$ ตามลำดับ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของตัวควบคุมที่ 1 ในรูป d_1 และ d_2 ได้ดังสมการที่ (4) โดยนำค่าดังกล่าวไปแทนค่าในตัวแปร d_1 และ d_2 จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงดังสมการที่ (5) และ (6)



รูปที่ 2 วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนพิกัดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

$$\begin{cases} d_1^* = \frac{1}{A_{1,1}} (-K_{p1,1} I_{L1} - K_{p1,2} K_{p1,3} V_{o1} + K_{p1,3} K_{p1,4} X_{v1} \\ \quad + K_{p1,4} X_{v1} + K_{p1,1} K_{p1,2} V_{ref1}) \\ d_2^* = \frac{1}{A_{1,2}} (-K_{p1,2} I_{L2} - K_{p1,3} K_{p1,4} V_{o2} + K_{p1,4} K_{p1,1} X_{v2} \\ \quad + K_{p1,1} K_{p1,2} X_{v2} + K_{p1,2} K_{p1,3} V_{ref2}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_n \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_n \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{sd} \\ \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} \\ \dot{I}_{d1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{d1}} V_{bus,d} - \frac{(r_e + r_f + r_c)}{L_{d1}} I_{d1} - \frac{1}{L_{d1}} V_{d1} - \frac{r_c K_{p1,3}}{A_{1,1} L_{d1}} I_{L1} - \frac{r_c K_{p1,4}}{A_{1,1} L_{d1}} V_{o1} \\ \quad + \frac{r_c K_{p1,3}}{A_{1,1} L_{d1}} I_{L2} X_{v1} + \frac{r_c K_{p1,4}}{A_{1,1} L_{d1}} I_{L1} V_{ref1}^* \\ \quad + \frac{r_c K_{p1,3}}{A_{1,1} L_{d1}} K_{p1,2} I_{L1} V_{ref1}^* - \frac{r_c K_{p1,4}}{A_{1,1} L_{d1}} K_{p1,2} I_{L2} V_{ref1}^* \\ \quad + \frac{r_c K_{p1,3}}{A_{1,1} L_{d1}} I_{L2} X_{v2} + \frac{r_c K_{p1,4}}{A_{1,1} L_{d1}} I_{L1} V_{ref2}^* \\ \quad + \frac{r_c K_{p1,3}}{A_{1,1} L_{d1}} K_{p1,2} I_{L2} V_{ref2}^* - \frac{r_c K_{p1,4}}{A_{1,1} L_{d1}} K_{p1,2} I_{L1} V_{ref2}^* \\ \dot{V}_{d1} = \frac{1}{C_{d1}} I_{d1} + \frac{K_{p1,2}}{A_{1,1} C_{d1}} I_{L1}^2 + \frac{K_{p1,3}}{A_{1,1} C_{d1}} I_{L2} V_{ref1}^* - \frac{K_{p1,4}}{A_{1,1} C_{d1}} I_{L1} X_{v1} - \frac{K_{p1,1}}{A_{1,1} C_{d1}} I_{L2} X_{v2} \\ \quad - \frac{K_{p1,2} K_{p1,3}}{A_{1,1} C_{d1}} I_{L1} V_{ref1}^* - \frac{K_{p1,3} K_{p1,4}}{A_{1,1} C_{d1}} I_{L2} V_{ref1}^* + \frac{K_{p1,2}}{A_{1,1} C_{d1}} I_{L1}^2 + \frac{K_{p1,3} K_{p1,2}}{A_{1,1} C_{d1}} I_{L2} V_{ref1}^* \\ \quad - \frac{K_{p1,4}}{A_{1,1} C_{d1}} I_{L2} X_{v1} - \frac{K_{p1,1}}{A_{1,1} C_{d1}} I_{L1} X_{v2} - \frac{K_{p1,2} K_{p1,3}}{A_{1,1} C_{d1}} I_{L1} V_{ref1}^* - \frac{K_{p1,3} K_{p1,4}}{A_{1,1} C_{d1}} I_{L2} V_{ref1}^* \\ \dot{I}_{L1} = -\frac{K_{p1,2}}{A_{1,1} L_{11}} V_{d1} - \frac{K_{p1,3}}{A_{1,1} L_{11}} V_{d2} V_{ref1}^* - \frac{1}{L_{11}} V_{d1} + \frac{K_{p1,4}}{A_{1,1} L_{11}} V_{d2} X_{v1} \\ \quad + \frac{K_{p1,1}}{A_{1,1} L_{11}} V_{d2} X_{v2} + \frac{K_{p1,2} K_{p1,3}}{A_{1,1} L_{11}} V_{d1} V_{ref1}^* + \frac{K_{p1,3} K_{p1,4}}{A_{1,1} L_{11}} V_{d2} V_{ref1}^* \\ \dot{V}_{d1} = \frac{1}{C_{11}} I_{L1} - \frac{1}{R_{11} C_{11}} V_{d1} \\ \dot{X}_{v1} = -V_{d1} + V_{ref1}^* + K_{p1,1} V_{d1} \\ \dot{X}_{v2} = -I_{L2} - K_{p1,2} V_{d1} + K_{p1,3} X_{v1} + K_{p1,4} V_{ref1}^* + K_{p1,1} K_{p1,2} V_{d1} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} V_{d1}^* = V_{ref1} \\ V_{d2}^* = (\omega_1 + \omega_2) V_{d1} - \omega_1^2 V_{d1} - (\omega_1 + \omega_2) V_{d1} \\ \dot{I}_{L2} = -\frac{K_{p1,2}}{A_{1,2} L_{12}} V_{d1} - \frac{K_{p1,3}}{A_{1,2} L_{12}} V_{d2} V_{ref1}^* - \frac{1}{L_{12}} V_{d2} + \frac{K_{p1,4}}{A_{1,2} L_{12}} V_{d1} X_{v2} \\ \quad + \frac{K_{p1,1}}{A_{1,2} L_{12}} V_{d2} X_{v1} + \frac{K_{p1,2} K_{p1,3}}{A_{1,2} L_{12}} V_{d1} V_{ref1}^* \\ \dot{V}_{d2} = \frac{1}{C_{12}} I_{L2} - \frac{1}{R_{12} C_{12}} V_{d2} \\ \dot{X}_{v2} = -V_{d2} + V_{ref2}^* \\ \dot{X}_{v1} = -I_{L1} - K_{p1,2} V_{d2} + K_{p1,3} X_{v2} + K_{p1,4} V_{ref2}^* \end{cases} \quad (6)$$

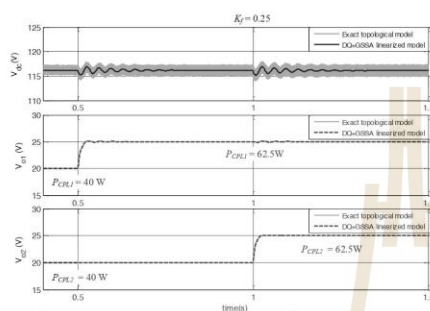
4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากสมการที่ (5) และ (6) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะต้องอาศัยแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ร่วมกับทฤษฎีบทค่าจะจริง [5-6] ดังนั้นสามารถทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้อนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง [4] เมื่อทำให้เป็นเชิงเส้นแล้วจะได้สมการที่มีรูปแบบดังสมการที่ (7) ซึ่งค่าต่างๆ ในเมทริกซ์ A B C และ D จะขึ้นอยู่กับจุดการปฏิบัติการของระบบ

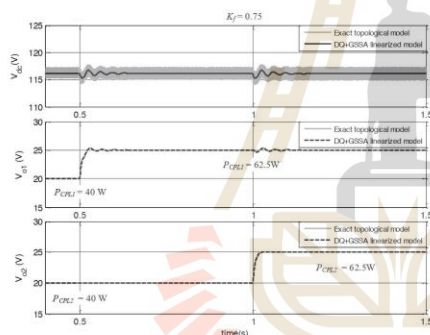
$$\begin{cases} \dot{\delta x} = A(x_0, u_0) \delta x + B(x_0, u_0) \delta u \\ \delta y = C(x_0, u_0) \delta x + D(x_0, u_0) \delta u \end{cases} \quad (7)$$

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (7) จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ของสัญญาณขนาดเล็กระบบชั่วคราวเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บน โปรแกรม MATLAB ซึ่งพารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบแสดงดังนี้

$R_{eq} = 0.1 \Omega$, $L_{eq} = 24 \mu\text{H}$, $C_{eq} = 24 \mu\text{F}$, $r_L = 0.01 \Omega$, $L_{dc} = 30 \text{ mH}$, $r_c = 0.4 \Omega$, $C_{dc} = 1000 \mu\text{F}$, $L_1 = L_2 = 15 \text{ mH}$, $C_1 = C_2 = 1000 \mu\text{F}$, $R_1 = R_2 = 10 \Omega$, $K_{pi,1} = K_{pi,2} = 0.1513$, $K_{pi,1} = K_{pi,2} = 15.7914$, $K_{pi,1} = K_{pi,2} = 2.2564$, $K_{ii,1} = K_{ii,2} = 2025.3$, $A_{r,1} = A_{r,2} = 10$, $\omega_n = 182.5742 \text{ rad/s}$, $\omega_1 = 94.2478 \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 353.6777 \text{ rad/s}$



รูปที่ 3 ผลตอบสนองของ V_{dc} , V_{g1} และ V_{g2} ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยที่ $K_f = 0.25$



รูปที่ 4 ผลตอบสนองของ V_{dc} , V_{g1} และ V_{g2} ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยที่ $K_f = 0.75$

จากรูปที่ 3 ได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงที่กำหนดของวงจรแปลงแบบหมักซึกซ์ที่ 1 (V_{a1}^*) และซึกซ์ที่ 2 (V_{a2}^*) จาก 20 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 0.5 วินาที และ จาก 20 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 1.0 วินาที ตามลำดับ โดยกำหนดให้ค่า K_f เท่ากับ 0.25 และรูปที่ 4 ได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงที่กำหนดโดยลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 3 โดยกำหนดให้ค่า K_f เท่ากับ 0.75 จะสังเกตได้ว่า ผลตอบสนองของแบบจำลองมีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ทางทฤษฎีมีความถูกต้อง แม่นยำ และมีความน่าเชื่อถือสูง

5. สรุป

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานการแปลงดีคิว ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กับระบบไฟฟ้าสามเฟสร่วมกับตัวแปลงปริภูมิสถานะทั่วไปที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี เมื่อนำมาใช้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา สามารถให้แบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นในบทความนี้มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์หาค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วนที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. D. Middlebrook, "Input filter consideration in design and application of switching regulators," in *Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting*, 1967, pp. 366-382.
- [2] A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta and G. A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: Definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 4, pp. 1112-1125, Jul. 2006.
- [3] M. Wu an, D. D. C. Lu and C.K. Tse, "Direct and Optimal Linear Active Methods for Stabilization of LC Input Filters and DC/DC Converters Under Voltage Mode Control," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuit Syst.*, vol. 5, no. 3, pp. 402-412, Sep. 2015.
- [4] T. Sopapirm, K-N. Areerak and K-L. Areerak, "The Averaging Model of a Six-Pulse Diode Rectifier Feeding Paralleled Buck Converters," *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation.*, vol. 6, no. 1, pp. 58-65, Jan. 2012.
- [5] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher and D.W.P. Thomas, "Stability analysis and modelling of AC-DC system with mixed load Using DQ transformation method," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)*, Cambridge, UK, pp. 19-24, Jun./Jul.2008.
- [6] K-N. Areerak, T. WU, S.V. Bozhko, G.M. Asher and D. W. P. Thomas, "Aircraft power system stability study including effect of voltage control and actuators dynamic," *IEEE Trans. Aerospace and electronic systems.*, vol. 47, no. 7, pp. 2574-2589, Oct. 2011.
- [7] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar, and M. Ehsani, "Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach," *IEEE Trans. on Circuit and Systems.*, vol. 44, no. 8, pp. 767-770, Aug. 1997.

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่จ่ายโหลด
วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมโดยใช้วงรอบป้อนไปหน้า
Instability Mitigation of a Three-Phase Diode Rectifier Feeding
a Controlled Buck Converter by Using Feedforward Loop

รัฐพล โพธิ์สังข์¹ เทพพนม โสภะเพิ่ม² กองพัน อารีรักษ์^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Ratapon Phosung¹ Theppanom Sopapim² Kongpan Areerak^{1*}

¹ School of electrical engineering, Suranaree university of technology

111 University Avenue, Muang, Nakhon Rachasima, Thailand, 30000

²Department of electrical power engineering, Mahanakorn university of technology

140 Cheumsampan Rd, Nongchok, Bangkok, Thailand, 10530

*Corresponding author Email: kongpan@sut.ac.th

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

บทคัดย่อ

ในบทความนี้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้าสำหรับวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ โดยโหลดวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงานจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม อันเป็นสาเหตุทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการศึกษาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์จากวิธีดีคิวผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง การตรวจสอบผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีที่นำเสนอในบทความนี้จะพึงพาการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB จากผลการตรวจสอบ แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอในบทความนี้มีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในทางทฤษฎี อีกทั้งยังสามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวกลับมามีเสถียรภาพตลอดการทำงาน

คำสำคัญ: โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ วงรอบป้อนไปหน้า ทฤษฎีบทค่าเจาะจง

ABSTRACT

This paper presents the instability mitigation of AC-DC power system feeding a controlled buck converter by using a feedforward loop. Power converters with their controls normally behave as constant power loads (CPLs). These CPLs have negative resistance which may cause system instability. Therefore, it is essential to study the instability mitigation technique for improving the system stability. The dynamic model derived from the DQ method and the generalized state-space averaging

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

23

method (GSSA) is used with the eigenvalue theorem for the stability analysis. The proposed instability mitigation is verified by the intensive time-domain in MATLAB. The results show that the proposed instability mitigation in article is consistent with the stability analysis in theorem. In addition, the unstable system due to a constant power load can become back to the stable operation using the proposed technique.

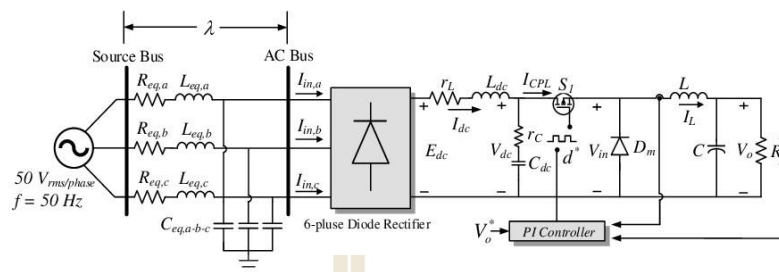
Keyword: Constant power loads, instability mitigation, feedforward loop, eigenvalue theorem.

รายการสัญลักษณ์			
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	แรงดันเฟสที่บัสแหล่งจ่ายแรงดัน	K_{pv}, K_{pi}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบโอ
R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}	ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า	A_r	ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม
ω	ค่าความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่ายไฟฟ้า	d_s	สัญญาณการควบคุม
ϕ	มุมเฟสของแกนหมุนดีคิว	d^*	ค่าวัฏจักรการทำงานของสวิตช์
ϕ_i	มุมเฟสของบัสแรงดันเอซี	K_f	ค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน
λ	มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันเฟสที่บัสแหล่งจ่ายและแรงดันเฟสที่บัสเอซี	ω_o	ความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองผ่านแถบ
I_{in}	กระแสไฟฟ้าอินพุตของวงจรเรียงกระแส	ω_1, ω_2	ความถี่ตัดของตัวกรองผ่านแถบ
r_L, L_{dc}	ค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง	V_{ref}	แรงดันเอาต์พุตที่กำหนดใหม่
r_c, C_{dc}	ค่าพารามิเตอร์ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง	1. บทนำ ณ ปัจจุบันได้มีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในงานในระบบต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก อาทิเช่น การใช้งานในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน รถไฟฟ้า เรือดำน้ำ หรือระบบควบคุมในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น การใช้งานในระบบดังกล่าวมักจะมีวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม ทั้งแปลงจากเอซีเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี และเอซีเป็นเอซี เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย มีการดูแลบำรุงรักษาที่ต่ำ และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ซึ่งวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมมักจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power load: CPL) ซึ่งโหลดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบ (negative resistance) [1]-[3] ต่อระบบโดยรวม ที่นอกจากจะทำให้ระบบมีความไม่เสถียรแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการศึกษาและการตรวจสอบเสถียรภาพ โดยอาศัยแบบจำลองทาง	
E_{dci}	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสโดยไม่พิจารณาผลของมุมเหลื่อม		
E_{dc}	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส		
V_{dc}, I_{dc}	แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบัสดีซี		
V_{sd}, V_{sq}	แรงดันไฟฟ้าที่บัสแหล่งจ่ายบนแกนดีคิว		
I_{sd}, I_{sq}	กระแสไฟฟ้าที่บัสแหล่งจ่ายบนแกนดีคิว		
$V_{bus,d}, V_{bus,q}$	แรงดันไฟฟ้าที่บัสเอชบนแกนดีคิว		
$I_{bus,d}, I_{bus,q}$	กระแสไฟฟ้าที่บัสเอชบนแกนดีคิว		
L, C, R	ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปรผันแบบบัพทึบ		
I_L, V_o	กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปรผันแบบบัพทึบ		
V_o^*	แรงดันเอาต์พุตที่กำหนด		
X_v, X_i	อัตราค่าการเปลี่ยนแปลงของรอบกระแสและแรงดันของวงจรแปรผันแบบบัพทึบ		
K_{pv}, K_{pi}	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพี		

คณิตศาสตร์ เพื่อคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพและหลีกเลี่ยงการทำงานของระบบ ณ จุดดังกล่าว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยทั่วไปการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันส่วนใหญ่จะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time varying model) อันเนื่องมาจากผลการสวิตช์ในวงจร ซึ่งจะทำให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องการวิธีในการพิสูจน์แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา เปลี่ยนไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) ซึ่งมีอยู่ 3 วิธีที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายคือ วิธีดีคิว (DQ method) [4] วิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear average-value method) [5] และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method: GSSA) [6] เป็นต้น แต่เนื่องจากแบบจำลองที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้นไม่ยืดหยุ่นและอาจจะต้องพิจารณาเป็นกรณี ๆ ไป ซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดได้ง่าย ดังนั้นในบทความนี้จะทำการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เนื่องจากวิธีการดังกล่าวทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับทฤษฎีบทค่าเฉพาะจริง (eigenvalue theorem) เพื่อนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ [7], [8] แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เสถียรภาพทำได้เพียงคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพเท่านั้น แต่ไม่สามารถทำให้ระบบไฟฟ้าจ่ายโหลดในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นภายใต้พิกัดของแหล่งจ่ายได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ อันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการคือ วิธีแบบพาสซีฟและวิธีแบบแอ็กทีฟ โดยวิธีแบบพาสซีฟจะอาศัยการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุหรือลดค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง [9] เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและทำให้ระบบจ่ายโหลดได้สูงขึ้น รวมถึงการเพิ่มความต้านทานในระบบ [10] ซึ่งง่ายต่อการออกแบบและการนำไปใช้งาน

จริง แต่มีข้อเสียคือ ทำให้ขนาด น้ำหนัก และราคาของระบบมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นในระบบ สำหรับวิธีแบบแอ็กทีฟแบ่งได้เป็น 2 แนวทางคือ แนวทางที่ 1 การบรรเทาด้านแหล่งจ่าย [11]-[15] วิธีนี้ทำได้โดยการสร้างสัญญาณชดเชยผิดไปยังระบบควบคุมด้านแหล่งจ่ายเพื่อสร้างผลการหน่วงให้กับระบบ แต่ถึงอย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวนี้ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสที่ไม่มีการควบคุมเฟส จำเป็นต้องเพิ่มวงจรช่วยเข้ามาในระบบ [16], [17] ซึ่งส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบ และทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลง ในส่วนของแนวทางที่ 2 คือ การบรรเทาด้านโหลด [18]-[23] จะอาศัยหลักในการเพิ่มผลการหน่วงเช่นเดียวกับการบรรเทาแหล่งจ่าย แต่จะนำสัญญาณชดเชยที่สร้างขึ้นผิดไปยังระบบควบคุมด้านโหลดแทน ซึ่งวิธีการนี้จะไม่ก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบ จึงทำให้มีความน่าเชื่อถือสูงกว่าการบรรเทาแหล่งจ่าย ด้วยเหตุผลดังกล่าวในบทความนี้จึงเลือกการบรรเทาด้านโหลดโดยใช้วงรอบป้อนไปหน้า (feedforward loop) [21], [22] ซึ่งเป็นวิธีการที่ยังไม่พบเจอในงานวิจัยในอดีตที่นำมาใช้กับระบบที่พิจารณาในบทความ จากการวิเคราะห์เสถียรภาพ ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเฉพาะจริง พร้อมทั้งการยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ สำหรับระบบที่พิจารณาในบทความนี้ แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้ สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้อีกด้วย

บทความนี้ประกอบไปด้วย 5 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอระบบที่พิจารณา ส่วนที่ 3 กล่าวถึงหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณา หลักการในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้า พร้อมทั้งการยืนยันประสิทธิภาพของวิธีดังกล่าว ผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้รับการนำเสนอ ในส่วนที่ 4 ในส่วนที่ 5 เป็นการสรุปข้อดีของวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส สายส่งกำลังฟองเซี (R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}) วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และ วงจรกรองสัญญาณดีซี (r_c, C_{dc}, L_{dc}) ที่เชื่อมต่อกับ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งก็คือวงจรแปลงผันแบบบักที่มี การควบคุม โดยโหลดดังกล่าวสามารถทำให้ระบบเกิดการ ขาดเสถียรภาพ ซึ่งส่งผลให้แรงดันบัสดีซี (V_{dc}) เกิดการ กระเพื่อมของแรงดันเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งไม่สามารถ ควบคุมแรงดันเอาต์พุต (V_o) ได้ ดังนั้นในหัวข้อที่ 3 จึง นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ วิธีที่คิดผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งจะ ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา และมีความ เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพต่อไป

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณา

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทความ นี้จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการพิสูจน์หาแบบจำลองคือ พิจารณาเฉพาะโหมดการนำกระแสต่อเนื่องและไม่ พิจารณาอารมณ์ที่เกิดขึ้นในระบบ โดยในส่วนแรกจะใช้ วิธีที่ดีควโน [4] วิเคราะห์ห้วงจรทางฝั่งแหล่งจ่ายของระบบ ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับผ่าน สายส่งกำลังไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบบริดจ์ โดยกำหนดให้มุมเฟสการหมุนของสัญญาณ การสวิตช์ ($\phi = \phi$) เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง

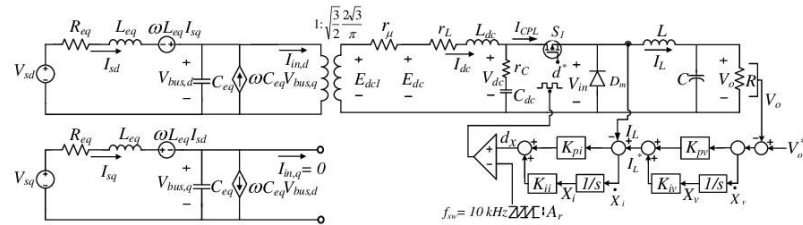
ดังนั้น จะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนดีควของระบบ ไฟฟ้าที่พิจารณาดังรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 พบว่า แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับรวมทั้ง สายส่งกำลังไฟฟ้าฝั่งเอซีจะถูกเปลี่ยนให้อยู่บนแกนดีคว โดยวงจรเรียงกระแสสามเฟสได้ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปหม้อ แปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่ง่ายต่อการ วิเคราะห์ห้วงจร รวมไปถึงสามารถกำจัดสัญญาณการสวิตช์ ของไดโอดซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา

ลำดับต่อไปจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปใน [6] พิจารณาวงจรทางฝั่งโหลดของระบบไฟฟ้า เพื่อกำจัด สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีตัว ควบคุมแบบพีโอ โดยโครงสร้างของตัวควบคุมแบ่ง ออกเป็น 2 ส่วนคือ ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (K_{pv}, K_{pi}) และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (K_{pi}, K_{pi}) ซึ่งมีอินพุตคือ แรงดันอ้างอิง (V_o^*) และมีเอาต์พุต คือ สัญญาณควบคุม (d) โดยสัญญาณควบคุม d จะ นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม เพื่อสร้างเป็น คำวัฏจักรการทำงานของการสวิตช์ (d^*) ดังสมการที่ (1)

$$d^* = \frac{1}{A} (-K_{pi} I_L - K_{pi} K_{pi} V_o + K_{pi} K_{pi} X_i + K_{pi} X_i + K_{pi} K_{pi} V_o^*) \quad (1)$$

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงพลวัตของ ระบบในรูปที่ 2 ที่ได้จากรีวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และสมการที่ (1) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)



รูปที่ 2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานแกนตีคว

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{sd} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\
 \dot{I}_{sq} &= -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\
 \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\
 \dot{I}_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} V_{bus,d} - \frac{(r_p + r_c + r_e)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} \\
 &\quad - \frac{r_c K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L^2 - \frac{r_c K_{pi} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L V_o + \frac{r_c K_{pi} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L X_v \\
 &\quad + \frac{r_c K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L X_i + \frac{r_c K_{pi} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L V_o^* \\
 \dot{V}_{dc} &= \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L^2 + \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L V_o \\
 &\quad - \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L X_v - \frac{K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L X_i - \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L V_o^* \\
 \dot{I}_L &= -\frac{K_{pi}}{A_r L} V_{dc} I_L - \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} V_o - \frac{1}{L} V_o + \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} X_v \\
 &\quad + \frac{K_{pi}}{A_r L} V_{dc} X_i + \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} V_o^* \\
 \dot{V}_o &= \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\
 \dot{X}_v &= -V_o + V_o^* \\
 \dot{X}_i &= -I_L - K_{pi} V_o + K_{pi} X_v + K_{pi} V_o^*
 \end{aligned} \quad (2)$$

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

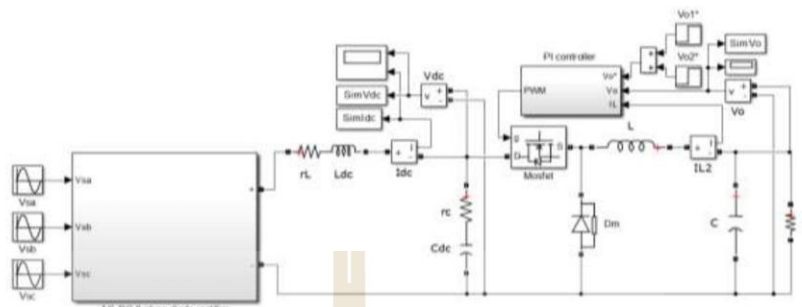
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3) กับผลการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB ในรูปที่ 3 เพื่อพิจารณาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบในเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า
R_{eq}	0.1 Ω
C_{eq}	2 nF
r_L	0.01 Ω
L_{dc}	30 mH
r_c	0.4 Ω
C_{dc}	1000 μ F
L ($\Delta I_L \leq 0.2$ A)	15 mH
C ($\Delta V_o \leq 2.8$ mV)	1000 μ F
R	20 Ω
K_{pi}	0.0757
K_{iv}	3.9478
K_{pi}	2.2564
K_{ii}	2025.3
A_r	10

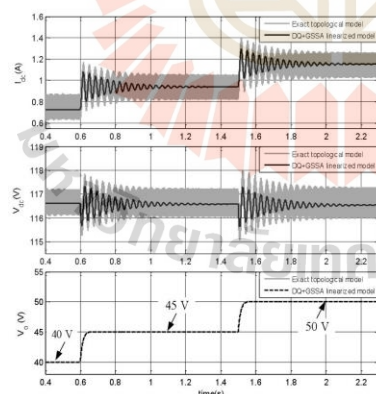
3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

จากสมการที่ (2) เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งเขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรสถานะของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กที่เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (3) ซึ่งค่าต่าง ๆ ในเมตริกซ์ **A** **B** **C** และ **D** จะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบ



รูปที่ 3 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

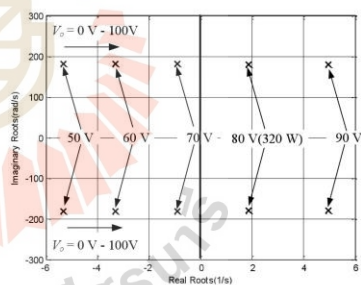
จากรูปที่ 4 ได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด จาก 40 V ไปเป็น 45 V ที่เวลา 0.6 วินาที และจาก 45 V ไปเป็น 50 V ที่เวลา 1.5 วินาที ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า ผลตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} และ V_o ที่ได้จากแบบจำลองมีรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง หรือกล่าวได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ทางทฤษฎีนั้นสามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ อีกทั้งยังเหมาะสำหรับนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบผ่านทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 3.2



รูปที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่พิจารณา

3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณา

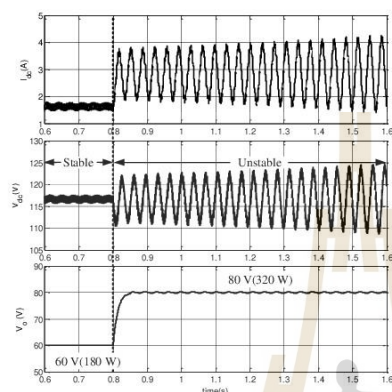
การวิเคราะห์หาจุดปฏิบัติงานที่ส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพจะอาศัยแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3) ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง เพื่อนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบ ค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้จากเมตริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix) $A(x_0, u_0)$ แสดงได้ดังในรูปที่ 5 โดยกำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบักมีค่าการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก 0 V (0 W) ไปจนถึง 100 V (500 W)



รูปที่ 5 ค่าเจาะจงของระบบเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลด จาก 0 - 100 V

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดันเอาต์พุตของโหลดมีค่าเพิ่มจาก 70 V (245 W) ไปเป็น 80 V (320 W) จะทำให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบเคลื่อนที่จากฝั่งซ้ายของระนาบเอสมาอยู่ฝั่งขวา ซึ่งหมายถึงระบบไฟฟ้าที่

พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยการยืนยันผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 5 จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 5 ด้วยการจำลองสถานการณ์

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 60 V (180 W) ไปเป็น 80 V (320 W) ที่เวลา 0.8 วินาที จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งพิจารณาจากการกระเพื่อมของแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น และทำให้สมรรถนะการควบคุมของระบบลดลง ดังนั้น ในบทความนี้จึงได้นำวงรอบป้อนไปนำมาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับระบบที่พิจารณาในบทความนี้ ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 4

4. การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้า

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้วงรอบป้อนไปหน้าสำหรับประยุกต์ใช้กับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุม แสดงดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าถ้าต้องการลดผลกระทบทางด้านเสถียรภาพที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในที่นี้ก็คือ วงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มี

การควบคุม ทำได้โดยการตรวจจับแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ผ่านตัวกรองผ่านแถบ ($C_{dp}(s)$) โดยตัวกรองผ่านแถบนี้จะกรองสัญญาณความถี่รอบ ๆ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองสัญญาณดีซี จากนั้นนำมาปรับคูณกับค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_p) เพื่อทำหน้าที่ปรับอัตราขยายในการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นการสร้างแรงดันสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ (V_{stab}) และนำไปป้อนรวมกับแรงดันเอาต์พุตที่กำหนด (V_o^*) สำหรับใช้สร้างแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดใหม่ (V_{ref}) ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ แสดงดังสมการที่ (4)

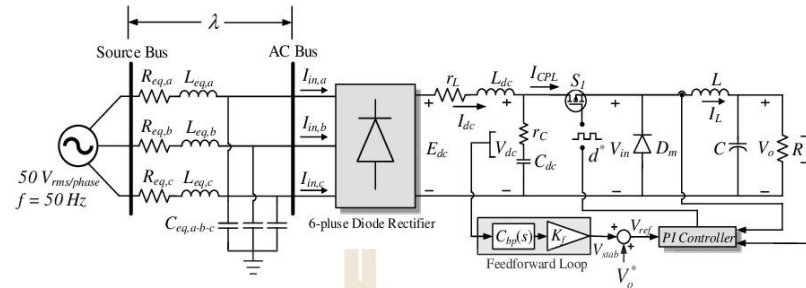
$$V_{ref} = V_o^* + V_{stab} \quad (4)$$

เมื่อ $V_{stab} = K_p C_{dp}(s) V_{dc}$

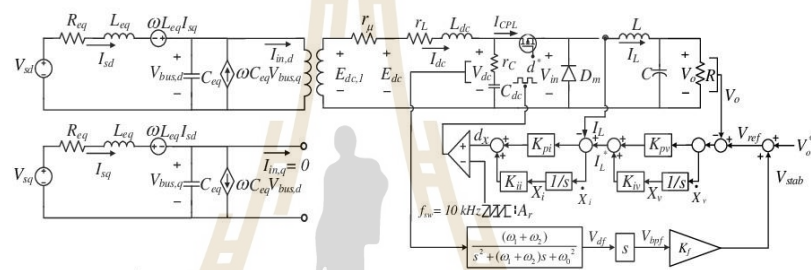
ซึ่งผลที่ได้ จะทำให้แรงดันเอาต์พุต (V_o) ปรับตามรูปสัญญาณแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดใหม่ ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านบัสดีซี (I_{dc}) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ (r_L) เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้แรงดันบัสดีซีลดลงเปรียบเสมือนกับการมีอิมพีแดนซ์เสมือน ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณดีซี [21], [22] จึงทำให้สามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาในบทความนี้ได้ ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่า K_p ที่ส่งผลต่อการชดเชยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยตรงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งต้องอาศัยการคำนวณผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเฉพาะ เพื่อคาดเดาผลการคำนวณหาค่า K_p ที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้อีกด้วย จากระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7 จะพิจารณาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลที่อยู่บนแกนดีคิวได้ดังรูปที่ 8

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

29



รูปที่ 7 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้า



รูปที่ 8 วงจรสมมูลบนแกนดีคิวที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้า

จากรูปที่ 8 สามารถหาสมการเชิงอนุพันธ์ของวงจรสมมูลที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว โดยพิจารณาจากวงรอบป้อนไปหน้า แสดงดังสมการที่ (5) และ (6)

$$\begin{aligned} \dot{I}_{sd} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} &= -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\ \dot{V}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_d + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} \\ &\quad - \frac{r_c K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L^2 - \frac{r_c K_{pi} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L V_o + \frac{r_c K_{pi} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L X_v \\ &\quad + \frac{r_c K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L X_i + \frac{r_c K_{pi} K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L V_o^* + \frac{r_c K_{pi} K_{pi} K_f}{A_r L_{dc}} I_L V_{hpf} \end{aligned}$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L^2 + \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L V_o - \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L X_v$$

$$\dot{I}_L = -\frac{K_{pi}}{A_r L} V_{dc} I_L - \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} V_o - \frac{1}{L} V_o + \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} X_v + \frac{K_{pi}}{A_r L} V_{dc} X_i + \frac{K_{pi} K_{pi}}{A_r L} V_{dc} V_o^* + \frac{K_{pi} K_{pi} K_f}{A_r L} V_{dc} V_{hpf}$$

$$\dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o$$

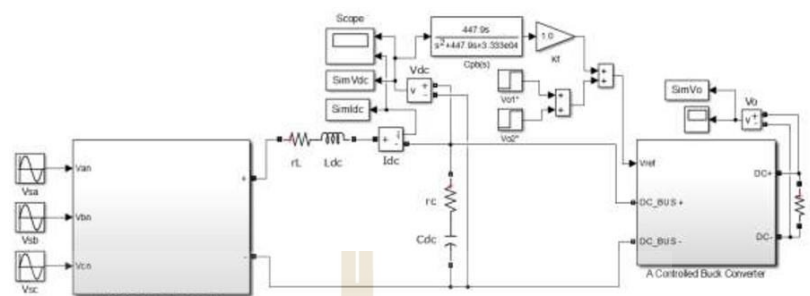
$$\dot{X}_v = -V_o + V_o^* + K_f V_{hpf}$$

$$\dot{X}_i = -I_L - K_{pi} V_o + K_{pi} X_v + K_{pi} V_o^* + K_{pi} K_f V_{hpf}$$

$$\dot{V}_{hpf} = V_{hpf}$$

$$\dot{V}_{hpf} = (\omega_1 + \omega_2) V_{dc} - \omega_o^2 V_{hpf} - (\omega_1 + \omega_2) V_{hpf}$$

(6)



รูปที่ 9 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

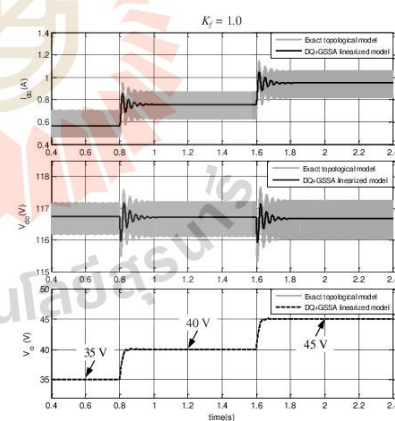
จากสมการที่ (5) และ (6) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งการหาคำอธิบายเชิงสัณฐานที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง และผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการที่มีรูปแบบดังสมการที่ (7) โดยค่าต่าง ๆ ในเมทริกซ์ **A B C** และ **D** จะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบ

$$\begin{cases} \dot{\delta x} = A(x_0, u_0) \delta x + B(x_0, u_0) \delta u \\ \delta y = C(x_0, u_0) \delta x + D(x_0, u_0) \delta u \end{cases} \quad (7)$$

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะอาศัยการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (7) กับผลการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB ในรูปที่ 9 เพื่อพิจารณาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบในเงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7 แสดงดังตารางที่ 1 พร้อมกับค่าพารามิเตอร์ของวงจรป้อนไปหน้าดังนี้ $K_f = 1.0$, $\omega_o = 182.57$ rad/s, $\omega_1 = 94.25$ rad/s, $\omega_2 = 353.68$ rad/s

จากรูปที่ 10 ได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดจาก 35 V ไปเป็น 40 V ที่เวลา 0.8 วินาที และจาก 40 V ไปเป็น 45 V ที่เวลา 1.6 วินาที

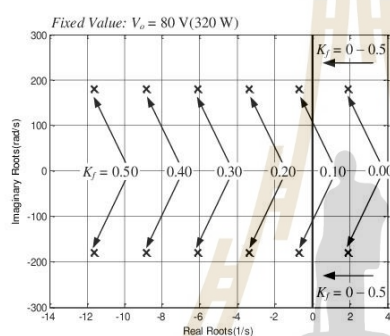
ตามลำดับ โดยกำหนดให้ $K_f = 1.0$ จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} และ V_o ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นมีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า การพิสูจน์หาแบบทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาโครงสร้างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้ามีความถูกต้องแม่นยำ เหมาะสำหรับการนำไปวิเคราะห์หาค่า K_f ที่ส่งผลให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้ ซึ่งรายละเอียดจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 4.2



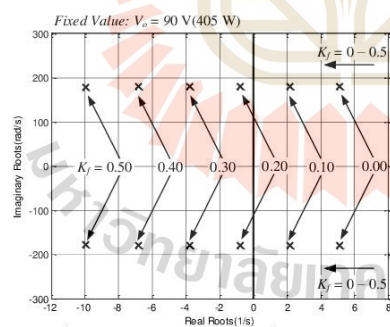
รูปที่ 10 ผลการตอบสนอง I_{dc} , V_{dc} และ V_o ของระบบที่มี การเปลี่ยนแปลง V_o^* โดยที่ $K_f = 1.0$

4.2 การหาค่า K_f ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

การวิเคราะห์ผลของค่า K_f ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ จะพิจารณาแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (7) ร่วมกับทฤษฎีบทค่าเฉพาะนำมาใช้พิจารณา ซึ่งค่าเฉพาะจะสามารถคำนวณได้จากเมทริกซ์จาโคเบียน $A(x_0, u_0)$ แสดงได้ดังรูปที่ 11 และ รูปที่ 12 ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า K_f จาก 0 ถึง 0.5 โดยมีการปรับตั้งค่าระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหนดมีค่าเท่ากับ 80 V (320 W) และ 90 V (405 W) ตามลำดับ

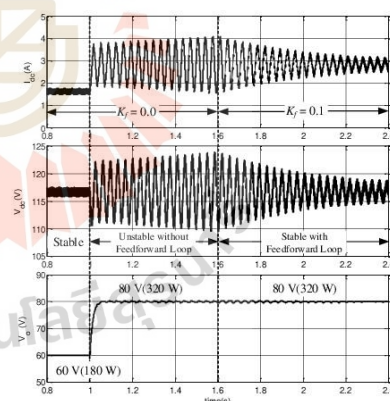


รูปที่ 11 ผลการคำนวณค่าเฉพาะที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ เมื่อกำหนด $V_o = 80$ V (320 W)

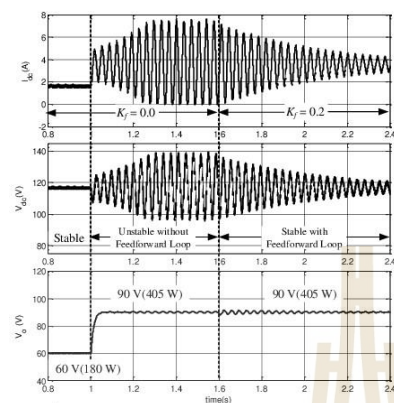


รูปที่ 12 ผลการคำนวณค่าเฉพาะที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ เมื่อกำหนด $V_o = 90$ V (405 W)

จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า เมื่อกำหนดให้โหนดวงจรแปลงผันแบบบักมีระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 80 V (320 W) ที่ค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือ ยังไม่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ระบบจะขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ แต่เมื่อค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0.1 ค่าเฉพาะของระบบจะเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมายู่ที่ฝั่งซ้าย ซึ่งหมายถึง ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง เพียงแค่เพิ่มค่า K_f จาก 0 ไปเป็น 0.1 แต่ถ้าโหนดวงจรแปลงผันแบบบักมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าไปเป็น 90 V (405 W) ดังแสดงในรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า ระบบจะกลับมาเสถียรภาพขาดเสถียรภาพอีกครั้งที่ค่า K_f มีค่าเท่ากับ 0.1 ดังนั้นค่า K_f ควรมีค่าเพิ่มตามระดับแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในที่นี้คือ 0.2 จึงทำให้ค่าเฉพาะของระบบเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากฝั่งขวาของระนาบเอสมายู่ที่ฝั่งซ้ายอีกครั้ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ระบบสามารถทำงานในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบ จะอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์แสดงดังรูปที่ 13 และ 14



รูปที่ 13 ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัว เมื่อ $V_o = 80$ V (320 W)



รูปที่ 14 ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของโหลด
กำลังไฟฟ้าคงตัว เมื่อ $V_o = 90\text{ V}$ (405 W)

จากรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่า เมื่อโหลดวงจรแปลงผันแบบบักมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 60 V (180 W) เป็น 80 V (320 W) ที่เวลา 1.0 วินาที โดยกำหนดให้ K_f มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งดูได้จากแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ที่มีการกระเพื่อมของแรงดันมากขึ้น และภายหลังจากเวลา 1.6 วินาที ได้กำหนดให้วงรอบป้อนไปหน้าเริ่มทำงาน โดยที่กำหนดให้ค่า K_f ให้มีค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งจะเห็นว่า แรงดันบัสดีซี (V_{dc}) จะค่อยๆ มีผลการกระเพื่อมของแรงดันที่ลดลง ซึ่งหมายถึง ระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7 เริ่มกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง แต่ถ้าค่าระดับแรงดันไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักเพิ่มขึ้นเป็น 90 V (405 W) ดังแสดงในรูปที่ 14 จะต้องทำการเพิ่มค่า K_f ให้มีค่าเท่ากับ 0.2 ตามการคำนวณค่าเจาะจงที่แสดงในรูปที่ 12 จะสังเกตได้ว่าผลของแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ที่มีการกระเพื่อมเพิ่มขึ้นจะถูกทำให้มีค่าค่อยๆ ลดลง ส่งผลทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพได้อีกครั้ง จากผลการยืนยันด้วยการจำลองสถานการณ์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์หาค่า K_f ที่เหมาะสมกับระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำ และความน่าเชื่อถือสูง

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำการวิจัย รวมทั้งสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำการวิจัย

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแบบแอคทีฟโดยใช้วงรอบป้อนไปหน้า เพื่อกำจัดผลของโหลดวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม ซึ่งสามารถลดทอนเสถียรภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้า เอชบีเป็นดีซีได้โดยตรง ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ จากการวิเคราะห์ผลของค่าอัตราขยายเชิงสัดส่วน (K_p) โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่มีความสอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวงรอบป้อนไปหน้าที่อาศัยการวัดค่าแรงดันบัสดีซี (V_{dc}) ผ่านตัวกรองผ่านแถบ ($C_{hp}(s)$) จากนั้นนำผลของสัญญาณที่ได้มาคูณกับค่า K_f และนำมาบวกกับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่กำหนด (V_o^*) ตามที่ได้นำเสนอในบทความนี้ สามารถทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังนอกจากจะไม่ขาดเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพก่อนการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแล้ว ยังสามารถทำงานต่อไปในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้อีกด้วย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Emadi, A. Khaligh, C.H. Rivetta and G.A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," *IEEE Trans.*

- Veh. Technol.*, vol. 55, no. 4, pp. 1112-1125, Jul. 2006.
- [2] A. M. Rahimi and A. Emadi, "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, pp. 2689-2702, Jul. 2009.
- [3] U. Ghisla, I. Kondratiev and R. Dougal, "Protection of medium voltage DC power systems against ground faults and negative incremental impedances," in *IEEE SoutheastCon 2010*, Concord, NC, 2010, pp. 259-263.
- [4] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher and D.W.P. Thomas, "Stability analysis and modelling of AC-DC system with mixed load using DQ-transformation method," in *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Cambridge, UK, 2008, pp. 19-24.
- [5] A. Baghrmian and A.J. Forsyth, "Averaged-value models of twelve-pulse rectifiers for aerospace applications," in *Second International on Power Electronics, Machines and Drives*, Edinburgh, UK, 2004, pp. 220-225.
- [6] J. Mahdavi, A. Emadi, M.D. Bellar and M. Ehsani, "Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol. 44, no. 8, pp. 767-770, Aug. 1997.
- [7] T. Sopapirm, K-N. Areerak and K-L. Areerak, "Stability analysis of AC distribution system with six-pulse diode rectifier and multi-converter power electronic loads," *Int. Rev. Elect. Eng.*, vol. 6, no. 7, pp. 2919-2928, Nov./Dec. 2011.
- [8] K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G.M. Asher, L. De lillo and D. W. P. Thomas, "Stability study for a hybrid AC-DC more-electric aircraft power system," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 48 no. 1, pp. 329-347, Jan. 2012.
- [9] M. Cespedes, L. Xing and J. Sun, "Constant-power loads system stabilization by passive damping," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 7, pp. 1832-1836, Jul. 2011.
- [10] X. Liu and S. Ma, "Large signal stabilization method of constant power loads by adding R parallel damping filters," in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Montreal, QC, 2015, pp. 1314-1319.
- [11] A.M. Rahimi and A. Emadi, "Active damping in DC/DC power electronic converters: a novel method to overcome the problems of constant power loads," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1428-1439, Feb. 2009.
- [12] A.M. Rahimi, G.A. Williamson and A. Emadi, "Loop-cancellation technique: a novel nonlinear feedback to overcome the destabilizing effect of constant-power loads," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 2, pp. 650-661, Feb. 2010.
- [13] Y. Li, K.R. Vannorsdel, A.J. Zirger, M. Norris and D. Maksimovic, "Current mod control for boost converters with constant power loads," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 59, no. 1, pp. 198-206, Jan. 2012.

- [14] Y. Zhao, W. Qiao and D. Ha, "A sliding-mode duty-ratio controller for DC/DC buck converters with constant power loads," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 2, pp. 1448–1458, Mar./Apr. 2014.
- [15] M. Wu and D. D. Lu, "A novel stabilization method of LC input filter with constant power loads without load performance compromise in dc microgrid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 7, pp. 4552–4562, Jul. 2015.
- [16] T. Sopapim, K-N. Areerak and K-L. Areerak, "The active damping stabilization of AC-DC power systems feeding constant power loads," *Int. Rev. Elect. Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 287–295, Jul./Aug. 2017.
- [17] K-N. Areerak, T. Sopapim, S.V. Bozhko, C. I. Hill, A. Suyapan and K-L. Areerak, "Adaptive stabilization of uncontrolled rectifier based AC-DC power systems feeding constant power loads," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 10, pp. 8927–8935, Oct. 2018.
- [18] X. Liu, A. Forsyth, and A. Cross, "Negative input-resistance compensator for a constant power load," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 3188–3196, Dec. 2007.
- [19] P. Magne, D. Marx, B. Nahid-Mobarakeh and S. Pierfederici, "Large-signal stabilization of a dc-link supplying a constant power load using a virtual capacitor: impact on the domain of attraction," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 3, pp. 878–887, May/June 2012.
- [20] Y.R. Mohamed, A.A.A. Radwan and T. Lee, "Decoupled reference voltage-based active dc-link stabilization for pmsm drives with tight-speed regulation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 12, pp.4523– 4536, Dec. 2012.
- [21] M. Wu and D. D. C. Lu, "Investigation on active method for stabilization of LC input filter and DC/DC buck converter under voltage mode control," in *2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Sydney, NSW, 2015, pp. 721–726.
- [22] M. Wu an, D. D. C. Lu and C.K. Tse, "Direct and optimal linear active methods for stabilization of LC input filters and DC/DC converters under voltage mode control," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 5, no. 3, pp. 402–412, Sep. 2015.
- [23] T. Sopapim, "Instability mitigation of a three-phase diode rectifier feeding a controlled buck converter by using the active damping method," in *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems*, Jeju, 2018, pp. 745–748.

ประวัติผู้เขียน

นายรัฐพล โพธิ์สังข์ เกิดเมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2539 ที่จังหวัดอ่างทอง เริ่มศึกษาในระดับประถมศึกษาปีที่ 1 – 6 ที่โรงเรียนวัดสุวรรณราชหงษ์ ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 – 6 ที่โรงเรียนท่าช้างวิทยาคาร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2561 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเดิม

ในการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับทุนกิตติมศักดิ์ซึ่งเป็นทุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจำนวน 7 รายวิชาดังนี้ (1) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 1 (2) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า (3) ปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ 1 (4) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (5) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน (6) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง (7) ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการขับเคลื่อน โดยมีความสนใจในด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การควบคุมอัตโนมัติ และปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทำให้ผู้วิจัยได้รับความรู้ทางด้านการวิเคราะห์เสถียรภาพ และการสร้างเสถียรภาพร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 3 บทความดังที่ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก จ