

การสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยรูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง
เอเชียเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน



นายสุรบดินทร์ แดงด่อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2567

STABILIZATION USING FEEDFORWARD LOOP COMPENSATOR
FOR AC-DC POWER SYSTEMS WITH SLIDING MODE CONTROLLER



SURABADIN DAENGDON

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 2024

การสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยรูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี
ที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ

(ศ. ดร.กองพัน อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อาจารย์ ดร.อภิชัย สุธะพันธ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

กรรมการ

(ผศ. ดร.สุดาร์ตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ

(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุรบดีรินทร์ แดงดอน : การสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (STABILIZATION USING FEEDFORWARD LOOP COMPENSATOR FOR AC-DC POWER SYSTEMS WITH SLIDING MODE CONTROLLER)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์, 179 หน้า.

คำสำคัญ : การสร้างเสถียรภาพ/โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว/การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น/ตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า/แบบจำลองทางคณิตศาสตร์/ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน/ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน เนื่องจากโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีดังกล่าวเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม ซึ่งจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่จะส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อจะหลีกเลี่ยงการทำงานที่จุดการขาดเสถียรภาพหรือดำเนินการสร้างเสถียรภาพให้กับระบบ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เริ่มต้นการศึกษาวิจัยจากการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมต่อการนำไปศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบ จากนั้นจะดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง เพื่อคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพ และในลำดับถัดมาจะดำเนินการสร้างเสถียรภาพของระบบด้วยวิธีการห้วงแบบแอกทีฟทางด้านโหลด โดยจะอาศัยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าด้วยการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าดีซี เพื่อนำมากรองด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่านที่มีความถี่ศูนย์กลางเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรอง แล้วปรับคูณกับอัตราขยายของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า จากนั้นจะป้อนกลับไปยังตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันแบบบักเพื่อชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อได้จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ทางทฤษฎี รวมทั้งการยืนยันผลของเสถียรภาพทั้งหมดจะใช้วิธีการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป และการสร้างชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจากการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพทางทฤษฎี การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป และผลจากชุดทดสอบจริงมีความสอดคล้องและตรงกัน โดยแสดงให้เห็นว่า สามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และสามารถสร้างเสถียรภาพให้กับระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและทำงานต่อได้จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงเป็น

การยืนยันได้ว่า องค์ความรู้ สมมติฐานของงานวิจัย และวิธีการที่ได้นำเสนอมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา ศุภณัฐ งามอ้วน
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร. งามอ้วน
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. งามอ้วน

SURABADIN DAENGDON : STABILIZATION USING FEEDFORWARD LOOP
COMPENSATOR FOR AC-DC POWER SYSTEMS WITH SLIDING MODE CONTROLLER
THESIS ADVISOR : PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D., 179 PP.

Keyword : Stabilization/Constant Power Load (CPL)/Linear stability analysis/
Feedforward Loop/Mathematic model/Sliding mode control/
AC-DC converter

This thesis proposes stabilization using feedforward loop compensator for AC-DC power systems with sliding mode controller. The system load is a controlled buck converter which behaves as a constant power load (CPL). This load can cause the system to become unstable. Therefore, studying the stability of the considered system is crucial in order to prevent or mitigate the instability. The study begins with the derivation of system mathematical model using a combination of the DQ and the generalized state-space averaging (GSSA) methods. This approach provides a time-invariant model which is suitable for stability analysis. The system stability is then examined using the eigenvalue theorem to predict the unstable point. After that, an active damping method called feedforward loop compensator is applied on the load side to stabilize the system. The proposed technique detects the DC-link voltage which is filtered using a band-pass filter centered at the resonance frequency of the DC filter. The filtered signal is then scaled by a feedforward loop gain and fed back into the existing sliding mode controller of the buck converter. This process will compensate the CPL effect which allows the unstable system return to stable and can continuously operate until the rated power. The simulation on MATLAB/SIMULINK, hardware in the loop (HIL), and experiment via a test rig built in the laboratory are used to validate the theoretical analysis and confirm the system stability. The results demonstrate that the analysis, simulation, HIL, and experiment are concordant. These confirm the system unstable point and the proposed stabilization technique successfully provides the system always stable for all operating conditions within the rated power. Consequently, it can be concluded

that the thesis assumptions, the knowledge from the study results, as well as the proposed stabilization are accurate, reliable, and practically applicable.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2024

Student's Signature..... ศุภดิษฐ์ 11ดาวดือน

Advisor's Signature..... [Signature]

Co-Advisor's Signature..... อริษฐ์ ฤกษ์พันธ์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.อภิชัย สุยะพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทาง อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งยังได้ช่วยสละเวลาเพื่อตรวจทานและแก้ไข รายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนกระทั่งมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นกำลังใจและเป็นแบบอย่างที่ดี ในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

คณาจารย์ เลขานุการและผู้ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ การติดต่อประสานงาน และข้อคิด ในด้านต่าง ๆ อย่างดียิ่งมาโดยตลอด

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน การใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษา ในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกลและการควบคุม ทุกท่านที่ให้คำปรึกษา ด้านวิชาการ ด้านการดำเนินชีวิต และคอยเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่ นายหมอน - นางมะลิตา แดงดอน บิดาและมารดาของผู้วิจัย รวมถึงครอบครัว ของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในการศึกษาอย่างดียิ่ง มาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

สุรบดินทร์ แดงดอน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 สมมติฐานการวิจัย.....	5
1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.8 การจัดรูปแบบรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	6
2 ปรัชญารรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	13
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	17
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	24
2.7 สรุป.....	28
3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	29
3.1 บทนำ.....	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	29
3.3	ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	30
3.3.1	ทฤษฎีการแปลงดีคิ.....	30
3.3.2	ทฤษฎีของวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป.....	34
3.4	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในกรณีที่ไม่มีการควบคุม.....	35
3.4.1	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	35
3.4.2	การคำนวณมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและ บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	54
3.4.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	56
3.5	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการควบคุม.....	59
3.5.1	การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	59
3.5.2	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	61
3.5.3	การทำให้เป็นเชิงเส้นและการคำนวณค่าในสภาวะคงตัว.....	63
3.5.4	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	66
3.6	สรุป.....	68
4	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	69
4.1	บทนำ.....	69
4.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	69
4.2.1	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง.....	69
4.2.2	การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	72
4.3	การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	74
4.3.1	การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง.....	74
4.3.2	การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำ ของวงจรกรอง.....	76
4.4	สรุป.....	78
5	การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	79
5.1	บทนำ.....	79
5.2	การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ที่มีการดัดแปลงร่วมกับตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า.....	79
5.2.1	ทฤษฎีพื้นฐานของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า.....	80

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.2	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า ที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพ.....	82
5.2.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพและการยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพ ที่จุดการขาดเสถียรภาพ.....	90
5.2.4	การวิเคราะห์เสถียรภาพและการยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพ ที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า.....	94
5.3	สรุป.....	97
6	การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา.....	98
6.1	บทนำ.....	98
6.2	การสร้างชุดทดสอบ.....	98
6.2.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์.....	99
6.2.2	วงจรกรอง.....	100
6.2.3	วงจรแปลงผกผันแบบบัสที่มีการควบคุมด้วย ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน.....	101
6.3	ผลการทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ.....	108
6.4	สรุป.....	109
7	ผลการทดสอบเสถียรภาพของชุดทดสอบ.....	110
7.1	บทนำ.....	110
7.2	ผลการทดสอบการขาดเสถียรภาพ.....	110
7.3	ผลการทดสอบการสร้างเสถียรภาพ.....	111
7.3.1	ผลการทดสอบการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ.....	112
7.3.2	ผลการทดสอบการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ จนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด.....	113
7.4	สรุป.....	114
8	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	115
8.1	สรุป.....	115
8.2	สรุปจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	118
8.3	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	118
	รายการอ้างอิง.....	121
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่าง การศึกษา.....	134

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข.	โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณมุม การเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	165
ภาคผนวก ค.	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB.....	168
ภาคผนวก ง.	โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป.....	170
ภาคผนวก จ.	โปรแกรมสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยตัวควบคุม โหมดการเลื่อนที่มีการดัดแปลงร่วมกับตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าใน บอร์ด DSP รุ่น TMS320F335.....	173
ประวัติผู้เขียน.....		179



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....9
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ.....14
2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.....17
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.....22
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและ การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.....25
3.1	พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 3.1.....57
3.2	พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 3.2.....66

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพตัวควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....12
2.2	คุณลักษณะสมบัติแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว.....16
2.3	แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.....20
2.4	แผนภาพการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพ.....28
3.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....30
3.2	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงของคลาร์ก.....31
3.3	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta 0$ เป็นแกน dq32
3.4	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงของปาร์ค.....33
3.5	วงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....36
3.6	วงจรสมมูลของตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า ที่อยู่บนแกนหมุน dq38
3.7	วงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....39
3.8	วงจรสมมูลดีคิวของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า.....40
3.9	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่พิจารณาผลกระทบจากมุมเหลื่อม.....41
3.10	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์.....41
3.11	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์บนแกนหมุนดีคิว.....42
3.12	วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว.....44
3.13	วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว.....45
3.14	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก.....45
3.15	วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการหาแบบจำลอง.....47
3.16	สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟสของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....54
3.17	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อ d มีค่าเท่ากับ 40%.....58
3.18	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อ d มีค่าเท่ากับ 60%.....58
3.19	วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่มีการควบคุมบนแกนดีคิว ในกรณีที่มีการควบคุม.....62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุม.....	67
4.1 ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	70
4.2 ตำแหน่งของค่าเจาะจงของระบบ.....	71
4.3 ค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	72
4.4 ผลการจำลองสถานการณ์การขาดเสถียรภาพด้วยคอมพิวเตอร์.....	73
4.5 ผลการจำลองสถานการณ์การขาดเสถียรภาพด้วยฮาร์ดแวร์ในรูป.....	73
4.6 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง.....	74
4.7 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง.....	75
4.8 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง.....	75
4.9 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง.....	76
4.10 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง.....	77
4.11 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง.....	77
5.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า.....	80
5.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพ.....	81
5.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าที่ใช้ตัวกรองความถี่แถบผ่าน.....	81
5.4 วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนหมุนดีคิวของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพ.....	82
5.5 ผลตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อ K_f เท่ากับศูนย์.....	89
5.6 ผลตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อ K_f เท่ากับ 0.8.....	90
5.7 ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ.....	91
5.8 ตำแหน่งของค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ.....	91
5.9 เส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นที่จุดการขาดเสถียรภาพเมื่อ K_f มีการเปลี่ยนแปลง.....	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เมื่อมีการสร้างเสถียรภาพ ที่จุดการขาดเสถียรภาพ.....	93
5.11 การจำลองสถานการณ์บนฮาร์ดแวร์ในรูปเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพ ที่จุดการขาดเสถียรภาพ.....	94
5.12 เส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นที่จุดกำลังไฟฟ้าค่าพิกัดเมื่อ K_f มีการเปลี่ยนแปลง.....	95
5.13 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เมื่อมีการสร้างเสถียรภาพตั้งแต่ จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า.....	96
5.14 ผลการจำลองสถานการณ์บนฮาร์ดแวร์ในรูป เมื่อมีการสร้างเสถียรภาพตั้งแต่ จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า.....	96
6.1 ภาพรวมของชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	98
6.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์.....	99
6.3 การติดตั้งแผ่นระบายความร้อนสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์.....	100
6.4 วงจรกรอง.....	100
6.5 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง.....	101
6.6 ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง.....	101
6.7 ชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน.....	102
6.8 อุปกรณ์สวิตช์.....	103
6.9 อุปกรณ์ไดโอด.....	103
6.10 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก.....	104
6.11 ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัก.....	105
6.12 โหลดตัวต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัก.....	105
6.13 อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า.....	106
6.14 อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้า.....	106
6.15 วงจรขับเคลื่อน.....	107
6.16 วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า.....	107
6.17 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp TM F28335.....	108
6.18 ผลการทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ.....	109
7.1 การทดสอบการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบ.....	111
7.2 การทดสอบการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบ.....	112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.3	การทดสอบการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึง ค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดจากชุดทดสอบ.....
	114



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคที่เทคโนโลยีและนวัตกรรมทางวิศวกรรมไฟฟ้าได้พัฒนาขึ้นอย่างก้าวกระโดด วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุม (controlled power electronics) โดยเฉพาะ วงจรแปลงผันกำลัง (power converter) ไม่ว่าจะเป็น วงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี เอซีเป็นเอซี และดีซีเป็นดีซี ได้กลายมาเป็นหัวใจสำคัญของระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ เช่น ระบบไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า (electric vehicles : EVs) เครื่องบินพาณิชย์ (commercial aircrafts : CAs) และรถไฟไฟฟ้า (electric trains : ETs) เป็นต้น ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังจะมีหน้าที่ในการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย ไม่ว่าจะเป็นแบตเตอรี่ (battery) หรือแหล่งจ่ายอื่น ๆ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อโหลดต่าง ๆ ภายในระบบ รวมถึงการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าในระบบที่ใช้สำหรับการขับเคลื่อน สำหรับควบคุมการเร่ง เบรก และรักษาความเร็วให้ได้ตามต้องการ (F. A. Khera, C. Gerada, S. Bozhko and P. W. Wheeler, 2022; A. Chub, G. Buticchi, V. Sidorov and D. Vinnikov, 2022; Y. Zhu, X. Yan, Z. Wang, T. Yang, S. Bozhko and P. Wheeler, 2022; C. M, 2023; R. Carmona, A. Stowhas-Villa, C. A. Rojas, H. Renaudineau and J. Marin, 2023; S. Sahoo, K. Selvam, H. Dhiman and K. Shah, 2023; B. Luckett and J. He, 2023; F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, R. A. Hakimov, I. I. Yamalov and R. R. Urazbakhtin, 2023; S. Deng, T. Lei, R. Li, H. Yu, X. Zhang and X. Zhang, 2024; K. P and S. Prakash, 2024; อภิชัย สุยะพันธ์, 2564) นอกจากนี้วงจรแปลงผันกำลังยังเป็นส่วนที่สำคัญต่อการผลิตและใช้พลังงานทดแทน (renewable energy) ไม่ว่าจะเป็นพลังงานแสงแดด พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น โดยพลังงานเหล่านี้กำลังได้รับความสนใจจากทุกมุมโลก เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกอันเป็นสาเหตุของการเกิดสภาวะโลกร้อน (K. Mohammad, M. Amir, M. F. Rashid, A. Rahman and M. Ahmad, 2022; A. Guercio and D. Curto, 2022; A. K. S. N., S. S. P. and R. Mahalakshmi, 2022; K. L. Lijin, S. Sheik Mohammed, P. P. Muhammed Shanir and L. K. Haw, 2022; S. R. Korada, R. Brinda and I. D. Soubache, 2023; K. Saravanan and A. Ramaswamy, 2023; L. K. P. Alquiza, K. H. A. Recto, P. J. M. Loresco and J. Villalobos, 2023; N. Ahmed, M. T. Imran, Q. R. Hasnaine and S. Mahmud, 2023; F. Alsokhiry, 2024; Anita, J. Meher and K. Roy, 2024) ตัวอย่างหนึ่ง ที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของวงจรแปลงผันกำลังในระบบผลิตและใช้พลังงานทดแทน คือ การผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม โดยกังหันลมนั้นจะผลิตไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ซึ่งจำเป็นต้องใช้ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นจะ

ใช้วงจรแปลงผันแบบบัคเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าและ/หรือกำลังไฟฟ้าให้สอดคล้องต่อความต้องการของโหลดหรือแหล่งกักเก็บพลังงาน (N. Kumari, M. A. Kalam and V. Modi, 2022; A. Zentani, A. Almaktoof, M. T. E. Kahn and M. K. Elmezughi, 2022; X. Yuan, Y. Zhang and X. Peng, 2022; Y. Wang, Z. Fang, B. Zhang, Aisikaer, H. Lv and L. Song, 2023; I. -H. Chung, M. -J. Zhang and C. -P. Chu, 2024) จากระบบต่าง ๆ ที่ได้ยกตัวอย่างมานั้นส่วนใหญ่จะใช้วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวเป็นตัวควบคุมที่สามารถออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้ง่ายเนื่องจากมีวิธีการทั่วไปในการออกแบบ ยกตัวอย่างเช่น การออกแบบตัวควบคุมพีไอบรรทัดเดียว (cascade PI controller) ที่มีลูการควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นลูภายในและมีลูการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นลูภายนอก จะใช้การออกแบบโดยการหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดและเทียบสัมประสิทธิ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบมาตรฐานของระบบอันดับสอง ซึ่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ออกแบบได้สามารถลดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (steady state error) และให้ผลตอบสนองของระบบที่แม่นยำ (J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K. Chaicharoenudomrung, 2021; J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K. Chaicharoenudomrung, K. Areerak and K. Areerak, 2021; J. Pakdeeto, A. Thanommuang and K. Areerak, 2024; P. Santiprapan, K. Areerak and K. Areerak, 2024; รัฐพล โพธิ์สังข์, 2563; อลิสา ฅนอมเมือง, 2565) แต่ตัวควบคุมพีไอนี้มีข้อเสียคือ ในบางครั้งเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ตัวควบคุมดังกล่าวอาจให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัต (dynamic response) ที่ไม่ดีนัก อีกทั้งยังไม่มี ความคงทนต่อสัญญาณรบกวนหรือความแปรปรวนของพารามิเตอร์ภายในระบบอีกด้วย (M. Ahmed, M. Kuisma, and P. Silventoinen, 2004; Marouane El Azzaoui, Hassane Mahmoudi, Chafik Ed-dahmani, and Karima Boudaraia, 2016; Udaya Bhasker Manthathi, K M Annu, and Srinivas Punna, 2019; Soumya Mohanty, Abhijeet Choudhury, Swagat Pati, Sanjeeb Kumar Kar, and Subhendu Khatua, 2021; S. Mohanty, A. Choudhury, S. Pati, S. K.Kar and S. Khatua, 2021; G. Ramesh and V. R. Babu, 2022; S. Kalson and S. R. Kar, 2022; K. Gaurav, D. Joshi and S. Upadhyaya, 2023) ซึ่งจากงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาาระบบควบคุมอย่างต่อเนื่อง พบว่าตัวควบคุมที่น่าสนใจ คือ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (Sliding Mode Controller : SMC) เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็วส่งผลทำให้ระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ไวและมีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่ต่ำ นอกจากนี้ยังมีความคงทน (robustness) ที่ทำให้ยังคงสมรรถนะการควบคุมได้แม้จะมีสัญญาณภายนอกมารบกวนหรือพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง (M. Ahmed, M. Kuisma, and P. Silventoinen, 2004; El Azzaoui, M., Mahmoudi, H., Ed-dahmani, C., and Boudaraia, K. 2016; Manthathi, U. B., Annu, K. M., and Punna, S. 2019; P. Joshi and S. Seshagiri, 2020; Mohanty, S., Choudhury, A., Pati, S., Kar, S. K., and Khatua, S. 2021; I. -C. Mituletu, D. Anghel, L. Ardeljan and M. Magda, 2021; N. Setthawong, K. Areerak, P. Santiprapan, C. Panpean and K. Areerak, 2022; Lesniewski, P.; Jaskuła, M., 2023; อภิชัย สุยะพันธ์, สุรบดินทร์ แดงดอน, กองพันธ์ อารีรักษ์, 2567) อย่างไรก็ตามวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม

ไม่ว่าจะใช้ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน หรือตัวควบคุมแบบอื่น ๆ ล้วนมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant Power Loads : CPLs) ที่มีลักษณะเป็นค่าความต้านทานติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อนำโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านวงจรกรองแล้ว ค่าความต้านทานที่เป็นลบของโหลดดังกล่าวจะไปลดทอนค่าความหน่วงของวงจรกรอง จนกระทั่งทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้น โดยการขาดเสถียรภาพของระบบอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังหรือส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ และนอกจากจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบแล้ว โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวยังส่งผลให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearities) อีกด้วย (He, B., Chen, W., Li, X., Shu, L., and Ruan, X., 2022; Sun, Y., Yan, S., Xu, G., Deng, G., and Su, M., 2022; Tu, H., Yu, H., and Lukic, S., 2023; Vafamand, N., Shafie-Khah, M., Aref, M. M., and Catalao, J. P. S., 2023; Narm, H. G., Eren, S., and Karimi-Ghartemani, M., 2023; Abdollahi, M., Adabi, J., and Mousavi, S. Y. M., 2024;) ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งวงจรแปลงผันแบบบักดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยตรง การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเริ่มต้นจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย ให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง (Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M., Lillo L.D. and Thomas D.W.P., 2009; R. Matousek, I. Svare, P. Pivonka, P. Osmera, and M. Seda, 2009; T. Sopapirm, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2011; K. Chaijarunudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2011; อภิชัย สุยะพันธ์, 2558; รัฐพล โพธิ์สังข์, 2563; อลิสา ถนอมเมือง, 2565) เพื่อคาดเดาปริมาณกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่จะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพ จากนั้นจะดำเนินการสร้างเสถียรภาพโดยใช้วิธีการหวนแบบแอกทีฟทางด้านโหลดด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า (feedforward loop) เนื่องจากวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์แบบพาสซีฟเข้าไปภายในระบบไฟฟ้า จึงทำให้ไม่เกิดกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นในระบบ อีกทั้งยังสามารถชดเชยหรือกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้โดยตรงอีกด้วย (Wu, M. and Lu, D.D.C. 2015; Phosung, R., Areerak, K-L., Sopapirm, T., & Areerak, K-N. 2022.) ซึ่งการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอจะสามารถทำให้ระบบไฟฟ้าที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ โดยการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพในทางทฤษฎีของระบบทั้งหมดจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ได้จากวิธีการดีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการตรวจสอบและยืนยันผลของเสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the Loop : HIL) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdspTM F28335 และผลจากชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นการยืนยันว่าวิธีการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษา คำนวณ และสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.2.2 เพื่อศึกษาและพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง สามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบได้

1.2.3 เพื่อศึกษาและคำนวณองค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1.2.4 เพื่อศึกษาวิธีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปย้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1.2.5 เพื่อศึกษาและดำเนินการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับใช้ยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพของระบบ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1.3.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะใช้วิธีคิดร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

1.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วย SimPowerSystem™ บน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

1.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพจะใช้การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปบนโปรแกรม MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 และผลจากชุดทดสอบจริงที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

1.3.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และวิธีการดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูปย้อนไปหน้า (K_f) สำหรับการสร้างเสถียรภาพของระบบด้วยเช่นกัน

1.3.6 การสร้างเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักจะเป็นวิธีการสร้างเสถียรภาพทางด้านโหลดที่อาศัยตัวชดเชยลูปย้อนไปหน้า

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะการสร้างเสถียรภาพที่ไม่มีการปรับตัวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1.4.2 การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะดำเนินการทางด้านโหลดและพิจารณาภายใต้เงื่อนไขที่กำลังไฟฟ้าพิกัด 360 W เท่านั้น

1.4.3 การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าในระบบจะพิจารณาในย่านโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (continuous conduction mode: CCM) เท่านั้น

1.4.4 การทำให้เป็นเชิงเส้นจะอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งเท่านั้น

1.4.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเท่านั้น

1.4.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ในขณะที่การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป และผลจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

1.5 สมมติฐานของการวิจัย

การสร้างเสถียรภาพที่อาศัยตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้าสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและทำงานต่อได้จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ ซึ่งสามารถยืนยันผลของเสถียรภาพได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปและการสร้างชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน เพื่อให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและทำงานต่อได้จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า ด้วยการอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นมาช่วยในการออกแบบค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้า (K_p) ซึ่งวิธีการที่นำเสนอยังไม่มีมีการประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา อีกทั้งงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ยืนยันผลของเสถียรภาพด้วยชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่าวิธีการสร้างเสถียรภาพที่นำเสนอสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.7.2 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง สามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบได้

1.7.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1.7.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1.7.5 ได้ชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับใช้ยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพของระบบ

1.8 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย 8 บท โดยในแต่ละบทได้นำเสนอรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย สมมติฐานการวิจัย จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง พร้อมทั้งการสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมเพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาทั้งในกรณีที่ไม่มี การควบคุม และในกรณีที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ อีกทั้งการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก็ได้รับการนำเสนอไว้ในส่วนที่เหมาะสมของบทที่ 3 นี้ด้วยเช่นกัน

บทที่ 4 นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป

บทที่ 5 นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง เอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของการสร้างเสถียรภาพที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป โดยเนื้อหาของบทจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า และการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า พร้อมทั้งการออกแบบค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองที่ได้พิสูจน์ขึ้น เพื่อให้ได้ค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าที่น้อยและเพียงพอสำหรับการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ และที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าปกติของระบบซึ่งเป็นจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 6 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาสำหรับใช้ยืนยันผลการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพ โดยเนื้อหาจะกล่าวถึงรายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ ของการสร้างชุดทดสอบ รวมถึงนำเสนอผลการทดสอบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

บทที่ 7 นำเสนอผลการทดสอบการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพจากชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและแสดงให้เห็นว่า องค์ความรู้ และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

บทที่ 8 นำเสนอการสรุปผล สรุปจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ภาคผนวกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีทั้งหมด 5 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก. แสดงรายการบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา ภาคผนวก ข. แสดงรายละเอียดโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ภาคผนวก ค. แสดงรายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SINULINK บนโปรแกรม MATLAB ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ภาคผนวก ง. แสดงรายละเอียดโปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์คิโนลูปด้วยโปรแกรม MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdspTM F28335 และภาคผนวก จ. แสดงรายละเอียดโปรแกรมการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าในบอร์ด DSP รุ่น eZdspTM F28335 สำหรับชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ดำเนินการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชย
ลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อนซึ่งจากการสำรวจ
ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าได้มีผู้ทำการศึกษาค้นคว้า และพัฒนางานวิจัย
ที่เกี่ยวข้องมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในบทที่ 2 นี้ จึงได้นำเสนอการศึกษาปรัทัศนั
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยแบ่ง
รายละเอียดออกเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง งานวิจัย
ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หา
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทา
การขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยแต่ละหัวข้อได้มีการนำเสนอ
งานวิจัยตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของงานวิจัย พร้อมทั้งสรุปองค์ความรู้ที่ได้
จากการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัย
และเนื้อหาในส่วนท้ายของบทได้นำเสนองานวิจัยที่ได้รับการต่อยอดและพัฒนาขึ้นในงานวิจัย
วิทยานิพนธ์นี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุมได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับระบบต่าง ๆ
อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการใช้งานที่สูง สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า
และกำลังไฟฟ้าได้ตามความต้องการ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับระบบ
โดยรวมได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามตัวควบคุมแต่ละแบบมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้น
ในหัวข้อนี้จึงเป็นการนำเสนอการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน
ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อศึกษาและค้นหาตัวควบคุมที่มี
ความเหมาะสมต่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณา รายละเอียดดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2020	A. Kumar, P. Dwivedi, and S. Bose	บทความนี้แนะนำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัก โดยการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนใช้พื้นผิวการเลื่อนที่เป็นการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัก
2020	S. H. M. Hashmi, and A. Y. Memo	บทความนี้แนะนำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยเน้นไปที่การนำเสนอการควบคุมที่มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบ
2021	S. Mohanty, A. Choudhury, S. Pati, S. K. Kar, and S. Khatua	บทความนี้แนะนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมโหมดการเลื่อน สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ผลการเปรียบเทียบพบว่า วงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนไม่ปรากฏการฟุ้งเกิน และสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอ กล่าวคือ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าและมีความน่าเชื่อถือสูงกว่าตัวควบคุมพีไอ
2021	J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K. Chaicharoenudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้แนะนำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็น ดี ซี ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัก โดยการออกแบบพารามิเตอร์ดังกล่าวใช้วิธีการหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดและเทียบสัมประสิทธิ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบมาตรฐานของระบบอันดับสอง

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	I. -C. Mituletu, D. Anghel, L. Ardeljan, and M. Magda	บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบักด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งสามารถควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตัวควบคุมดังกล่าวจะให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว สามารถควบคุมระบบได้ตามต้องการ และมีความคงทนต่อการรบกวนจากภายนอก
2021	T. K. Roy, M. A. H. Pramanik, F. Faria, and S. K. Ghosh	บทความนี้นำเสนอการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผ่านการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบักด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสามารถให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว และมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลด และการรบกวนจากภายนอก
2022	S. Mouslim, S. Jenkal, B. Imodane, M. Ajaamoum, and M. Oubella	บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบักด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยการออกแบบตัวควบคุมอาศัยสมการพื้นผิวการเลื่อนที่เป็นการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ
2022	N. Setthawong, K-N. Areerak, P. Santiprapan, C. Panpean, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรรอกกำลังไฟฟ้าแบบแอคทีฟ โดยตัวควบคุมดังกล่าวจะให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว มีการพุงเกินที่ต่ำและมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดและการรบกวนจากภายนอก
2022	J. M. Kumbhare, S. G. Kadwane, and M. Patil	บทความนี้กล่าวถึงการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบักด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ ซึ่งมีข้อดีคือให้ผลตอบสนองที่ดีและแม่นยำ รวมถึงมีความคงทนต่อการรบกวน แต่มีข้อเสียคือการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมมีความยุ่งยากและซับซ้อน
2022	G. Ramesh, and V. R. Babu	บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซี่และตัวควบคุมฟัซซี่ สำหรับการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัก โดยผลการเปรียบเทียบพบว่า ตัวควบคุมฟัซซี่มีผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่าตัวควบคุมฟัซซี่

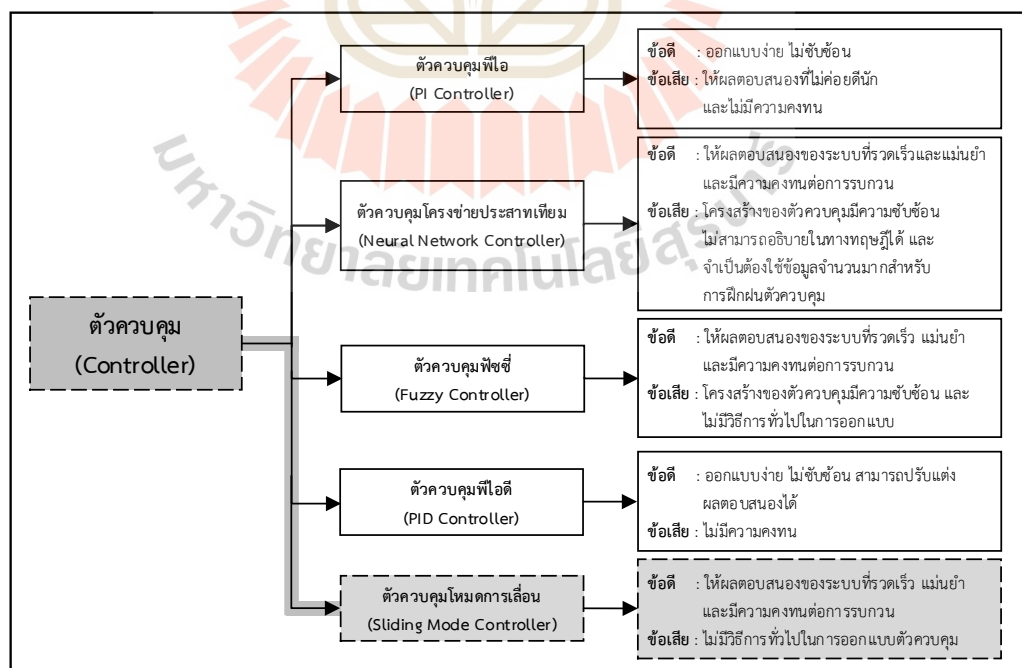
ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	S. Yadav, K. Namrata, N. Kumar, and A. Samadhiya	บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบักด้วยตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งให้ผลตอบสนองของระบบที่รวดเร็วและแม่นยำ แต่มีข้อเสียคือเกิดการฟุ้งเกินที่สูง อีกทั้งการออกแบบตัวควบคุมมีความยุ่งยากและซับซ้อน
2022	S. Kalson, and S. R. Kar	บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอดี ตัวควบคุมพีซี และตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัก ผลการเปรียบเทียบพบว่า ตัวควบคุมพีซีมีการฟุ้งเกินที่ต่ำที่สุดและสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วที่สุด ตัวควบคุมพีไอดีมีเวลาขาขึ้นที่เร็วที่สุด ในขณะที่ตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมมีความคงทนต่อการรบกวนมากที่สุด
2023	M. N. Tarik, S. P. Biswas, S. Mondal, N. I. Nahin, A. K. Paul, and S. S. Haque	บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบักที่ใช้ในการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งเป็นตัวควบคุมพื้นฐานที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ของตัวควบคุมพีไออาจไม่ดีนัก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยตรง
2023	K. Gaurav, D. Joshi, and S. Upadhyaya	บทความนี้ นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างตัวควบคุมพีซีและตัวควบคุมพีไอ สำหรับวงจรแปลงผันแบบบูสต์ ผลการเปรียบเทียบพบว่า ตัวควบคุมพีซีมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ โดยสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอ
2023	M. Adeel, U. Fayyaz, U. Rafi, and M. Umar Farooq	บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวงจรแอนะล็อกเพื่อควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัก ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบมีผลตอบสนองที่ดี อีกทั้งยังสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2024	T. Mao, L. Li, and Y. Cao	บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัสชนิดซิงโครนัสด้วยการใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผลตอบสนองของระบบมีความรวดเร็วและมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอก
2024	W. Ning, L. Li, and Y. Cao	บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัสโดยใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งสามารถควบคุมได้ทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนยังมีความคงทนสูงและให้ผลตอบสนองที่ดีและรวดเร็ว

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังตารางที่ 2.1 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ดังรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 แผนภาพตัวควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

จากแผนภาพการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม ตัวควบคุมฟuzzy ตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยตัวควบคุมพีไอดีเป็นตัวควบคุมที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและมีวิธีการทั่วไปในการออกแบบ อีกทั้งยังสามารถลดค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวได้ ซึ่งทำให้ผลตอบสนองของระบบมีความแม่นยำ แต่มีข้อเสียคือ ในบางครั้งผลตอบสนองเชิงพลวัตของระบบที่ได้อาจไม่ค่อยดีนัก และไม่มี ความคงทนต่อสิ่งรบกวนภายนอก รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบ สำหรับตัวควบคุมพีไอดี มีข้อดีคือ มีวิธีการทั่วไปในการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ซึ่งสามารถปรับแต่งผลตอบสนองเชิงพลวัตของระบบ ได้แต่มีข้อเสียคือ ไม่มีความคงทนต่อสิ่งรบกวนภายนอกและการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบ ในขณะที่ตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม มีข้อดีคือ ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว แม่นยำ และมีความคงทนต่อสิ่งรบกวน แต่มีข้อเสียคือ โครงสร้างของตัวควบคุมมีความซับซ้อนและไม่สามารถอธิบายในทางทฤษฎีได้ อีกทั้งยังจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากมาฝึกฝนเพื่อให้สามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับตัวควบคุมฟuzzy ถึงแม้จะมีผลตอบสนองที่รวดเร็ว แม่นยำ และมีความคงทนต่อสิ่งรบกวน แต่มีข้อเสียคือโครงสร้างของตัวควบคุมมีความซับซ้อนและไม่มีวิธีการทั่วไปในการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบักของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ดังแสดงด้วยพื้นที่สีเทาในรูปที่ 2.1 เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว แม่นยำ อีกทั้งยังมีความคงทนต่อการรบกวนและการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบอีกด้วย อย่างไรก็ตาม วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม ไม่ว่าจะใช้ตัวควบคุมใด ๆ ล้วนแต่ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณานั้นเกิดการขาดเสถียรภาพ อันเนื่องมาจากพฤติกรรมของวงจรแปลงผันที่เปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยเฉพาะวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมถือเป็นสิ่งสำคัญในการขับเคลื่อนและพัฒนานวัตกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมก่อนที่จะส่งจ่ายไปยังโหลดต่าง ๆ ภายในระบบ อย่างไรก็ตามเมื่อวงจรแปลงผันกำลังถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรอง จะพบว่าวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยตรง อันเป็นเหตุนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า จนกระทั่งระบบไฟฟ้าโดยรวมอาจเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

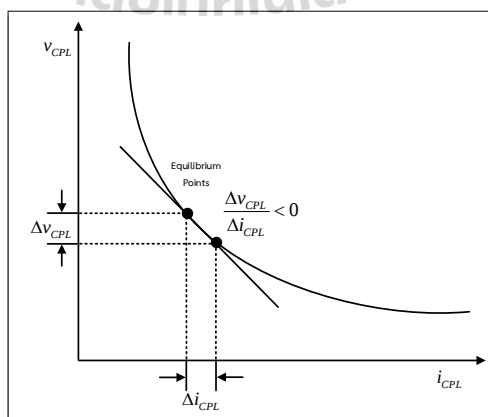
ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2019	K. E. L. Marcillo, and et al.	บทความนี้นำเสนอการทำงานของระบบที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมหลายวงจร ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังเหล่านี้จะมีพฤติกรรมเหมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพิ่มขึ้น ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ และอาจนำไปสู่ความเสียหายของระบบโดยรวมได้
2019	O. Lorzadeh, I. Lorzadeh, M. N. Soltani, and A. Hajizadeh	บทความนี้นำเสนอปัญหาเสถียรภาพในระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่เชื่อมต่อกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวผ่านวงจรกรอง ซึ่งโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะมีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบ ในขณะที่การหน่วงของวงจรกรองมีลักษณะเป็นตัวต้านทานเชิงบวก เมื่อความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวไปลดทอนความต้านทานเชิงบวกของการหน่วงจะทำให้สัญญาณไฟฟ้าของตัวกรองเกิดการสั่นไหวเพิ่มขึ้น และอาจนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบ
2020	X. Li, X. Zhang, W. Jiang, J. Wang, P. Wang, and X. Wu	บทความนี้เสนอระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันแบบบูสต์ที่มีการควบคุมหลายวงจร โดยวงจรแปลงผันแบบบูสต์นี้จะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโครงข่าย
2020	B. Babaiahgari, Y. Jeong, and J. -D. Park	บทความนี้นำเสนอปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพในระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก อันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยโหลดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบ เมื่อความต้านทานติดลบของโหลดเพิ่มขึ้น จะทำให้การหน่วงของระบบซึ่งมีลักษณะเป็นตัวต้านทานเชิงบวกลดลง จนนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบ

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2020	A. D. Scher, M. Kosik, P. Pham, D. Costinett, and E. Hossain	บทความนี้นำเสนอระบบส่งผ่านพลังงานด้วยการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (inductive power transfer system) ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเชื่อมต่ออยู่ ซึ่งโหลดนี้จะมีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อความต้านทานติดลบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ
2021	M. Mahdavyfakhr, N. Amiri, H. Lin, and J. Jatskevich	บทความนี้นำเสนอระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยโหลดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบที่ส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ
2022	C. Yuan, Y. Huangfu, H. Bai, S. Pang, H. Zhang, and W. Shi	บทความนี้นำเสนอระบบไฟฟ้าของอากาศยานไร้คนขับซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแปลงผันแบบบูสต์ และวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมเหล่านี้มีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยรวม
2023	M. Sebastià-Rullo, A. Cid-Pastor, H. Valderrama-Blavi, A. E. Aroudi, and L. M. Salamero	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังแบบบูสต์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเชื่อมต่อกับระบบผ่านวงจรกรอง ซึ่งโหลดดังกล่าวนี้มีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบ ที่จะปลดทอนความเป็นบวกของการหน่วงของวงจรกรองจนทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ
2023	S. Deng, T. Lei, X. Jin, H. Yu, X. Zhang, and X. Zhang	บทความนี้นำเสนอระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) เป็นแหล่งพลังงาน โดยมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อกับระบบผ่านวงจรกรอง ซึ่งความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะปลดทอนค่าความหน่วงของวงจรกรองที่มีค่าเป็นบวกจนนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบ

จากการสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 พบว่า วงจรแปลงผันกำลังเมื่อมีการควบคุมการทำงานให้อยู่ในสภาวะสมดุลที่จุดปฏิบัติงานหรือจุดสมดุลของระบบ (operating points หรือ equilibrium points) จะทำให้กำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังมีค่าคงที่ ดังนั้นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจึงมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งมีคุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 จากรูปจะสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลง (Δi_{CPL}) ด้วยการเพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวก็จะมีเปลี่ยนแปลง (Δv_{CPL}) ด้วยการลดลง ในทางกลับกันเมื่อกระแสไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวลดลง แรงดันไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวก็จะเพิ่มขึ้น เพื่อให้กำลังไฟฟ้ามีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้จะส่งผลให้ค่าความต้านทานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเป็นลบหรืออิมพีแดนซ์ติดลบต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งหากนำโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านวงจรกรอง โหลดดังกล่าวจะส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้น อันเนื่องมาจากค่าความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะไปลดทอนค่าความหน่วง (damping) ของวงจรกรองซึ่งปกติมีค่าความต้านทานเป็นบวก โดยการลดลงของค่าความหน่วงนี้จะส่งผลให้ แรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรองเกิดการกระเพื่อม ซึ่งหากปริมาณกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพิ่มขึ้น นั่นคืออิมพีแดนซ์ของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะมีค่าติดลบเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรองเกิดการกระเพื่อมเพิ่มขึ้นอย่างมากและไม่สามารถเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบจนกระทั่งระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้น โดยการขาดเสถียรภาพของระบบอาจจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมหรืออาจส่งผลกระทบต่อความเสียหายได้ นอกจากนี้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้น กล่าวคือเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งทำให้ระบบมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพื่อให้สามารถคาดเดาปริมาณกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่จะส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ดังรายละเอียดที่จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.2 คุณลักษณะสมบัติแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากหัวข้อที่ 2.3 ที่ผ่านมามีพบว่า วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีลักษณะเป็นค่าความต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อนำโหลดดังกล่าวมาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านวงจรกรอง ความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จะไปลดทอนค่าความต้านทานที่เป็นบวกของความหน่วงของวงจรกรอง ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรองเกิดการกระเพื่อมจนนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้ ดังนั้นหัวข้อนี้จึงเป็นการนำเสนอการศึกษางานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นวิธีสำหรับการคาดการณ์ปริมาณกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่จะส่งผลทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	W. Du, J. Zhang, Y. Zhang, Z. Qian, and F. Peng	บทความนี้ นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังในรถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ นอกจากนี้ยังได้มีการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านการวิเคราะห์ระนาบเฟส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม
2018	Y. Shen, S. Yang, H. Xing, D. Wang, and L. Wang	บทความนี้ นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ
2019	Y. Ma, K. Corzine, A. Maqsood, F. Gao, and K. Wang	บทความนี้ นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันแบบบัสที่มีการควบคุมทำงานขนานกันในระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก โดยใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงนอกจากนี้ ยังได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คำนึงถึงเสถียรภาพของระบบอีกด้วย

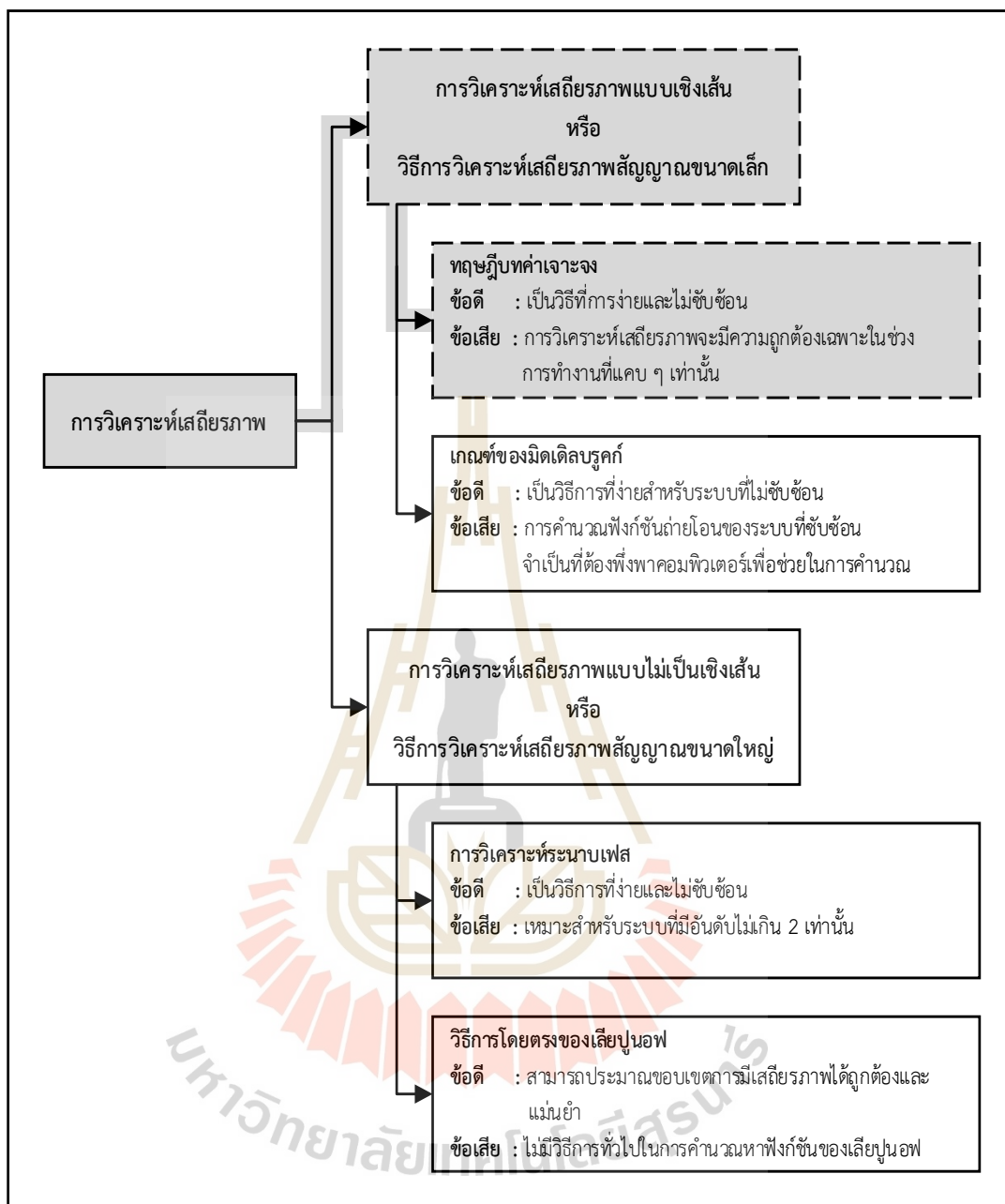
ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2020	M. Veerachary, and Anu	บทความนี้ นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันแบบบักอันดับที่สี่ (fourth-order buck converter) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ
2020	F. M. Serra, G. L. Magaldi, W. Gil-González, and O. Montoya	บทความนี้ นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่อาศัยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ โดยพิจารณาเสถียรภาพของระบบรวมด้วย
2021	R. Roy, and S. Kapat	บทความนี้ นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักที่เชื่อมต่อกับโหลดวงจรแปลงผันแบบบักผ่านวงจรกรอง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยเกณฑ์ของมิตเดิลบรูค นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบอีกด้วย
2021	B. Babes, S. Mekhilef, A. Boutaghane, and L. Rahmani	บทความนี้ นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังแบบบักที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ
2022	M. Veerachary, and Anu	บทความนี้ นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังที่มีควบคุมและเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	H. Li, and et al	บทความนี้แนะนำการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคที่มีตัวเหนี่ยวนำสองตัวเชื่อมต่อกัน (coupled inductor based buck converter) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเมื่อมีการปรับเปลี่ยนขนาดของตัวเหนี่ยวนำทั้งสอง
2023	G. Ghosh, S. Vyapari, and V. N. R	บทความนี้แนะนำการวิเคราะห์เสถียรภาพของโหลดที่ควบคุมแบบเชิงเส้นในระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และได้นำเสนอผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเมื่อขนาดของตัวต้านทานมีการเปลี่ยนแปลง
2023	Z. M. Dalala, O. S. Saadeh and, Z. U. Zahid	บทความนี้แนะนำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกักเก็บพลังงานที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังผ่านตัวเก็บประจุทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง (DC link capacitor) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยเกณฑ์ของมิตเดิลบรูค และได้นำเสนอผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวเก็บประจุทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดังตารางที่ 2.3 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนี้



รูปที่ 2.3 แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากแผนภาพในรูปที่ 2.3 จะพบว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 แนวทางหลัก ได้แก่ การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal stability analysis) และการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ (large-signal stability analysis) การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น ส่วนใหญ่มักจะใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์ของมิตเติลบุรค ซึ่งทฤษฎีบทค่าเจาะจงจะพิจารณาค่าเจาะจงของระบบที่คำนวณผ่านแบบจำลอง

ทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ส่วนเกณฑ์ของมิตเติลบลูคเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นด้วยการเขียนแผนภาพโบเด (bode plot) ของฟังก์ชันถ่ายโอนอิมพีแดนซ์ขาเข้าและขาออกของระบบ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นทั้ง 2 วิธีนี้ มีข้อดีที่เหมือนกันคือ เป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัดคือ ความแม่นยำในการคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาจะจำกัดอยู่ในช่วงการทำงานที่แคบ ๆ เท่านั้น สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรงด้วยทฤษฎีควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งนิยมใช้วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase plane analysis) และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method) โดยการวิเคราะห์ระนาบเฟสเป็นวิธีการสร้างกราฟที่แสดงวิถีการโคจรของสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะสองตัว จากนั้นตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากวิถีการโคจรบนระนาบเฟส อย่างไรก็ตามวิธีนี้สามารถใช้กับระบบที่มีอันดับไม่เกินสองเท่านั้น แต่เมื่อใช้กับระบบที่มีอันดับสูงกว่าจะต้องแปลงระบบดังกล่าวให้เป็นระบบอันดับสองก่อน ซึ่งอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้ ในขณะที่วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและสามารถประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (region of asymptotic stability: RAS) ได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีความยุ่งยากและซับซ้อนในการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ (Lyapunov's function) เนื่องจากไม่มีวิธีการทั่วไปในการคำนวณหาฟังก์ชันดังกล่าว ดังนั้นจากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ดังแสดงด้วยพื้นที่สีเทาในรูปที่ 2.3 สำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพไม่ว่าจะอาศัยวิธีการใด ๆ จำเป็นต้องดำเนินการผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจะเป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในระบบ ซึ่งหากนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพจะมีความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นในหัวข้อที่ 2.5 นี้จึงเป็นการนำเสนอการศึกษางานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมต่อการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบ โดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K. Chaicharoenudomrung, K-N. Areerak, and K-P. Areerak	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยดำเนินการผ่านวิธีการแปลงดีคิว ในขณะที่ส่วนของวงจรแปลงผันแบบบัก ดำเนินการโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ-ทั่วไป
2021	W. Liu, M. Zhang, and M. Zhan	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยวิธีการแปลงดีคิว พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม SIMULINK/MATLAB ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความถูกต้อง
2022	R. Phosung, K-N. Areerak, T. Sopapirm, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีซึ่งมีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ 2 วงจรที่ต่อขนานกัน โดยในส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีดำเนินการผ่านวิธีการแปลงดีคิว ในขณะที่วงจรแปลงผันแบบบัก จะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ
2022	S. Zhao, C. Tang, Y. Fei, and P. Deng	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอของยานยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อใช้สำหรับออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	K. Chaicharoenaudomrung, J. Pakdeeto, K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กซึ่งมีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง (bi-directional converter) และวงจรแปลงผันแบบบูสต์เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การพิสูจน์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซีดำเนินการโดยใช้วิธีการแปลงดีคิว ในขณะที่วงจรแปลงผันแบบบัคและวงจรแปลงผันแบบบูสต์ดำเนินการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2023	K. Jessen, M. Soltani, A. Hajizadeh, S. H. Jensen, and E. Scholtz	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป นอกจากนี้ยังได้มีการนำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองดังกล่าว ซึ่งจากผลการตรวจสอบพบว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้สามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2024	J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี ซึ่งมีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยการพิสูจน์ในส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีดำเนินการผ่านวิธีการแปลงดีคิว ในขณะที่วงจรแปลงผันแบบบัคพิสูจน์ผ่านวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพที่อาศัยแบบจำลองดังกล่าวอีกด้วย

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังแสดงในตารางที่ 2.4 พบว่า อุปกรณ์สวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังจะส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งหากนำไปใช้สำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่มีการกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจึงมีความสำคัญ ในปัจจุบันการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา มี 2 วิธีการที่ได้รับความนิยม ได้แก่ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method: GSSA method) และวิธีดีคิว (DQ method) วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มักใช้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ได้มีความแม่นยำ ในขณะที่วิธีดีคิวจะนิยมใช้กับส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส เช่น วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูงและไม่ซับซ้อน สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ที่ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะประกอบไปด้วยส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสและส่วนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงใช้วิธีผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เพื่อให้ได้แบบจำลองของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบได้อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมา มีเสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษางานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดลักษณะนี้จะมีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อนำโหลดดังกล่าวไปเชื่อมต่อกับระบบ ผ่านวงจรกรอง ตัวต้านทานที่เป็นลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะไปลดทอนค่าความหน่วงที่เป็นบวกของวงจรกรอง ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรองเกิดการสั่นไหว เมื่อปริมาณกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะมีค่าความต้านทานติดลบเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรองเกิดการสั่นไหวเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งไม่สามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลและขาดเสถียรภาพของระบบไปในที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อคาดเดา แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพเพียงอย่างเดียว

ไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงดำเนินการศึกษาแนวทางการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพโดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแสดงได้ดังตารางที่ 2.5 ดังนี้

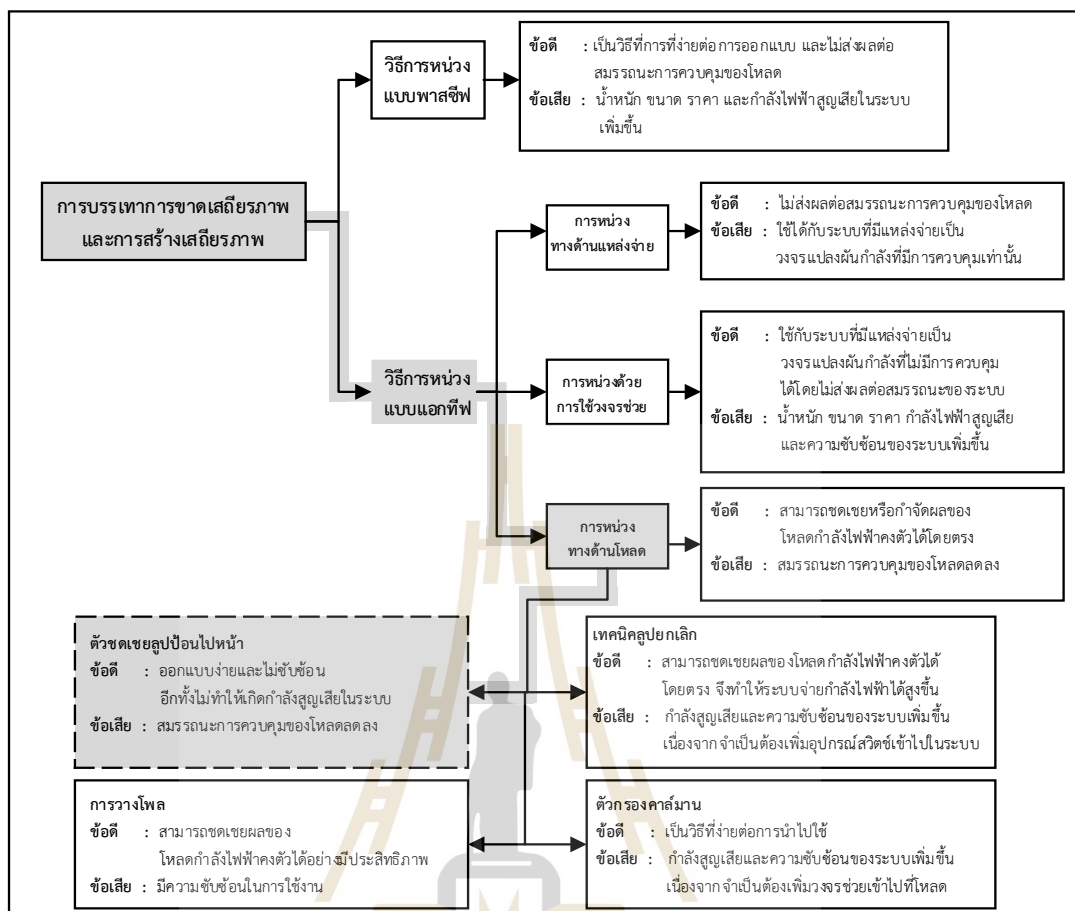
ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2018	K-N. Areerak, T. Sopapirm, S. Bozhko, C.I. Hill, A. Suyapan, and K-L. Areerak.	บทความนี้นำเสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีด้วยเทคนิคลูปยกเล็ก พร้อมทั้งยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ
2021	J. Pakdeeto, K-N. Areerak, S. Bozhko, and K-L. Areerak	บทความนี้เสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีการเชื่อมต่อกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยใช้เทคนิคการชดเชยแบบแอคทีฟทางด้านโหลดด้วยเทคนิคลูปยกเล็กและได้นำเสนอผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม SIMULINK/MATLAB
2022	Z. Shan, S. Fan, X. Liu, X. Ding, and Z. Li	บทความนี้เสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคโดยใช้วิธีการชดเชยแบบพาสซีฟด้วยวงจรช่วย ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม SIMULINK/MATLAB แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถสร้างเสถียรภาพของระบบได้
2022	K. Miao, Y. Zhang, J. Zhang, S. Fan, and X. Yin	บทความนี้เสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก ซึ่งมีการเชื่อมต่อกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวผ่านวงจรกรอง โดยการชดเชยดำเนินการผ่านตัวกรองความถี่ต่ำอันดับสองที่กรองสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นป้อนสัญญาณกลับไปยังตัวควบคุมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพื่อสร้างความต้านทานเสมือนที่ขนานกับวงจรกรอง

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	Z. Shan, S. Fan, X. Liu, X. Ding, and Z. Li	บทความนี้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลังดีซีเป็นดีซี โดยการเพิ่มวงจรช่วยเข้าไประหว่างแหล่งจ่ายและโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งวงจรช่วยเป็นการเพิ่มตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบ ทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้
2024	J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่ ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยการบรรเทาเสถียรภาพได้ดำเนินการด้วยวิธีการวางโพล
2024	R. Phosung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้เสนอวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินที่เพิ่มมากขึ้นโดยใช้การชดเชยแบบแอคทีฟทางด้านโหลดด้วยเทคนิคลูปยกเล็ก พร้อมทั้งได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของลูปยกเล็กที่อาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งได้ตรวจสอบผลของเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม SIMULINK/MATLAB และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป
2024	S. Bouroju, and A. Tah	บทความนี้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก ด้วยวิธีการหน่วงแบบแอคทีฟทางด้านโหลด โดยอาศัยการดัดแปลงตัวควบคุม พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบพาสซีฟ ซึ่งพบว่า วิธีการหน่วงแบบพาสจะส่งผลให้ขนาด ราคา น้ำหนัก และกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเพิ่มมากขึ้น

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดังตารางที่ 2.5 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยจากแผนภาพจะเห็นว่าวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถ แบ่งออกได้เป็น 2 วิธีหลัก คือ การหน่วงแบบพาสซีฟ (passive damping) และการหน่วงแบบแอกทีฟ (active damping) การหน่วงแบบพาสซีฟเป็นวิธีการปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า โดยการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุและ/หรือลดค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง รวมถึงการเพิ่มอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ตัวต้านทาน หรือตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ หรือตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำเข้าไปในระบบ ข้อดีของวิธีการนี้คือออกแบบง่าย สะดวกต่อการนำไปติดตั้งและใช้งาน อีกทั้งยังไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมของโหลดอีกด้วย แต่มีข้อเสียคือ ขนาด น้ำหนัก ราคา รวมถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบโดยรวมจะเพิ่มมากขึ้น สำหรับการหน่วงแบบแอกทีฟเป็นวิธีการสร้างความหน่วงเสมือนให้กับระบบด้วยการแก้ไขโครงสร้างของตัวควบคุม ซึ่งทำได้ด้วยการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าและ/หรือแรงดันไฟฟ้ามาวิเคราะห์เพื่อสร้างสัญญาณชดเชยและเพิ่มเข้าไปในตัวควบคุม โดยแนวทางการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 แนวทาง ได้แก่ การหน่วงแบบแอกทีฟทางด้านแหล่งจ่าย การหน่วงแบบแอกทีฟด้วยวงจรช่วย และการหน่วงแบบแอกทีฟทางด้านโหลด โดยการหน่วงแบบแอกทีฟทางด้านแหล่งจ่ายจะเหมาะสำหรับระบบที่มีแหล่งจ่ายที่สามารถควบคุมได้ ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมของโหลด แต่มีข้อจำกัดคือใช้ได้เฉพาะกับระบบที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมเท่านั้น ในขณะที่การหน่วงแบบแอกทีฟด้วยวงจรช่วยจะเป็นการเพิ่มวงจรช่วยเข้าไปในระบบระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด มีข้อดีคือ สามารถใช้ได้กับทั้งระบบที่มีแหล่งจ่ายควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ อีกทั้งยังไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมของโหลดอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ การเพิ่มอุปกรณ์ของวงจรช่วยเข้าไปในระบบจะเป็นการเพิ่มขนาด น้ำหนัก ราคา ความซับซ้อน และกำลังไฟฟ้าสูญเสียให้กับระบบ สำหรับการหน่วงแบบแอกทีฟทางด้านโหลดจะเป็นการแก้ไขหรือดัดแปลงตัวควบคุมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จึงสามารถกำจัดผลกระทบที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้โดยตรง แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ สมรรถนะการควบคุมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะลดลง ดังนั้นจากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดดังกล่าวข้างต้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้วิธีการหน่วงแบบแอกทีฟทางด้านโหลด ด้วยการเพิ่มตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าเข้าไปยังตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนเดิมของระบบที่มีอยู่แล้วสำหรับการสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังแสดงด้วยพื้นที่สีเทาของรูปที่ 2.4 ซึ่งมีข้อได้เปรียบคือไม่เพิ่มขนาด น้ำหนัก ราคา กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และความซับซ้อนให้กับระบบ และจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ดำเนินการในลักษณะนี้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้นจึงถือได้ว่าเป็นจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้



รูปที่ 2.4 แผนภาพการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพ

2.7 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง พร้อมทั้งนำเสนอการสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม ซึ่งถือเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับใช้เป็นแนวทางในการทำงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่มีการดัดแปลงร่วมกับตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า เพื่อจะทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมาเสถียรภาพ และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบ ซึ่งเป็นจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 3

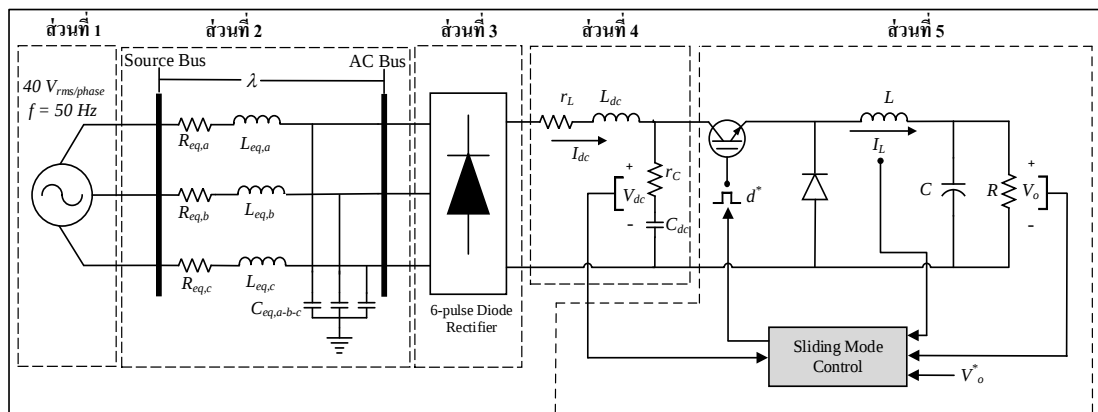
ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาและการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.1 บทนำ

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ามีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวสามารถนำมาใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมของระบบ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและสร้างเสถียรภาพได้อีกด้วย โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าจะเป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในระบบ ซึ่งเป็นแบบจำลองดังกล่าวหากนำไปใช้สำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นเนื้อหาในบทที่ 3 นี้จึงเป็นการนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยอาศัยทฤษฎีการแปลงดีคิวดัวยวิธีการแปลงของปาร์คผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพ พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB สำหรับเนื้อหาในบทที่ 3 นี้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพรวมถึงการสร้างเสถียรภาพที่จะนำเสนอไว้ในบทที่ 4 และในบทที่ 5 เป็นลำดับถัดไป

3.2 ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ คือ ระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นติซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล มีหน้าที่ผลิตไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล ส่วนที่ 2 สายส่งกำลังไฟฟ้า มีหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสไปยังวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ มีหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่ 4 วงจรกรอง มีหน้าที่กรองสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากส่วนที่ 3 ให้มีความเรียบมากขึ้น และส่วนที่ 5 วงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมดังกล่าว จะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีลักษณะเป็นค่าความต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ส่งผลทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้นโดยการขาดเสถียรภาพของระบบอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบหรือส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบ



รูปที่ 3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

3.3 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

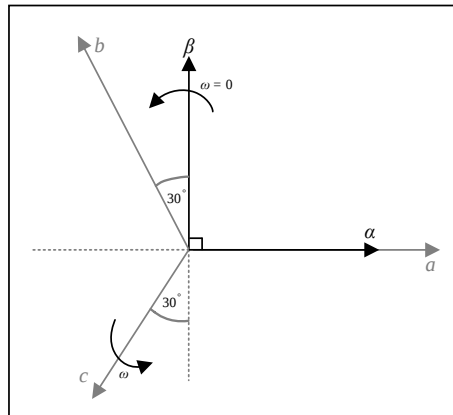
เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะพบว่าเป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในระบบ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงดำเนินการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้วิธีการแปลงดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว ดังนั้นเพื่อให้มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการดังกล่าว หัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวิธีการแปลงดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.1 ทฤษฎีของวิธีการแปลงดีคิว

วิธีการแปลงดีคิว (DQ transformation) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยลดความยุ่งยากและความซับซ้อนของระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล ซึ่งมีพื้นฐานมาจากการแปลงของคลาร์ก (Clarke's transformation) การแปลงแกน $\alpha\beta 0$ เป็นแกน dq และการแปลงของพาร์ก (Park's transformation) สามารถอธิบายพอสังเขปได้ ดังนี้

1) การแปลงของคลาร์ก

การแปลงของคลาร์กเป็นการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าจากแกนสามเฟสสมดุล (abc) ที่มีส่วนประกอบลำดับเฟสบวก (positive sequence) ซึ่งมีมุมห่างกัน 120 องศา ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนสองเฟสที่หยุดนิ่ง (stationary axis) แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 โดยจากแผนภาพเวกเตอร์การแปลงของคลาร์กในรูปที่ 3.2 จะพบว่า แกน α กับแกนเฟส a จะอยู่บนแกนเดียวกัน และแกน α จะทำมุมตั้งฉากกับแกน β ดังนั้นจากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้สมการการแปลงของคลาร์ก ดังสมการที่ (3-1) เมื่อ $f_{\alpha\beta 0}$ เป็นปริมาณทางไฟฟ้าใด ๆ ที่อยู่บนแกน $\alpha\beta 0$ และ f_{abc} เป็นปริมาณทางไฟฟ้าใด ๆ ที่อยู่บนแกนเฟส



รูปที่ 3.2 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงของคลาร์ก

$$[f_{\alpha\beta 0}] = K \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} [f_{abc}] \quad (3-1)$$

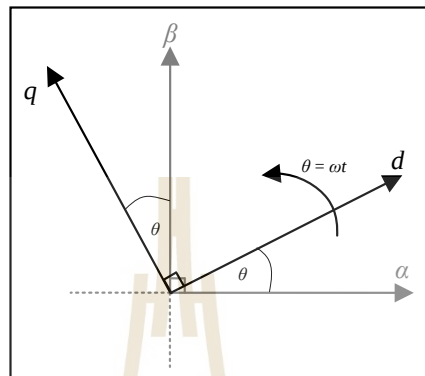
โดยที่ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปลง ซึ่งมีค่าคงที่และมีค่าขึ้นอยู่กับรูปแบบของการแปลง เช่น $K = 2/3$ สำหรับการแปลงค่ายอด (peak convention), $K = 1$ สำหรับการแปลงครึ่งเท่าของค่ายอด (one and a half time peak convention), $K = \sqrt{2}/3$ สำหรับการแปลงค่าเฟสอาร์เอ็มเอส (RMS phase convention) และ $K = \sqrt{2}/3$ สำหรับการแปลงแบบการอนุรักษ์กำลังไฟฟ้า (power conserving convention)

สำหรับการแปลงผกผันของคลาร์ก (inverse Clarke's transformation) จะเป็นการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าที่อยู่บนแกน $\alpha\beta 0$ ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าที่อยู่บนแกนเฟส abc ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3-2) ดังนี้

$$[f_{abc}] = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{K} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} [f_{\alpha\beta 0}] \quad (3-2)$$

2) การแปลงแกน $\alpha\beta 0$ เป็นแกน dq

การแปลงแกน $\alpha\beta 0$ เป็นแกน dq เป็นการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าที่หยุดนิ่งบนแกน $\alpha\beta 0$ ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าสองเฟสบนแกนหมุนเชิงตั้งฉาก (orthogonal rotating axis: dq) ผ่านการหมุนแกน $\alpha\beta 0$ ด้วยมุมหมุนของการแปลงดีคิว (θ) ที่มีค่าเท่ากับ ωt ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta 0$ เป็นแกน dq

จากรูปที่ 3.3 พบว่าแกน d และแกน q จะตั้งฉากกัน และมีมุมนำแกน $\alpha\beta 0$ เท่ากับ ωt ดังนั้นสมการสำหรับการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนหยุดนิ่ง $\alpha\beta 0$ ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนหมุน dq แสดงได้ดังสมการที่ (3-3)

$$\begin{bmatrix} f_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{\alpha\beta 0} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

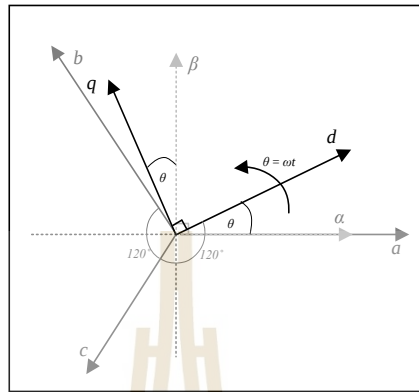
สำหรับการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนหมุน dq ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนหยุดนิ่ง $\alpha\beta 0$ แสดงได้ดังสมการที่ (3-4)

$$\begin{bmatrix} f_{\alpha\beta 0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{dq} \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

3) การแปลงของปาร์ค

การแปลงของปาร์คเป็นการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าจากแกนสามเฟสสมดุล (abc) ที่มีส่วนประกอบลำดับเฟสบวกที่มีมุมห่างกัน 120 องศา หรือ $2\pi/3$ เรเดียน ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนหมุน dq โดยตรง ซึ่งการแปลงของปาร์คมีพื้นฐานมาจากการแปลงของคลาร์กและการแปลง

แกน $\alpha\beta 0$ เป็นแกน dq ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ซึ่งการแปลงของพาร์คจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 และสมการการแปลงของพาร์คจะแสดงได้ดังสมการที่ (3-5)



รูปที่ 3.4 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงของพาร์ค

$$\begin{bmatrix} f_{dq} \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{abc} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

สำหรับการแปลงผกผันของพาร์ค (Inverse Park's transformation) ซึ่งเป็น การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าจากแกนหมุน dq ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกนเฟสสมดุล abc ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3-6)

$$\begin{bmatrix} f_{abc} \end{bmatrix} = \frac{2}{3K} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{2} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{dq} \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

โดยที่ f_{abc} เป็นปริมาณทางไฟฟ้าใด ๆ บนเฟสสมมูล abc และ f_{dq} เป็นปริมาณทางไฟฟ้าใด ๆ บนแกนหมุน dq และ K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปลง ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อการแปลงของคลาร์ก สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแปลงแบบการอนุรักษ์กำลังไฟฟ้านั้นคือ $K = \sqrt{2/3}$ เนื่องจากต้องการให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกน $\alpha\beta 0$ มีค่าเท่ากับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนเฟส abc (Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M., and Thomas D.W.P., 2008; อภิชัย สุยะพันธ์, 2558; รัฐพล โพธิ์สังข์, 2563; อลิสา ถนนอมเมือง, 2565)

3.3.2 ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปนิยมใช้สำหรับการกำจัดผลของอุปกรณ์ของอุปกรณ์สวิตช์วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี ซึ่งวิธีดังกล่าวจะใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex fourier series) ของตัวแปรสถานะของวงจรไปเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง โดยอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถอธิบายรายละเอียดพอสังเขปได้ดังนี้

โดยทั่วไป สัญญาณ $f(t)$ ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ (periodic signal) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (3-7)

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

โดยที่ $\langle x \rangle_k(t)$ คือ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน และ ω คือ ความถี่เชิงมุม ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $2\pi/T$ เมื่อ T คือ คาบ

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะกำหนดให้สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน $\langle x \rangle_k(t)$ ของสัญญาณเป็นตัวแปรสถานะของระบบ ซึ่งสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนจะสามารถหาได้จากสมการ (3-8) ดังนี้

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

โดยคุณสมบัติที่จำเป็นของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน $\langle x \rangle_k(t)$ มีดังนี้

1. คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (3-9)

$$\frac{d}{dt} \langle x \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega \langle x \rangle_k \quad (3-9)$$

2. คุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณแสดงได้ดังสมการที่ (3-10)

$$\frac{d}{dt}\langle x \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega\langle x \rangle_k \quad (3-10)$$

3. ถ้า $f(t)$ คือ ค่าจริง แล้วสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนที่ค่า k ติดลบ จะแสดงได้ดังสมการที่ (3-11)

$$\langle x \rangle_{-k} = \overline{\langle x \rangle_k} = \langle x \rangle_k^* \quad (3-11)$$

4. คุณสมบัติเวลาเลื่อนแสดงได้ดังสมการที่ (3-12)

$$\text{ถ้า } f(t) \rightarrow f(t-\tau) \text{ จะได้ } \langle x \rangle_k \rightarrow \langle x \rangle_k e^{-j\frac{2\pi k\tau}{T}} \quad (3-12)$$

จากสมการที่ (3-7) และสมการที่ (3-8) ตัวแปร k จะบ่งบอกถึงความถูกต้องของการใช้อนุกรมฟูริเยร์ ถ้า k มีค่าเป็นอนันต์ ค่าผิดพลาดจากการประมาณจะมีค่าเท่ากับ 0 ถ้าสัญญาณที่ไม่ปรากฏการสั่นไหว สามารถกำหนดให้ค่า k เท่ากับ 0 ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่าการประมาณค่าอันดับศูนย์ และถ้าสัญญาณมีการสั่นไหวสามารถกำหนดให้ k มีค่าเท่ากับ -1, 0, 1 จะเรียกวิธีนี้ว่าการประมาณค่าอันดับหนึ่ง (กองพัน อารีรักษ์, 2564)

3.4 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในกรณีที่ไม่มีการควบคุม

3.4.1 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีการควบคุมจะอาศัยทฤษฎีการแปลงดีคิวโดยใช้การแปลงของปาร์คผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสสมดุลที่ประกอบด้วย ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า กระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล สายส่งกำลังไฟฟ้า และวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ จะใช้วิธีการแปลงของปาร์ค ส่วนของทางด้านโหลดหรือวงจรแปลงผันแบบบักจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยในขั้นแรกจะพิจารณาที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุลซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการที่ (3-13)

$$v_{s,abc} = \begin{bmatrix} v_m \sin(\omega t) & v_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & v_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}^T \quad (3-13)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-13) ร่วมกับสมการการแปลงของพาร์คจะได้สมการของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุลที่อยู่บนแกนหมุนดีควัดังสมการที่ (3-14) ดังนี้

$$\begin{cases} v_{sd} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(\lambda + \phi - \phi_1) \\ v_{sq} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(\lambda + \phi - \phi_1) \end{cases} \quad (3-14)$$

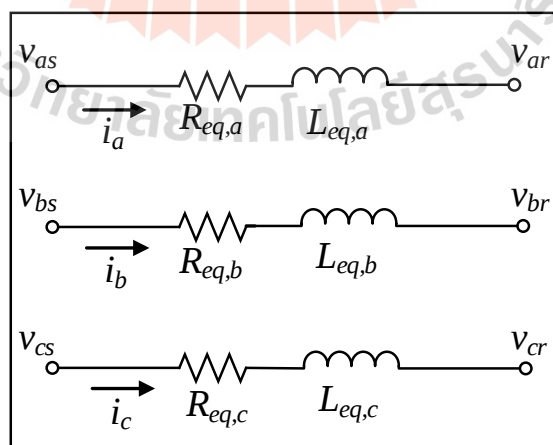
โดยที่ v_m คือ ค่ายอดแรงดันเฟสที่แหล่งจ่าย

λ คือ มุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

ϕ คือ มุมเฟสที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

ϕ_1 คือ มุมการหมุนของแกนดีคว

ลำดับถัดมาพิจารณาวงจรสมมูลของสายส่งที่มีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ดังจะแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.5 จะสามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3-15)

$$\Delta v_{abc} = R_{eq} i_{abc} + L_{eq} \frac{d}{dt} i_{abc} \quad (3-15)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-15) ร่วมกับสมการการแปลงของพาร์คและสมการการแปลงผกผันของพาร์ค จะได้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวงจรสมมูลของสายส่งที่อยู่บนแกนหมุน dq ดังรายละเอียดที่แสดงดังสมการที่ (3-16) ถึงสมการที่ (3-18)

$$T^{-1} \cdot \Delta v_{dq0} = R_{eq} T^{-1} \cdot i_{dq0} + L_{eq} \frac{d}{dt} (T^{-1} i_{dq0}) \quad (3-16)$$

$$T^{-1} \cdot T \cdot \Delta v_{dq0} = R_{eq} T^{-1} \cdot T \cdot i_{dq0} + T \cdot L_{eq} \frac{d}{dt} (T^{-1} i_{dq0}) \quad (3-17)$$

$$\Delta v_{dq0} = R_{eq} i_{dq0} + L_{eq} \frac{d}{dt} i_{dq0} + L_{eq} i_{dq0} \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

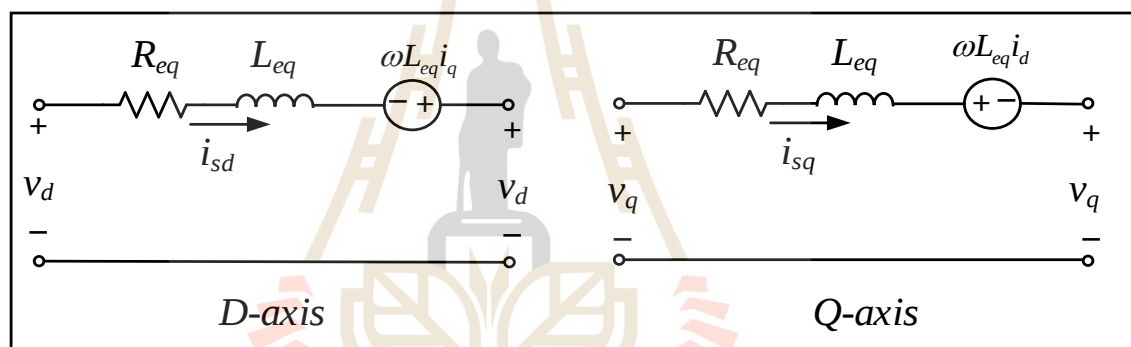
โดยที่ $T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$

$$T^{-1} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{2} \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{2} \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (3-18) จะสามารถจัดรูปเพื่อให้ได้สมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกนหมุน dq ได้ดังสมการที่ (3-19)

$$\begin{cases} \Delta v_d = R_{eq} i_d + L_{eq} \frac{d}{dt} i_d - \omega L_{eq} i_q \\ \Delta v_q = R_{eq} i_q + L_{eq} \frac{d}{dt} i_q + \omega L_{eq} i_d \end{cases} \quad (3-19)$$

และจากสมการที่ (3-19) สามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลของตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุน dq ได้ ดังรูปภาพที่ 3.6

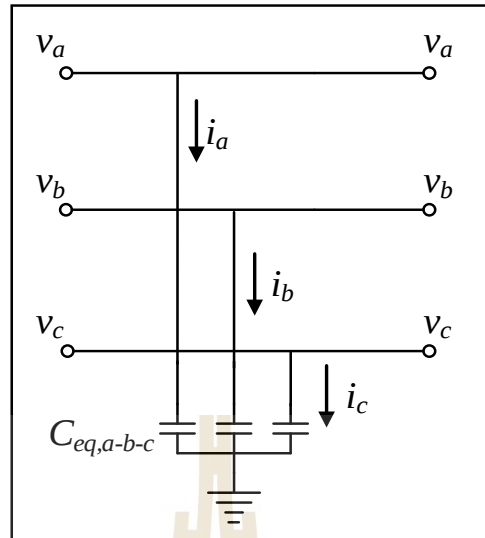


รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุน dq

เมื่อพิจารณาเฉพาะตัวเก็บประจุของวงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้างี้แสดงในรูปที่ 3.7 จะสามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3-20)

$$i_{abc} = C_{eq} \frac{d}{dt} v_{abc} \quad (3-20)$$

จากสมการที่ (3-20) เมื่อใช้การแปลงของปาร์คและการแปลงผกผันของปาร์ค จะได้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกนหมุนดีคิว ดังรายละเอียดที่แสดงดังสมการที่ (3-21) ถึงสมการที่ (3-23)



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลของสายส่งกำลังไฟฟ้า

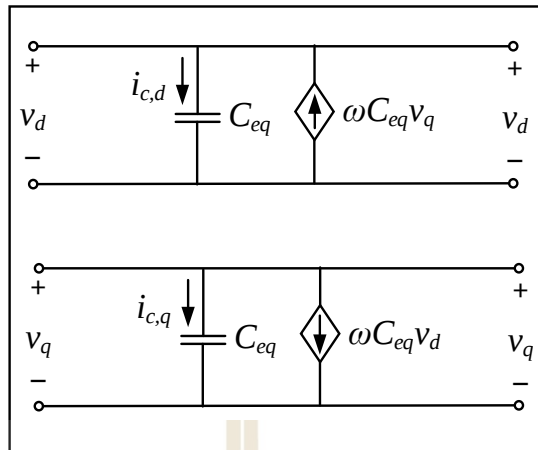
$$X^{-1}i_{dq0} = C_{eq} \frac{d}{dt} X^{-1}v_{dq0} \quad (3-21)$$

$$X \cdot X^{-1}i_{dq0} = X \cdot C_{eq} \frac{d}{dt} (X^{-1}v_{dq0}) \quad (3-22)$$

$$i_{dq0} = C_{eq} \frac{d}{dt} v_{dq0} + C_{eq} \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} v_{dq0} \quad (3-23)$$

จากสมการที่ (3-23) จะสามารถจัดรูปเพื่อให้ได้สมการของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกนหมุนดีคิว ได้ดังสมการที่ (3-24) ซึ่งจากสมการจะสามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดีคิวได้ดังรูปที่ 3.8

$$\begin{cases} i_d = -\omega C_{eq} v_q + C_{eq} \frac{d}{dt} v_d \\ i_q = \omega C_{eq} v_d + C_{eq} \frac{d}{dt} v_q \end{cases} \quad (3-24)$$



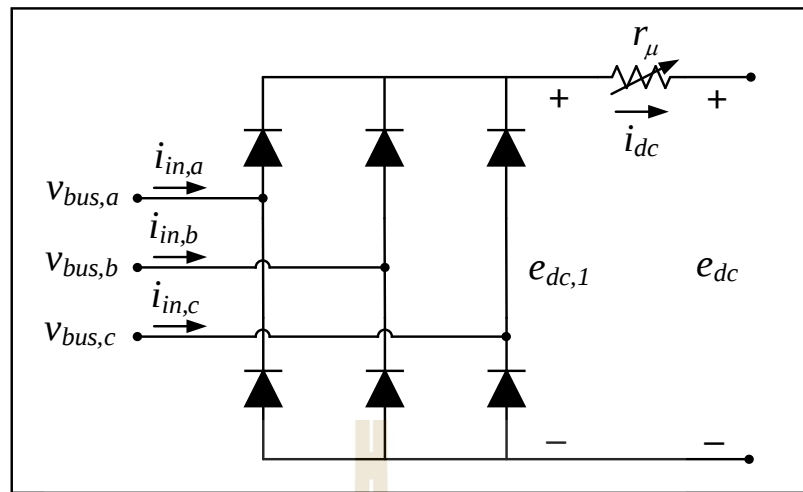
รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลคิควของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า

ในลำดับต่อมาจะพิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตช์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้การแปลงของปาร์คมากำลังจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าวเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยการพิสูจน์หาแบบจำลองจะต้องอยู่ภายใต้สมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. แอมพลิจูด (amplitude) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสต้องมีค่าคงที่และสมดุล
2. ไม่พิจารณาฮาร์มอนิก (harmonics) ที่เกิดขึ้นในระบบ
3. มุมเหลื่อม (overlap angle : μ) มีค่าน้อยกว่า 60 องศา
4. วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ทำงานในช่วงโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (continuous conduction mode : CCM)

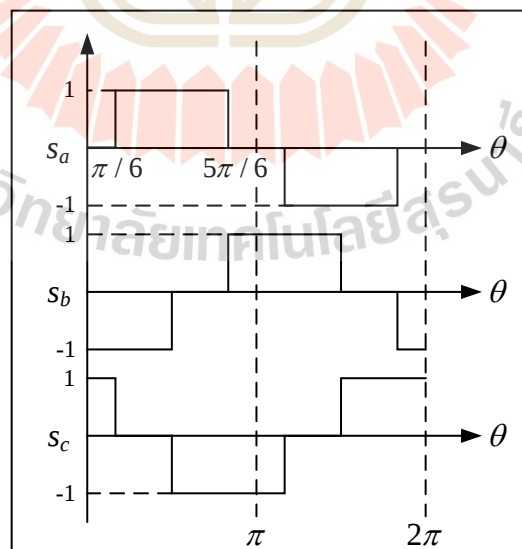
จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 3.1 จะพบว่า L_{eq} ของสายส่งกำลังไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดมุมเหลื่อมและแรงดันขาออกของวงจรเรียงกระแสตก ซึ่งผลกระทบเหล่านี้สามารถพิจารณาแทนได้ด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ (r_μ) ทางด้านขาออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแสดงดังรูปที่ 3.9 และค่า r_μ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-25)

$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (3-25)$$



รูปที่ 3.9 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่พิจารณาผลกระทบจากมุมเหลื่อม

จากรูปที่ 3.9 กำหนดให้ $e_{dc,1}$ เป็นแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์โดยไม่พิจารณามุมเหลื่อม ในขณะที่ e_{dc} เป็นแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่พิจารณาผลของมุมเหลื่อม และสัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ในกรณีที่ไม่นำถึงผลกระทบจากมุมเหลื่อมแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

เมื่อพิจารณาสัญญาณการสวิตช์ในรูปที่ 3.10 ร่วมกับสมการการแปลงของปาร์ค ในสมการที่ (3-5) จะสามารถแสดงรายละเอียดการแปลงสัญญาณการสวิตช์ให้อยู่บนแกนหมุนดีคิวได้ ดังสมการที่ (3-26) ถึงสมการที่ (3-27)

$$s_{dq0} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot T \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi) & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi\right) & \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \phi\right) \end{bmatrix}^T \quad (3-26)$$

$$s_{dq0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi - \theta) \\ \cos(\omega t + \phi - \theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

โดยที่ ϕ คือ มุมเฟสที่บัสแรงดันไฟฟ้า
 ϕ_1 คือ มุมการหมุนของแกนดีคิว

เมื่อความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าระหว่างด้านขาเข้าและด้านขาออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์แสดงได้ดังสมการที่ (3-28) ถึง (3-29) ตามลำดับ

$$i_{in,abc} = s_{abc} i_{dc} \quad (3-28)$$

$$e_{dc,1} = s_{abc}^T v_{bus,abc} \quad (3-29)$$

จากสมการที่ (3-28) สามารถแปลงสมการดังกล่าวให้อยู่บนแกนหมุนดีคิวได้ ดังสมการที่ (3-30) ดังนี้

$$\begin{cases} i_{in,d} = s_d i_{dc} \\ i_{in,q} = s_q i_{dc} \end{cases} \quad (3-30)$$

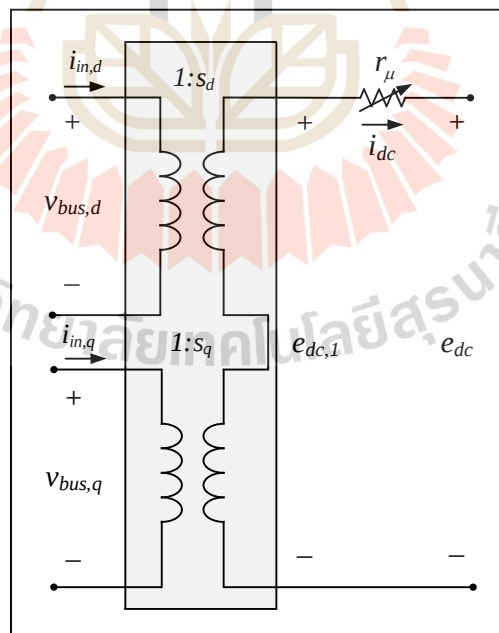
แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ดังสมการที่ (3-29) จะสามารถแปลงให้อยู่บนแกนหมุนดีคิวได้ ดังรายละเอียดที่แสดงด้วยสมการที่ (3-31) ถึงสมการที่ (3-33)

$$e_{dc,1} = [X^{-1} \cdot s_{dq0}]^T [X^{-1} \cdot v_{bus,dq0}] \quad (3-31)$$

$$e_{dc,1} = s_{dq0}^T [X^{-1}]^T [X^{-1} \cdot v_{bus,dq0}] \quad (3-32)$$

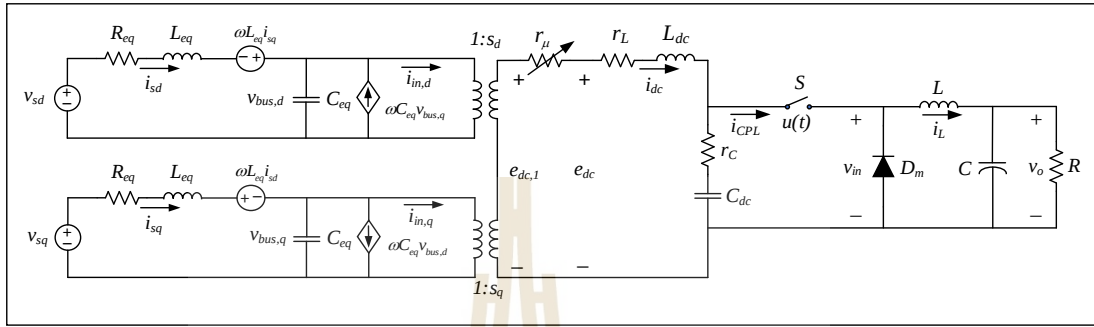
$$e_{dc,1} = s_d v_{bus,d} + s_q v_{bus,q} \quad (3-33)$$

จากสมการที่ (3-30) และสมการที่ (3-33) สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์บนแกนหมุนดีคิว ซึ่งจะอยู่ในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอุดมคติได้ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์บนแกนหมุนดีคิว

ดังนั้นจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 เมื่อแปลงส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล สายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ให้อยู่บนแกนหมุนดีคิว จะได้วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิวที่เป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรง แสดงได้ดังรูปที่ 3.12



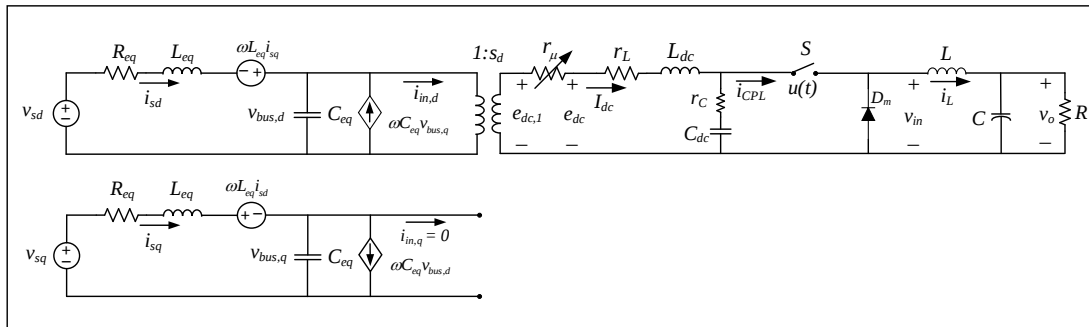
รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว

เมื่อกำหนดให้ มุมการหมุนของแกนดีคิวเท่ากับมุมเฟสที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ นั่นคือ $\phi_1 = \phi$ ในสมการที่ (3-14) และสมการที่ (3-28) จะสามารถเขียนสัญญาณการสวิตช์ที่อยู่บนแกนหมุนดีคิวได้ดังสมการที่ (3-34) และแรงดันไฟฟ้าบนแกนดีคิวได้ดังสมการที่ (3-35)

$$\begin{cases} s_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \\ s_q = 0 \end{cases} \quad (3-34)$$

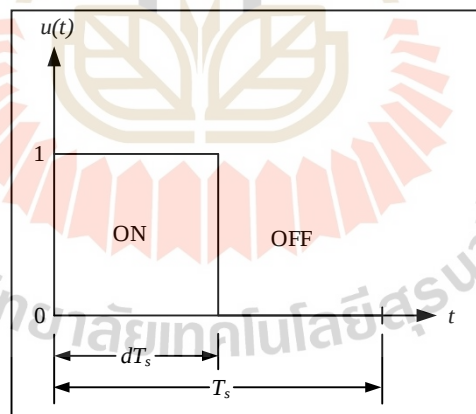
$$\begin{cases} v_{sd} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(\lambda) \\ v_{sq} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(\lambda) \end{cases} \quad (3-35)$$

จากสมการที่ (3-36) จะพบว่าสัญญาณการสวิตช์บนแกนคิวเท่ากับศูนย์ ($s_q = 0$) ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าขาเข้าของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์บนแกนคิวในสมการที่ (3-30) เท่ากับศูนย์ กล่าวคือ $i_{in,q} = 0$ ซึ่งทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่บนแกนคิวถูกกำจัด ดังนั้นจะสามารถเขียนวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิวได้ดังรูปที่ 3.13 ดังนี้



รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานบนแกนดีคิว

จากรูปที่ 3.13 จะสังเกตได้ว่าวงจรแปลงผันแบบบักยังมีตัวแปรของสัญญาณการสวิตช์ $u(t)$ ปรากฏอยู่ซึ่งส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะยังเป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาทำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก โดยขั้นแรกจะพิจารณาสัญญาณการสวิตช์ของวงจรดังกล่าว ซึ่งมีลักษณะการทำงานในโหมดการนำกระแส (on) และหยุดนำกระแส (off) ในหนึ่งคาบการสวิตช์ (T_s) แสดงได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก

จากรูปที่ 3.14 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก แสดงได้ดังสมการที่ (3-36)

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (3-36)$$

โดยที่ d คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle)

เมื่อพิจารณาวงจรแปลงผันแบบบักในรูปที่ 3.13 จะพบว่า ในขณะที่สวิตช์ปิด (on) จะทำให้ $i_{CPL} = i_L$ และ $v_{in} = v_{dc}$ และเมื่อสวิตช์เปิด (off) จะทำให้ $i_{CPL} = 0$ และ $v_{in} = 0$ ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของ i_{CPL} กับ i_L จะสามารถเขียนสมการที่อยู่ในรูปของ $u(t)$ แสดงได้ดังสมการที่ (3-37) ดังนี้

$$i_{CPL} = u(t)i_L \quad (3-37)$$

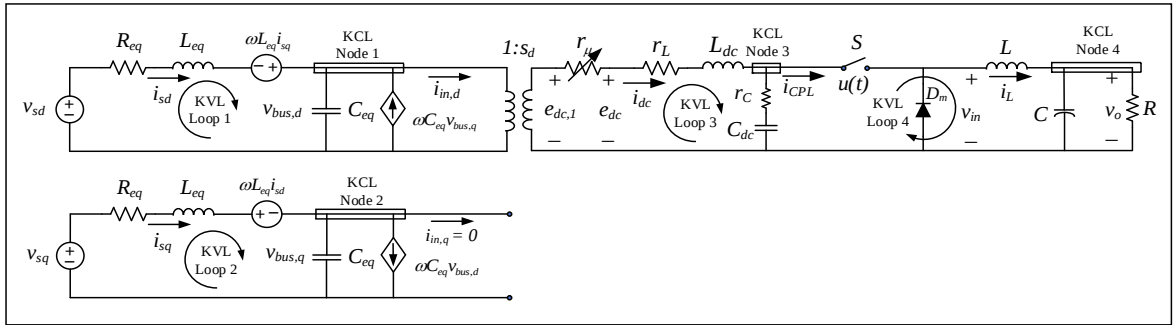
และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ v_{in} และ v_{dc} จะสามารถเขียนสมการที่อยู่ในรูปของสัญญาณการสวิตช์ $u(t)$ แสดงได้ดังสมการที่ (3-38)

$$v_{in} = u(t)v_{dc} \quad (3-38)$$

ดังนั้นจะสามารถกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปโดยใช้การประมาณอันดับศูนย์ได้โดย $u(t)$ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะถูกแทนด้วย d ที่เป็นค่าวัฏจักรหน้าที่ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (3-39)

$$\langle u \rangle_0(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} u(t) e^{j\omega t} dt = d \quad (3-39)$$

สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law) และกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law) มาวิเคราะห์วงจรสมมูลอย่างง่ายของรูปที่ 3.15 ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังสมการที่ (3-40) ถึงสมการที่ (3-47) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.15 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการหาแบบจำลอง

- พิจารณาวงรอบที่ 1 (Loop 1) โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$i_d = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{sd} + \omega i_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} v_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(\lambda) \quad (3-40)$$

- พิจารณาวงรอบที่ 2 (Loop 2) โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$i_q = -\omega i_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} v_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(\lambda) \quad (3-41)$$

- พิจารณาโหนดที่ 1 (Node 1) โดยใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$\dot{v}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} i_{sd} - \omega v_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} i_{dc} \quad (3-42)$$

- พิจารณาโหนดที่ 2 (Node 2) โดยใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$\dot{v}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} i_{sq} - \omega v_{bus,d} \quad (3-43)$$

- พิจารณาโหนดที่ 3 (Node 3) โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$i_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} v_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} i_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} v_{dc} + \frac{r_C u(t)}{L_{dc}} i_L \quad (3-44)$$

- พิจารณาโหนดที่ 3 (Node 3) โดยใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$\dot{v}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} i_{dc} - \frac{u(t)}{C_{dc}} i_L \quad (3-45)$$

- พิจารณาวงรอบที่ 4 (Loop 4) โดยใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$i_L = \frac{u(t)}{L} v_{dc} - \frac{1}{L} v_o \quad (3-46)$$

- พิจารณาโหนดที่ 4 (Node 4) โดยใช้กฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$\dot{v}_o = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} v_o \quad (3-47)$$

ดังนั้นจากการประยุกต์ใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์ที่ได้ตั้งสมการที่ (3-40) จนถึงสมการที่ (3-47) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ตั้งสมการที่ (3-48)

$$\begin{cases}
 \dot{i}_d = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_d + \omega i_q - \frac{1}{L_{eq}} v_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(\lambda) \\
 \dot{i}_q = -\omega i_d - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_q - \frac{1}{L_{eq}} v_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(\lambda) \\
 \dot{v}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} i_d - \omega v_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} i_{dc} \\
 \dot{v}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} i_q - \omega v_{bus,d} \\
 \dot{i}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} v_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} i_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} v_{dc} + \frac{r_c u(t)}{L_{dc}} i_L \\
 \dot{v}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} i_{dc} - \frac{u(t)}{C_{dc}} i_L \\
 \dot{i}_L = \frac{u(t)}{L} v_{dc} - \frac{1}{L} v_o \\
 \dot{v}_o = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} v_o
 \end{cases} \quad (3-48)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังสมการที่ (3-48) จะพบว่า แบบจำลองเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องจากผลของสัญญาณการสวิตช์ ($u(t)$) ของวงจรแปลงผันแบบบัก ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว ด้วยการกำหนดตัวแปรสถานะของแบบจำลองในสมการที่ (3-48) ให้เป็นตัวแปรสถานะในรูปของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนที่ใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ ดังแสดงได้ดังสมการที่ (3-49)

$$\begin{cases}
 \langle i_d \rangle_0 = i_d \\
 \langle i_q \rangle_0 = i_q \\
 \langle v_{bus,d} \rangle_0 = v_{bus,d} \\
 \langle v_{bus,q} \rangle_0 = v_{bus,q} \\
 \langle i_{dc} \rangle_0 = i_{dc} \\
 \langle v_{dc} \rangle_0 = v_{dc} \\
 \langle i_L \rangle_0 = i_L \\
 \langle v_o \rangle_0 = v_o
 \end{cases} \quad (3-49)$$

จากคุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์-เชิงซ้อนที่ได้อธิบายไว้แล้วดังสมการที่ (3-9) จะสามารถพิจารณาตัวแปรสถานะในรูปของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนเพื่อใช้ในการประมาณค่าอันดับศูนย์ดังสมการที่ (3-49) ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังสมการที่ (3-48) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งมีตัวแปรสถานะอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนด้วยการประมาณค่าอันดับศูนย์แสดงได้ดังสมการที่ (3-50)

$$\begin{cases}
 \langle \dot{i}_d \rangle_0 = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} \langle i_d \rangle_0 + \omega \langle i_q \rangle_0 - \frac{1}{L_{eq}} \langle v_{bus,d} \rangle_0 + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(\lambda) \\
 \langle \dot{i}_q \rangle_0 = -\omega \langle i_d \rangle_0 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} \langle i_q \rangle_0 - \frac{1}{L_{eq}} \langle v_{bus,d} \rangle_0 + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(\lambda) \\
 \langle \dot{v}_{bus,d} \rangle_0 = \frac{1}{C_{eq}} \langle i_d \rangle_0 - \omega \langle v_{bus,q} \rangle_0 - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} \langle i_{dc} \rangle_0 \\
 \langle \dot{v}_{bus,q} \rangle_0 = \frac{1}{C_{eq}} \langle i_q \rangle_0 - \omega \langle v_{bus,d} \rangle_0 \\
 \langle \dot{i}_{dc} \rangle_0 = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \langle v_{bus,d} \rangle_0 - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} \langle i_{dc} \rangle_0 - \frac{1}{L_{dc}} \langle v_{dc} \rangle_0 + \frac{r_c \langle u(t) \rangle_0}{L_{dc}} \langle i_L \rangle_0 \\
 \langle \dot{v}_{dc} \rangle_0 = \frac{1}{C_{dc}} \langle i_{dc} \rangle_0 - \frac{\langle u(t) \rangle_0}{C_{dc}} \langle i_L \rangle_0 \\
 \langle \dot{i}_L \rangle_0 = \frac{\langle u(t) \rangle_0}{L} \langle v_{dc} \rangle_0 - \frac{1}{L} \langle v_o \rangle_0 \\
 \langle \dot{v}_o \rangle_0 = \frac{1}{C} \langle i_L \rangle_0 - \frac{1}{RC} \langle v_o \rangle_0
 \end{cases} \quad (3-50)$$

และจากคุณสมบัติสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของสัญญาณการสวิตช์ $u(t)$ ที่พิจารณาเพียงการประมาณอันดับศูนย์ดังสมการที่ (3-39) ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแสดงได้ดังสมการที่ (3-51)

$$\begin{cases}
 \dot{i}_d = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}}i_d + \omega i_q - \frac{1}{L_{eq}}v_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}}\sqrt{\frac{3}{2}}v_m \cos(\lambda) \\
 \dot{i}_q = -\omega i_d - \frac{R_{eq}}{L_{eq}}i_q - \frac{1}{L_{eq}}v_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}}\sqrt{\frac{3}{2}}v_m \sin(\lambda) \\
 \dot{v}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}}i_d - \omega v_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}}\frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}}i_{dc} \\
 \dot{v}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}}i_q - \omega v_{bus,d} \\
 \dot{i}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}}\frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}}v_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}}i_{dc} - \frac{1}{L_{dc}}v_{dc} + \frac{r_C d}{L_{dc}}i_L \\
 \dot{v}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}}i_{dc} - \frac{d}{C_{dc}}i_L \\
 \dot{i}_L = \frac{d}{L}v_{dc} - \frac{1}{L}v_o \\
 \dot{v}_o = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}v_o
 \end{cases} \quad (3-51)$$

และจากสมการที่ (3-51) จะสามารถจัดรูปให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (3-52) เมื่อ **A(x,u)**, **B(x,u)**, **C(x,u)** และ **D(x,u)** คือ เมทริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix) ของระบบซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ **x** และตัวแปรอินพุต **u**

$$\begin{cases}
 \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x},\mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x},\mathbf{u})\mathbf{u} \\
 \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x},\mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x},\mathbf{u})\mathbf{u}
 \end{cases} \quad (3-52)$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ คือ $\mathbf{x} = [i_d \ i_q \ v_{bus,d} \ v_{bus,q} \ i_{dc} \ v_{dc} \ i_L \ v_o]^T$
 ตัวแปรอินพุต คือ $\mathbf{u} = [v_m]$
 ตัวแปรเอาต์พุต คือ $\mathbf{y} = [i_{dc} \ v_{dc} \ i_L \ v_o]^T$

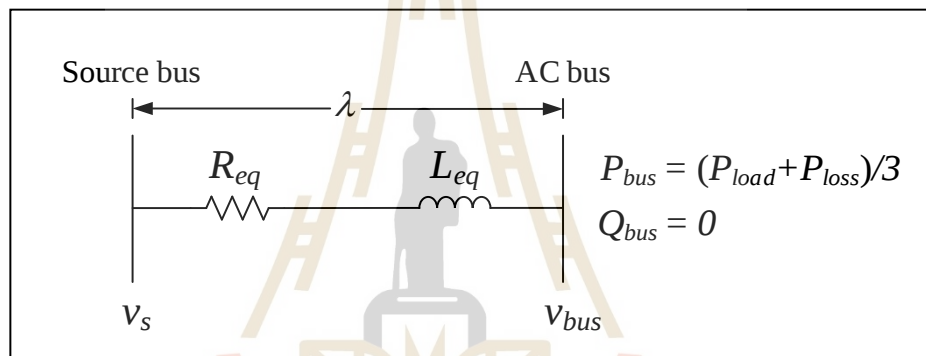
เมื่อเมทริกซ์จาโคเบียน **A(x,u)**, **B(x,u)**, **C(x,u)** และ **D(x,u)** สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-55)

ดังนั้นจะได้เมทริกซ์จาโคเบียน $A(x,u)$, $B(x,u)$, $C(x,u)$ และ $D(x,u)$ สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังสมการที่ (3-54)

$$\begin{aligned}
 A(x,u) &= \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} & \frac{r_C d}{L_{dc}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & -\frac{d}{C_{dc}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}_{8 \times 8} \\
 B(x,u) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(\lambda) \\ \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\lambda) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{8 \times 1} \\
 C(x,u) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 8} \\
 D(x,u) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{4 \times 1}
 \end{aligned} \tag{3-54}$$

3.4.2 การคำนวณมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 จะพบว่า กำลังไฟฟ้าที่ไหลบนสายส่งระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะส่งผลทำให้เกิดมุมการเลื่อนเฟส (λ) ขึ้น และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (3-54) จะสังเกตได้ว่ามีพจน์ λ ปรากฏอยู่ในแบบจำลอง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนวณค่าดังกล่าวซึ่งสามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (power flow) และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณาสายส่งกำลังไฟฟ้าเพียงเฟสเดียวเนื่องจากระบบที่พิจารณาเป็นแบบสามเฟสสมดุลและไม่พิจารณาความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า เนื่องจากความจุไฟฟ้าดังกล่าวมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟสของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

จากรูปที่ 3.16 สามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3-55)

$$S = vI^* = P_{bus} + jQ_{bus} \quad (3-55)$$

จากสมการที่ (3-55) เมื่อกำหนดให้บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นบัสอ้างอิงจะสามารถแสดงรายละเอียดวิธีการคำนวณหาค่ามุม λ ได้ดังสมการที่ (3-56) ถึงสมการที่ (3-59) ดังต่อไปนี้

$$P_{bus} + jQ_{bus} = v_{bus} \angle 0^\circ \left[\frac{v_s \angle \lambda - v_{bus} \angle 0^\circ}{Z \angle \gamma} \right]^* \quad (3-56)$$

$$P_{bus} + jQ_{bus} = v_{bus} \angle 0^\circ \left[\frac{v_s \angle (\lambda - \gamma) - v_{bus} \angle (-\gamma)}{Z} \right]^* \quad (3-57)$$

$$P_{bus} + jQ_{bus} = V_{bus} \angle 0^\circ \left[\frac{v_s \angle (\gamma - \lambda) - v_{bus} \angle (\gamma)}{Z} \right]^* \quad (3-58)$$

$$P_{bus} + jQ_{bus} = \frac{|v_{bus}| |v_s| \angle (\gamma - \lambda)}{|Z|} - \frac{|v_{bus}|^2 \angle (\gamma)}{|Z|} \quad (3-59)$$

จากคุณสมบัติ $V_m \angle (\phi) = v_m \cos(\phi) + j v_m \sin(\phi)$ จะสามารถจัดรูปสมการการไหลได้ใหม่ดังสมการที่ (3-60)

$$P_{bus} + jQ_{bus} = \left[\frac{|v_{bus}| |v_s|}{|Z|} \cos(\gamma - \lambda) + j \frac{|v_{bus}| |v_s|}{|Z|} \sin(\gamma - \lambda) \right] - \left[\frac{|v_{bus}|^2 \cos(\gamma)}{|Z|} + j \frac{|v_{bus}|^2 \sin(\gamma)}{|Z|} \right] \quad (3-60)$$

$$P_{bus} + jQ_{bus} = \left[\frac{|v_{bus}| |v_s|}{|Z|} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{|v_{bus}|^2 \cos(\gamma)}{|Z|} \right] + j \left[\frac{|v_{bus}| |v_s|}{|Z|} \sin(\gamma - \lambda) - j \frac{|v_{bus}|^2 \sin(\gamma)}{|Z|} \right] \quad (3-61)$$

จากสมการที่ (3-61) จะได้สมการของกำลังไฟฟ้าจริงและสมการของกำลังไฟฟ้า-รีแอกทีฟที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ดังสมการที่ (3-62) และสมการที่ (3-63) ตามลำดับ

$$P_{bus} = \frac{|v_{bus}| |v_s|}{|Z|} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{|v_{bus}|^2}{|Z|} \cos(\gamma) \quad (3-62)$$

$$Q_{bus} = \frac{|v_{bus}| |v_s|}{|Z|} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{|v_{bus}|^2}{|Z|} \sin(\gamma) \quad (3-63)$$

ถ้าพิจารณาให้สายส่งทั้ง 3 สาย มีกำลังไฟฟ้าที่โหลดและกำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากัน ดังนั้นจะสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ดังสมการที่ (3-64)

$$P_{bus} = \frac{P_{load} + P_{loss}}{3} \quad (3-64)$$

และจากสมการที่ (3-63) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะประมาณให้มีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ มีค่าน้อยมาก ซึ่งจะได้สมการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟดังสมการที่ (3-65)

$$Q_{bus} = 0 \quad (3-65)$$

โดยจากสมการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ดังสมการที่ (3-62) และสมการที่ (3-63) ตามลำดับจะพบว่า ไม่สามารถหาผลเฉลยของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสสลับ (V_{bus}) และมุม λ ได้โดยตรง ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้วิธีการของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) เข้ามาช่วยในการคำนวณหาผลเฉลยดังกล่าว ซึ่งโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันได้รับการนำเสนอรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ข.

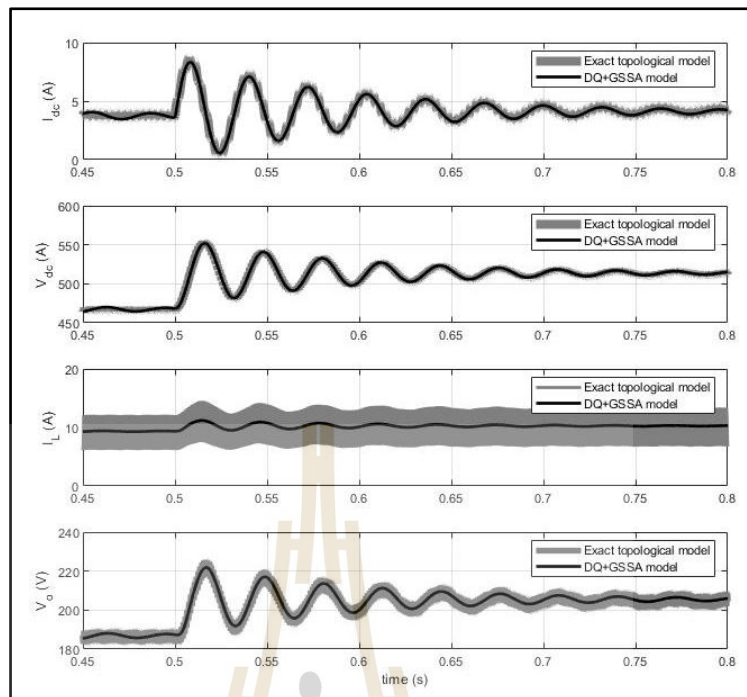
3.4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้น จะอาศัยการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองในสมการที่ (3-56) กับผลการตอบสนองของระบบจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม SIMULINK/MATLAB ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมแสดงได้ดังภาคผนวก ค. พารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังตารางที่ 3.1

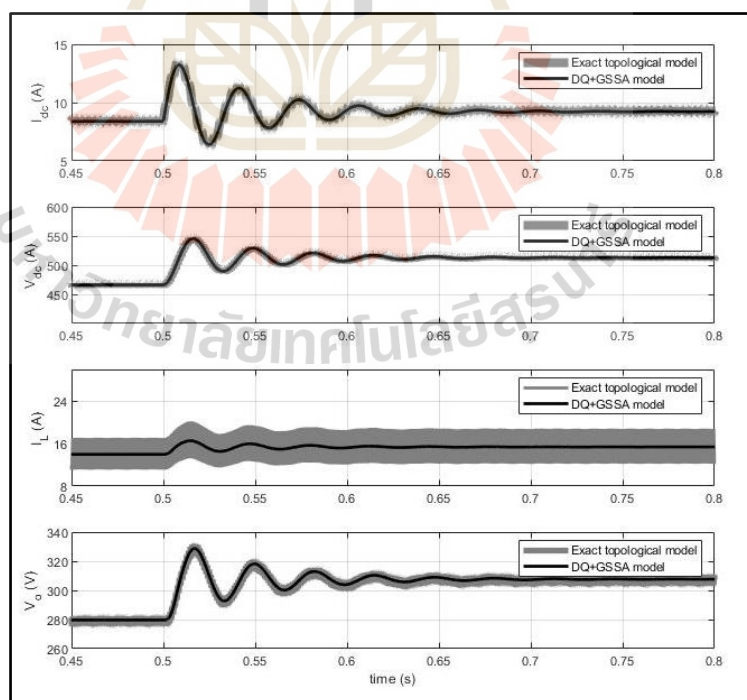
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	220 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของวงจรสมมูลสายส่ง
L_{eq}	24 μ H	ความเหนี่ยวนำของวงจรสมมูลสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของวงจรสมมูลสายส่ง
r_L	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_{dc}	50 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_C	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_{dc}	500 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
L ($\Delta I_L \leq 0.1$ A)	15 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก
C ($\Delta V_C \leq 10$ mV)	125 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัก
R	20 Ω	โหลดความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัก
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18 เมื่อกำหนดให้มีการแปลงเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตจาก 200 V_{rms} ไปเป็น 220 V_{rms} ที่เวลา 0.5 วินาที โดยในรูปที่ 3.17 ได้กำหนดให้ d มีค่าเท่ากับ 40% ในขณะที่รูปที่ 3.18 ได้กำหนดให้ d มีค่าเท่ากับ 60% ซึ่งจากการตรวจสอบความถูกต้องที่ได้พบว่า ผลตอบสนองของระบบทั้งกระแสไฟฟ้าของวงจรกรอง (i_{dc}) แรงดันไฟฟ้าของวงจรกรอง (v_{dc}) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก (i_L) และแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก (v_o) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องและตรงกันทั้งในสภาวะชั่วครู่และสภาวะคงตัว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีการควบคุมที่ได้พิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมีความถูกต้องซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุม เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพให้กับระบบต่อไปได้ โดยการพิสูจน์หาแบบจำลองในกรณีที่มีตัวควบคุมจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.5



รูปที่ 3.17 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
เมื่อ d มีค่าเท่ากับ 40%



รูปที่ 3.18 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
เมื่อ d มีค่าเท่ากับ 60%

3.5 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในกรณีที่มีการควบคุม

3.5.1 การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเป็นตัวควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีจุดเด่นคือ โครงสร้างของตัวควบคุมไม่ซับซ้อน ให้ผลตอบแทนที่รวดเร็ว และมีความคงทนแม้จะมีสัญญาณจากภายนอกมารบกวนหรือเกิดความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ภายในระบบ สำหรับการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจำเป็นที่จะต้องกำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อน โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้สมการพื้นผิวการเลื่อนเป็นแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะดังสมการที่ (3-66) เนื่องจากสมการพื้นผิวดังกล่าวสามารถพิจารณาพร้อมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักซึ่งเป็นโหนดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ จึงทำให้ง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมและการสร้างชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ (สาธิต ชลสถิตจำเริญ, 2556; S. Mouslim, S. Jenkal, B. Imodane, M. Ajaamoum and M. Oubella, 2022; T. Mao, L. Li and Y. Cao, 2024; W. Ning, L. Li and Y. Cao, 2024; อภิชัย สุยะพันธ์, สุรบดินทร์ แดงดอน, กองพันธ์ อาธิรักษ์, 2567)

$$s = ae_1 + be_2 + me_3 \quad (3-66)$$

โดยที่ e_1 เป็นค่าความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้า e_2 เป็นค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้า และ e_3 เป็นค่าปริพันธ์ของความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าที่ช่วยปรับปรุงค่าความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวให้เท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (3-67) สมการที่ (3-68) และสมการที่ (3-69) ตามลำดับ

$$e_1 = i_L^* - i_L \quad (3-67)$$

โดยที่ i_L^* คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำอ้างอิง คำนวณได้จาก $K(V_o^* - v_o)$
 i_L คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ

$$e_2 = V_o^* - v_o \quad (3-68)$$

โดยที่ V_o^* คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบักอ้างอิง
 v_o คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก

$$e_3 = \int (e_1 + e_2) dt \quad (3-69)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-66) ร่วมกับสมการที่ (3-67) สมการที่ (3-68) และสมการที่ (3-69) จะสามารถจัดรูปสมการพื้นผิวการเลื่อนแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ ได้ดังสมการที่ (3-70)

$$s = a(I_L^* - i_L) + b(V_o^* - v_o) + m \int [(I_L^* - i_L) + (V_o^* - v_o)] dt \quad (3-70)$$

จากทฤษฎีพื้นฐานของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่กล่าวไว้ว่า เมื่อระบบมีการควบคุมและเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) หมายความว่า ระบบจะเคลื่อนที่เข้าสู่ระนาบพื้นผิวการเลื่อนของสมการพื้นผิวการเลื่อน ซึ่งจะทำให้สมการพื้นผิวการเลื่อนเท่ากับศูนย์ ($s = 0$) และอนุพันธ์สมการพื้นผิวการเลื่อนเท่ากับศูนย์ ($\dot{s} = 0$) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าวร่วมกับสมการที่ (3-70) จะได้สมการอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเลื่อนแสดงดังสมการที่ (3-71) ดังนี้

$$\dot{s} = [-a - b] \begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_o \end{bmatrix} - aK\dot{v}_o + m[(K+1)(V_o^* - \dot{v}_o) - \dot{i}_L] = 0 \quad (3-71)$$

จากสมการที่ (3-71) จะพบว่า สมการอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเลื่อนปรากฏพจน์ $\dot{i}_L$ และ $\dot{v}_o$ ซึ่งเป็นตัวแปรสถานะของวงจรแปลงผันแบบบักอยู่ภายในสมการ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัก และเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (3-51) เฉพาะในส่วนของวงจรแปลงผันแบบบักจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของวงจรแปลงผันแบบบักแสดงดังสมการที่ (3-72)

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_{dc}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} d \quad (3-72)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการที่ (3-71) ร่วมกับสมการที่ (3-72) จะได้สมการอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเลื่อนของวงจรแปลงผันแบบบัคสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงได้ดังสมการที่ (3-73)

$$\begin{bmatrix} -a-b \\ \frac{i_L}{C} - \frac{v_o}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{v_o}{L} + \frac{v_{dc}d}{L} \\ \frac{i_L}{C} - \frac{v_o}{RC} \end{bmatrix} - \frac{aKi_L}{C} + \frac{aKv_o}{RC} + m \left[(K+1)(V_o^* - v_o) - i_L \right] = 0 \quad (3-73)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (3-73) ใหม่และกำหนดให้ $u_{eq} = d$ จะได้สมการสร้างสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคที่พิจารณาแสดงดังสมการที่ (3-74) ดังนี้

$$u_{eq} = \frac{v_o}{v_{dc}} \alpha - \frac{i_L}{v_{dc}} \beta + \frac{V_o^*}{v_{dc}} \gamma \quad (3-74)$$

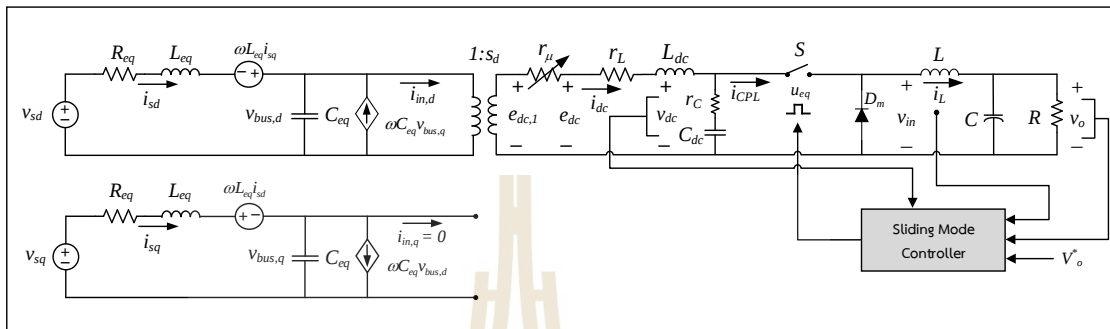
$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad \alpha &= \frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \\ \beta &= \frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \\ \gamma &= \frac{mRLC(K+1)}{aRC} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3-74) จะสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนประกอบด้วย a, b, m และ K ซึ่งไม่มีวิธีการทั่วไปในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search: ATS) สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งรายละเอียดการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว สามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จากวิทยานิพนธ์ของสาธิต ชลสถิตจำเริญ (สาธิต ชลสถิตจำเริญ, 2556)

3.5.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 ในส่วนของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส สายส่งกำลังไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ และวงจรแปลงผันแบบบัคที่ไม่มีตัวควบคุม สามารถใช้องค์ความรู้การแปลงของปาร์คและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาใช้

ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาดังที่ได้แสดงรายละเอียดไว้แล้ว ในหัวข้อที่ 3.4.1 จะได้วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีควที่มีการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีควในกรณีที่มีการควบคุม

จากรูปที่ 3.19 เมื่อพิจารณาส่วนของวงจรแปลงผันแบบบักจะพบว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่มีการพิจารณาเพิ่มเติม ดังแสดงด้วยพื้นที่สีเทาของรูปที่ 3.19 จะมีการตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก (i_L) แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของวงจรแปลงผันแบบบักหรือแรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรอง (v_{dc}) และแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก (v_o) เพื่อนำมาสร้างสัญญาณการควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (u_{eq}) ดังสมการที่ (3-74) และส่งสัญญาณที่ได้ไปควบคุมสวิตช์ S เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัก และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าในกรณีไม่มีตัวควบคุมดังสมการที่ (3-51) เมื่อทำการพิจารณาร่วมกับสมการสร้างสัญญาณการควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนในสมการที่ (3-74) กล่าวคือ แทนค่า d ในสมการที่ (3-51) ด้วย u_{eq} ตามสมการที่ (3-74) ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุมซึ่งเป็นแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแสดงได้ดังสมการที่ (3-75)

ซึ่งจากสมการจะสังเกตได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากปรากฏการคูณกันระหว่างตัวแปรสถานะ ซึ่งไม่สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นที่อาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งดังรายละเอียดที่จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 3.5.3

$$\begin{cases}
\dot{i}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{sd} + \omega i_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} v_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(\lambda) \\
\dot{i}_{sq} = -\omega i_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} v_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(\lambda) \\
\dot{v}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} i_{sd} + \omega v_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} i_{dc} \\
\dot{v}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} i_{sq} - \omega v_{bus,d} \\
\dot{i}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{eq}} v_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} i_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} v_{dc} + \frac{r_C i_L V_o^*}{v_{dc}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRCL_{dc}} \right) \\
\quad + \frac{r_C v_o i_L}{v_{dc}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRCL_{dc}} \right) - \frac{r_C i_L^2}{v_{dc}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRCL_{dc}} \right) \\
\dot{v}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} i_{dc} - \frac{v_o i_L}{v_{dc}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRCC_{dc}} \right) \\
\quad + \frac{i_L^2}{v_{dc}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRCC_{dc}} \right) - \frac{i_L V_o^*}{v_{dc}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRCC_{dc}} \right) \\
\dot{i}_L = v_o \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRCL} \right) - i_L \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRCL} \right) \\
\quad + V_o^* \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRCC_{dc}} \right) - \frac{1}{L} v_o \\
\dot{v}_o = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} v_o
\end{cases} \quad (3-75)$$

3.5.3 การทำให้เป็นเชิงเส้นและการคำนวณค่าในสภาวะคงตัว

จากหัวข้อที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (3-75) แม้ว่าจะเป็นแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแล้ว แต่ยังคงเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากปรากฏการณ์การคูณกันระหว่างตัวแปรสถานะภายในแบบจำลอง ซึ่งทำให้แบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงได้ ดังนั้นการทำให้เป็นเชิงเส้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ใช้วิธีการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในระบบให้มีความเป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง มาพิจารณาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นในรูปของการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยรอบ ๆ จุดปฏิบัติงาน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรสถานะของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กได้ดังสมการที่ (3-76) เมื่อ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ คือ เมทริกซ์จาโคเบียนของระบบ ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_0$ และค่าตัวแปรอินพุต $\mathbf{u}_0$

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (3-76)$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ คือ $\delta \mathbf{x} = [\delta i_d \ \delta i_q \ \delta v_{bus,d} \ \delta v_{bus,q} \ \delta i_{dc} \ \delta v_{dc} \ \delta i_L \ \delta v_o]^T$
 ตัวแปรอินพุต คือ $\delta \mathbf{u} = [\delta v_m \ \delta V_o^*]^T$
 ตัวแปรเอาต์พุต คือ $\delta \mathbf{y} = [\delta i_{dc} \ \delta v_{dc} \ \delta i_L \ \delta v_o]^T$

เมื่อเมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-53) ดังนั้นเมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถหาได้จากสมการที่ (3-77) ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & \frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & \frac{-3\sqrt{2}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3\sqrt{2}}{\pi L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} & a(5,6) & a(5,7) & a(5,8) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & a(6,6) & a(6,7) & a(6,8) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,7) & a(7,8) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}_{8 \times 8} \quad (3-77)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3} \cos(\lambda_0)}{\sqrt{2} L_{eq}} & 0 \\ \frac{\sqrt{3} \sin(\lambda_0)}{\sqrt{2} L_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_c i_{L,0}}{L_{dc} V_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right) \\ 0 & \frac{-i_{L,0}}{C_{dc} V_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right) \\ 0 & \frac{1}{L} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{8 \times 2}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 8}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 2}$$

เมื่อ

$$a(5,6) = -\frac{1}{L_{dc}} - \frac{r_c v_{o,0} i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) \\ + \frac{r_c i_{L,0}^2}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) - \frac{r_c V_o^* i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(5,7) = \frac{r_c v_{o,0}}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) \\ - \frac{2r_c i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) - \frac{r_c V_o^*}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(5,8) = \frac{r_c i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,6) = \frac{v_{o,0} i_{L,0}}{C_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) \\ - \frac{i_{L,0}^2}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) + \frac{V_o^* i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,7) = -\frac{v_{o,0}}{C_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) \\ + \frac{2i_{L,0}}{C_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) + \frac{V_o^*}{C_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,8) = \frac{-i_{L,0}}{C_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right)$$

$$a(7,7) = -\frac{1}{L} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right)$$

$$a(7,8) = -\frac{1}{L} + \frac{1}{L} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right)$$

จากสมการที่ (3-77) จะสังเกตได้ว่าองค์ประกอบของเมทริกซ์ **A(x₀,u₀)** และ **B(x₀,u₀)** จะปรากฏตัวแปร $v_{dc,0}$, λ_0 , $i_{L,0}$ และ $v_{o,0}$ ซึ่งเป็นค่าในสภาวะคงตัวที่จุดปฏิบัติการต่าง ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาค่าในสภาวะคงตัวของตัวแปรดังกล่าวซึ่งทำได้โดยอาศัยการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าพื้นฐาน โดยค่าในสภาวะคงตัวดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-78)

$$\begin{cases} v_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi}(\sqrt{2}v_{bus,0}) \\ v_{o,0} = V_o^* \\ i_{L,0} = \frac{v_{o,0}}{R} \end{cases} \quad (3-78)$$

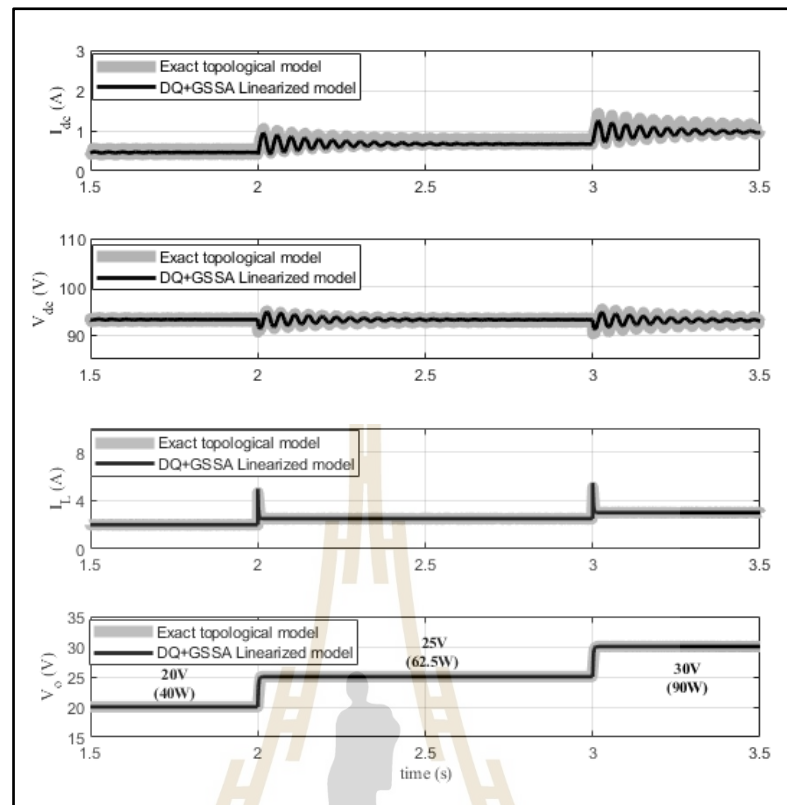
จากสมการที่ (3-78) จะปรากฏตัวแปร $v_{bus,0}$ และ λ ที่เกิดจากการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้าและบัสไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการของนิวตัน-ราฟสัน เช่นเดียวกับรายละเอียดที่ได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.4.3

3.5.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3-77) กับผลการตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB และกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีการควบคุม

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	40 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
R_{eq}	0.0956 Ω	ความต้านทานของวงจรสมมูลสายส่ง
L_{eq}	142.45 μ H	ความเหนี่ยวนำของวงจรสมมูลสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของวงจรสมมูลสายส่ง
r_L	0.2 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_{dc}	40.78 mF	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_C	0.28 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_{dc}	1051.55 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
L	15 mF	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก
C	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัก
R	10 Ω	โหลดความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัก
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก
a	8.2575	ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน
b	79.5011	
m	4918	
K	49596	



รูปที่ 3.20 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีตัวควบคุม

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีการควบคุมแสดงได้ ดังรูปที่ 3.20 ซึ่งจากรูปจะพบว่าเมื่อดำเนินการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของวงจรแปลงผันแบบบัก (V_o^*) จาก 20 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 2 วินาที และจาก 25 V เป็น 30 V ที่เวลา 3 วินาที แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตของกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรอง (i_{dc}) แรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรอง (v_{dc}) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก (i_L) และแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก (v_o) สอดคล้องกับผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาซึ่งเป็นแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้พิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดิคและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมีความถูกต้อง แม่นยำ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้

3.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 เป็นการนำเสนอระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเนื้อหาในตอนต้นได้กล่าวถึงระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีการแปลงดีคิว ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จากนั้นเป็นการนำเสนอพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาทั้งในกรณีที่ไม่มี การควบคุม โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมทั้งนำเสนอการคำนวณมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ได้ผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB อีกทั้งการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนของวงจรแปลงผันแบบบัสสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาก็ได้รับการนำเสนอไว้ในส่วนที่เหมาะสมของบทที่ 3 นี้ด้วยเช่นกัน ซึ่งผลการตรวจสอบความถูกต้องแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องและตรงกับผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่ได้พิสูจน์ขึ้นมานั้นมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพและสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ดังรายละเอียดที่จะได้รับการนำเสนอไว้ในบทต่อ ๆ ไป



บทที่ 4

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

4.1 บทนำ

การศึกษาและค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมพบว่า วงจรดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบ ต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อนำโหลดดังกล่าวมาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านวงจรกรอง ความต้านทานที่ติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะไปลดทอนความหน่วงของวงจรกรองที่ปกติจะมีค่าเป็นบวก ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าเกิดการสั่นไหว เมื่อกำลังไฟฟ้าของโหลดเพิ่มขึ้นมากพอ ก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเกิดการสั่นไหวเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งไม่สามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้ กล่าวคือ ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อคาดการณ์ปริมาณของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่จะส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยในบทนี้จะนำเสนอวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งนำเสนอผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรอง ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทั้งหมด จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม SIMULINK/MATLAB และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป เพื่อยืนยันว่าองค์ความรู้และวิธีการที่ได้นำเสนอสามารถคาดการณ์การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเสถียรภาพให้กับระบบได้ ดังที่จะนำเสนอในบทถัดไป

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา งานวิจัยวิทยานิพนธ์อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยพิจารณาไปที่ค่าเจาะจงเด่น (dominant poles) ของระบบ เนื่องจากค่าเจาะจงดังกล่าวมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบมากที่สุด (รัฐพล โพธิ์สังข์, 2563; อภิชัย สุยะพันธ์, 2564; อลิสา ถนอมเมือง, 2565) ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

4.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

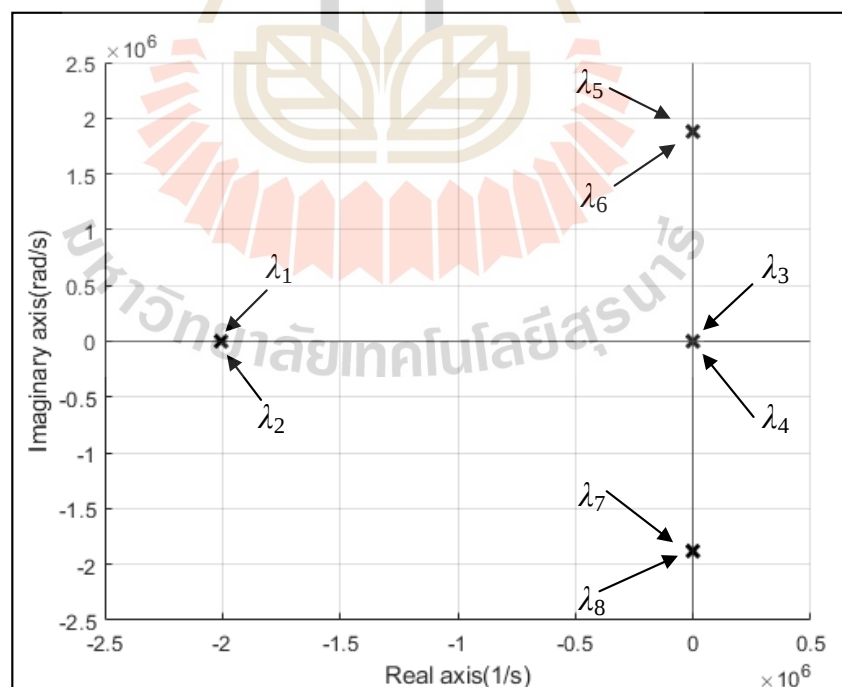
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่เป็นเชิงเส้นซึ่งได้รับการพิสูจน์ไว้แล้ว ดังแสดงในสมการที่ (3-77) ของบทที่ 3 โดยสามารถคำนวณค่าเจาะจงได้จากสมการที่ (4-1) เมื่อ λ คือ ค่าเจาะจงของระบบ $\mathbf{I}$ คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ (identity matrix) และ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ คือ เมทริกซ์จาโคเบียนของระบบที่เป็นเชิงเส้น

$$\det(\lambda I - A(x_0, u_0)) = 0 \quad (4-1)$$

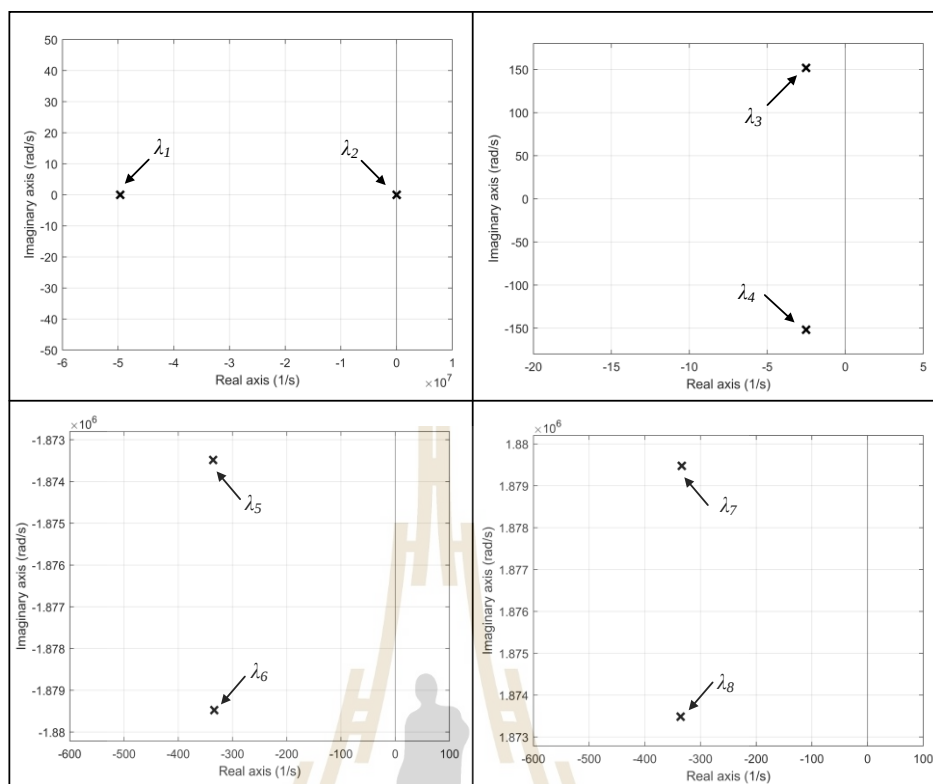
โดยเงื่อนไขการมีเสถียรภาพของระบบสามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ถ้าส่วนจริงของค่าเฉพาะจะมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ($\text{real}(\lambda) < 0$) หมายความว่า ระบบมีเสถียรภาพ หากระบบถูกรบกวนเล็กน้อย ผลตอบสนองของระบบจะสามารถกลับสู่สภาวะสมดุล
2. ถ้าส่วนจริงของค่าเฉพาะจะมีค่ามากกว่าศูนย์ ($\text{real}(\lambda) > 0$) หมายความว่า ระบบไม่มีเสถียรภาพหรือขาดเสถียรภาพ หากระบบถูกรบกวนเล็กน้อยผลตอบสนองของระบบจะเคลื่อนที่ออกจากจุดสมดุลไปเรื่อย ๆ

ดังนั้น จากสมการที่ (4-1) เมื่อกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 จะสามารถคำนวณหาค่าเฉพาะทั้งหมดของระบบเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของบัค (v_o) มีค่าเท่ากับ 33 V ได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีค่าเฉพาะทั้งหมด 8 ค่า คือ λ_1 ถึง λ_8 โดยเมื่อพิจารณาหาค่าเฉพาะจนได้ซึ่งเป็นค่าเฉพาะที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง จะสามารถแสดงตำแหน่งแบบละเอียดของค่าเฉพาะแต่ละคู่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2

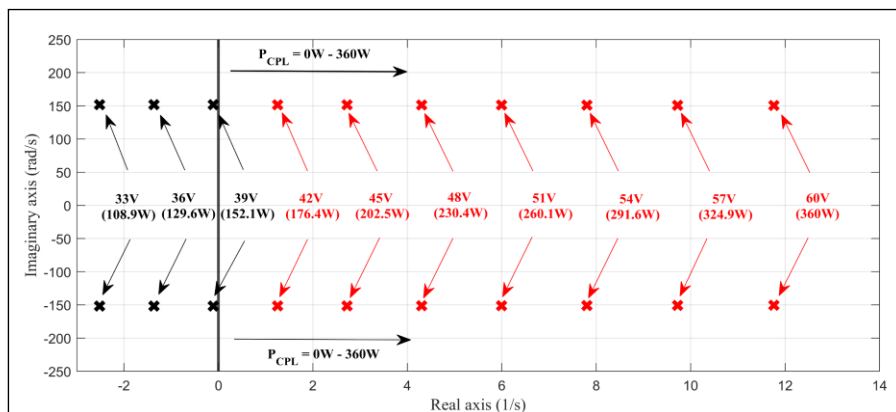


รูปที่ 4.1 ค่าเฉพาะทั้งหมดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งของค่าเฉพาะของระบบ

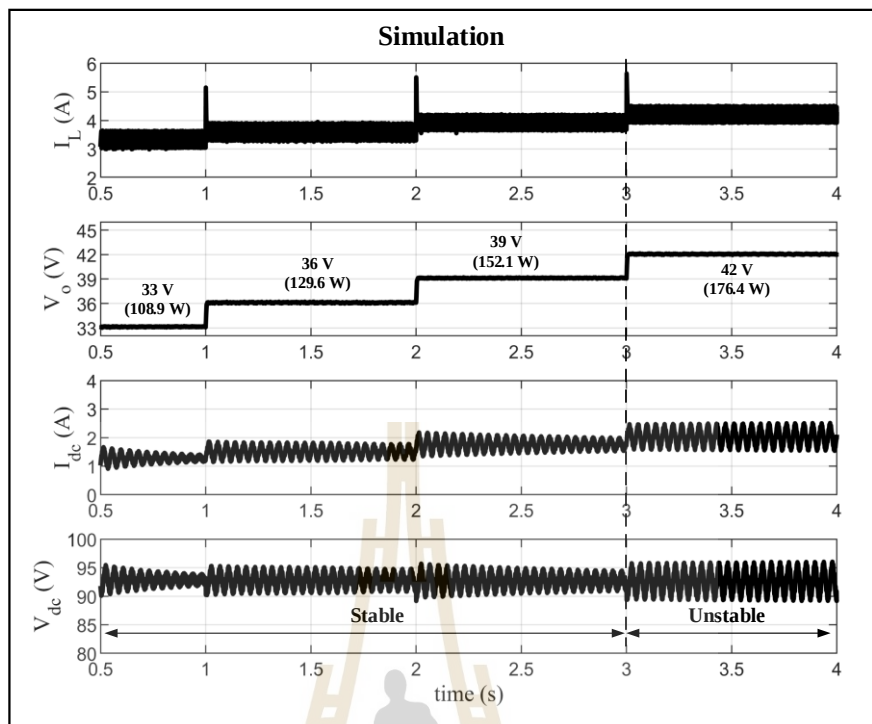
จากรูปที่ 4.2 จะพบว่า ค่าเฉพาะเด่นของระบบคือ λ_3 และ λ_4 เนื่องจากมีตำแหน่งอยู่ใกล้กับแกนจินตภาพมากที่สุด อีกทั้งขนาดของส่วนจริงยังมีความมากกว่าค่าส่วนจริงของค่าเฉพาะอื่น ๆ ถึง 10 เท่าอีกด้วย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของระบบควบคุมที่ระบุไว้ว่า อัตราส่วนของส่วนจริงของค่าเฉพาะที่ไม่มีนัยสำคัญกับค่าเฉพาะเด่นควรมีค่ามากกว่า 5 ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา สามารถวิเคราะห์ได้จากค่าเฉพาะเด่น λ_3 และ λ_4 โดยค่าเฉพาะเด่นเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัสหรือโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 โดยจากรูปจะพบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัส (v_o) มีค่าเท่ากับ 42 V หรือโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) มีค่าเท่ากับ 176.4 W จะส่งผลให้ส่วนจริงของค่าเฉพาะเด่นมีค่ามากกว่าศูนย์ หรืออยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอส ซึ่งหมายความว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ และเพื่อเป็นการยืนยันว่าระบบขาดเสถียรภาพที่จุดดังกล่าวจริง งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 4.2.2



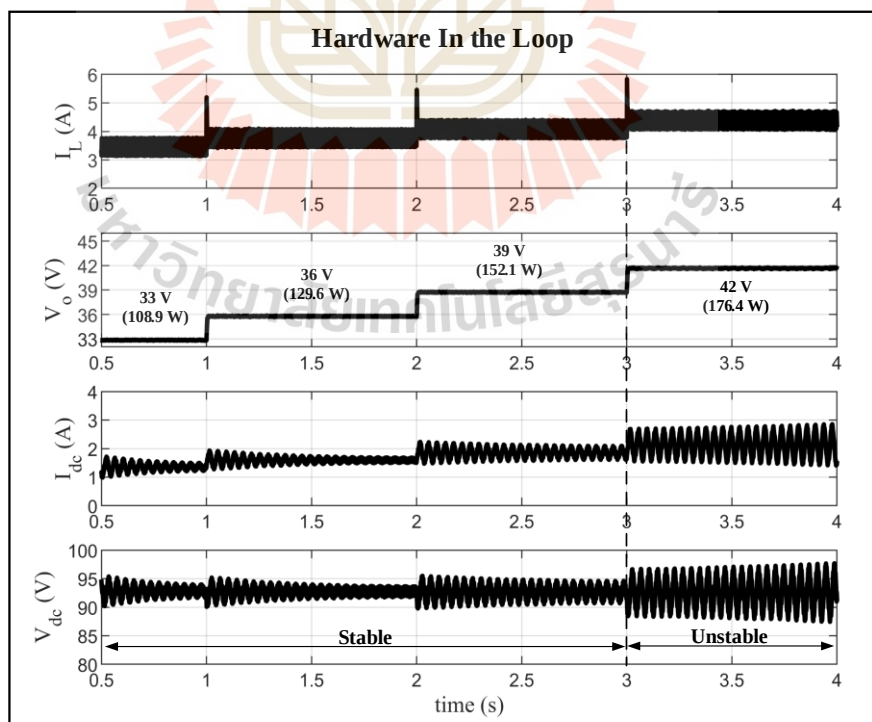
รูปที่ 4.3 ค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ

การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพที่อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งรายละเอียดของชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังสำหรับการจำลองสถานการณ์และโปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปได้รับการนำเสนอไว้ในภาคผนวก ค. และภาคผนวก ง. ตามลำดับ โดยผลจากการตรวจสอบที่ได้ทั้ง 2 รูป พบว่า ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที ถึง 3 วินาที เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัสมีการเปลี่ยนแปลงจาก 33 V ($P_{CPL} = 108.9$ W) เป็น 36 V ($P_{CPL} = 129.6$ W) และ 39 V ($P_{CPL} = 152.1$ W) ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่วงจกรอง (v_{dc}) และกระแสไฟฟ้าที่วงจกรอง (i_{dc}) สามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลานี้ระบบยังคงทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ แต่อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลาที่ 3 วินาที ถึง 4 วินาที เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัสมีการเปลี่ยนแปลงจาก 39 V ($P_{CPL} = 152.1$ W) เป็น 42 V ($P_{CPL} = 176.4$ W) แรงดันไฟฟ้าที่วงจกรองและกระแสไฟฟ้าที่วงจกรองจะเกิดการสั่นไหวเพิ่มมากขึ้นและไม่สามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้ ซึ่งสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้นจริง โดยจะขาดเสถียรภาพเมื่อ P_{CPL} มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 176.4 W ซึ่งเกิดขึ้นก่อนค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์



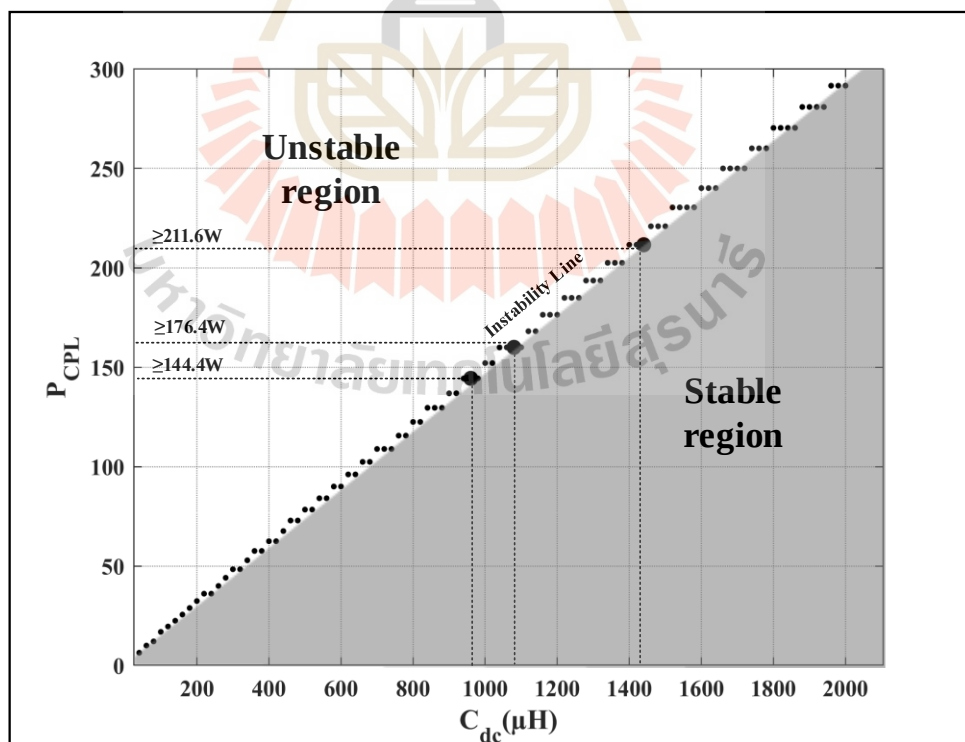
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

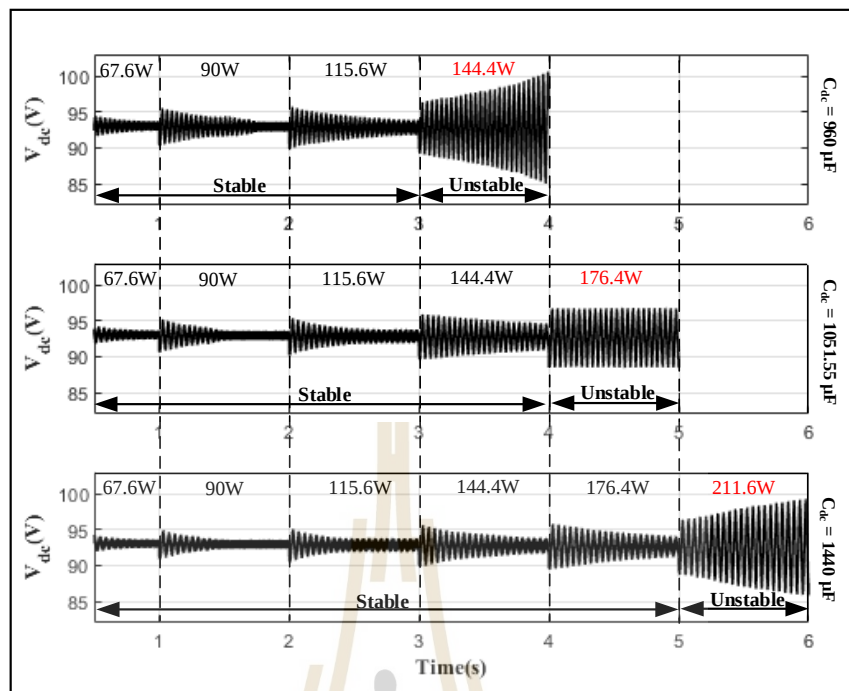
การขาดเสถียรภาพของระบบเกิดจากความต้านทานที่ติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ไปลดทอนค่าความหน่วงที่เป็นบวกของวงจรกรองจนกระทั่งระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยค่าความหน่วงดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองซึ่งเป็นค่าที่วิศวกรสามารถออกแบบและเลือกใช้ได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการศึกษาผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองเพื่อใช้เป็นแนวทางให้กับวิศวกรหรือผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองที่มีการคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบ โดยการศึกษาผลกระทบดังกล่าวจะอาศัยองค์ความรู้ที่ได้จากหัวข้อที่ 4.2.1 มาทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเพื่อสร้างเส้นอเสถียรภาพ (instability line) ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

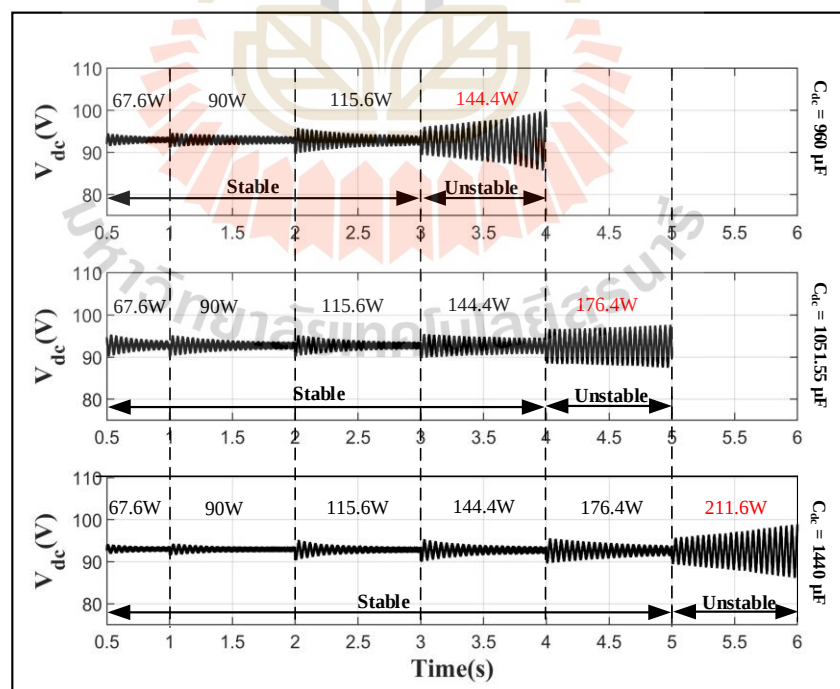
จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะได้เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (C_{dc}) จาก 20 μF จนถึง 2000 μF ในขณะที่พารามิเตอร์อื่น ๆ ยังคงมีค่าเท่าเดิมดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 แสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง



รูปที่ 4.7 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

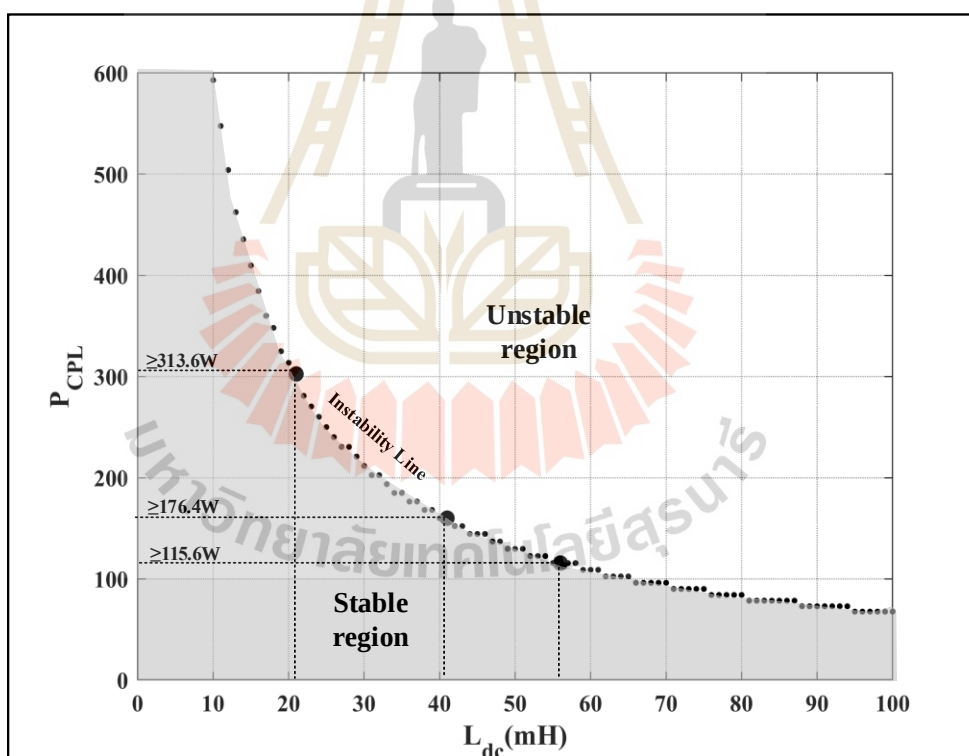


รูปที่ 4.8 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

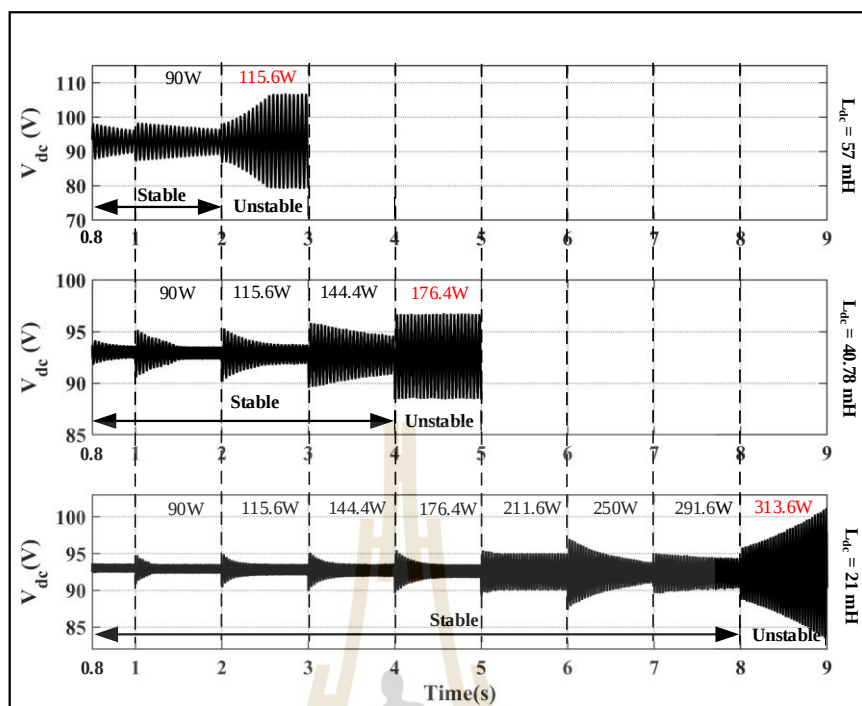
จากรูปที่ 4.6 จะพบว่า เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอมมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) ที่ค่าสูงขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากค่าความจุไฟฟ้าขนาด 1440 μF , 1051.55 μF และ 960 μF ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อ P_{CPL} มีค่าเท่ากับ 2116 W, 1764 W และ 144.4 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ พบว่า ผลที่ได้มีความสอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น (more stable)

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรกรอม

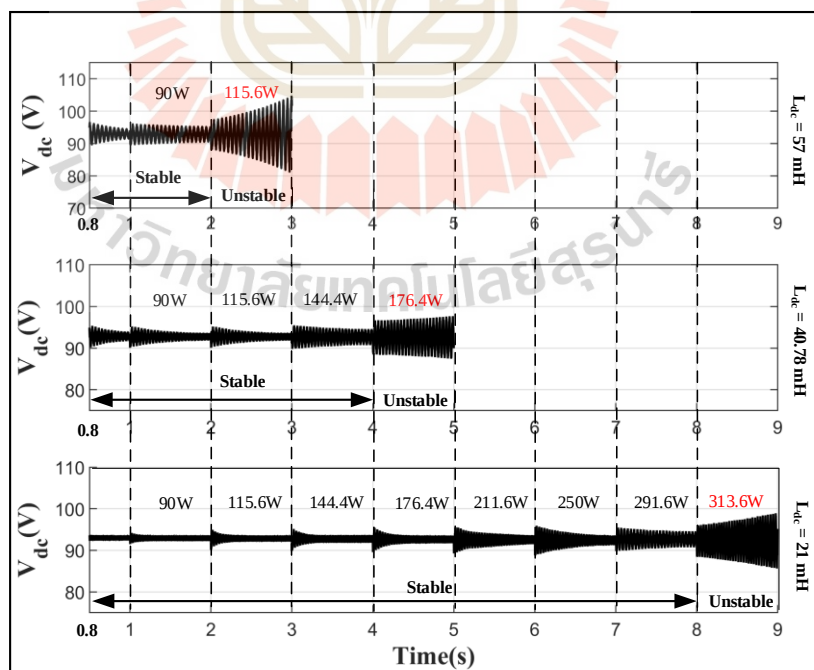
เสนอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรกรอม (L_{dc}) จาก 1 mH จนถึง 100 mH ในขณะที่พารามิเตอร์อื่น ๆ ยังคงมีค่าเท่าเดิม ดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 แสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรกรอม



รูปที่ 4.10 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรกรอง



รูปที่ 4.11 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

จากรูปที่ 4.9 จะพบว่า เมื่อค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) ที่ลดลง ซึ่งสังเกตได้จากค่าความเหนี่ยวนำขนาด 21 mH, 40.78 mH และ 57 mH ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อ P_{CPL} มีค่าเท่ากับ 3136 W, 1764 W และ 115.6 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ พบว่า ผลที่ได้มีความสอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรกรองลดลงจะทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาไม่เสถียรภาพเพิ่มขึ้น หรือในทางกลับกันการเพิ่มความเหนี่ยวนำจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพลดลง (less stable) ดังนั้นจากการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองต่อเสถียรภาพของระบบสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง จะส่งผลทำให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองถึงแม้ว่าจะทำให้กระแสพลัว (ripple current) มีค่าลดลงแต่กลับส่งผลทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ลดลงด้วย ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรอง โดยมีการคำนึงถึงผลการทดสอบเสถียรภาพของระบบโดยรวมด้วย

4.4 สรุป

ในบทที่ 4 เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาเพื่อคาดเดาปริมาณโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพได้อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และพิจารณาไปที่ค่าเจาะจงเด่นของระบบเนื่องจากค่าเจาะจงดังกล่าวมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบมากที่สุด นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลกระทบต่อเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรอง ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีได้อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปและยืนยันได้ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่นำเสนอสามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ รวมถึงผลจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองที่ได้จะเป็นประโยชน์และข้อมูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบและเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวโดยคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบด้วย แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพเป็นเพียงวิธีการคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบเท่านั้น ไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและทำงานต่อได้จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า ดังนั้นในบทที่ 5 จะเป็นการนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน นอกจากนี้จะไม่เกิดการขาดเสถียรภาพแล้วยังสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบด้วย

บทที่ 5

การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

5.1 บทนำ

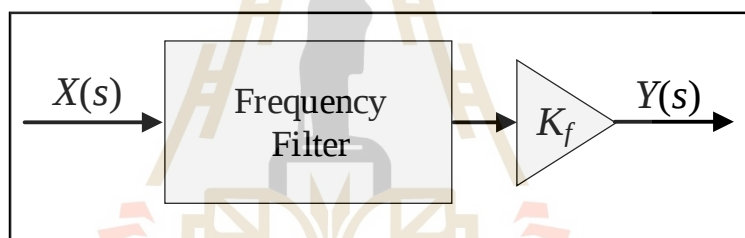
การวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 4 ที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยจุดการขาดเสถียรภาพจะเกิดขึ้นก่อนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพทำได้เพียงแค่คาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบเท่านั้น แต่ไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมาทำงานต่อได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด ดังนั้นในบทที่ 5 นี้จึงเป็นการนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งเนื้อหาในตอนต้นของบทจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า จากนั้นจะเป็นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอ เพื่อใช้ในการออกแบบค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับสร้างเสถียรภาพ ณ จุดการขาดเสถียรภาพ และจากจุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด โดยการออกแบบดังกล่าวจะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเนื้อหาในส่วนสุดท้ายเป็นการยืนยันผลของการสร้างเสถียรภาพผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับนำไปประยุกต์ใช้สร้างชุดทดสอบจริงของระบบ เพื่อยืนยันว่าการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ดังที่จะนำเสนอในบทถัดไป

5.2 การสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อได้จนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้วิธีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน เนื่องจากเป็นวิธีการที่อาศัยการแก้ไขหรือดัดแปลงระบบควบคุมโดยไม่มีการเพิ่มอุปกรณ์พาสซีฟ (passive component) เข้าไปในระบบ ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดน้ำหนักและกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ โดยทฤษฎีพื้นฐานของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าได้ดังนี้สามารถอธิบายรายละเอียดพอสังเขปได้ดังหัวข้อที่ 5.2.1

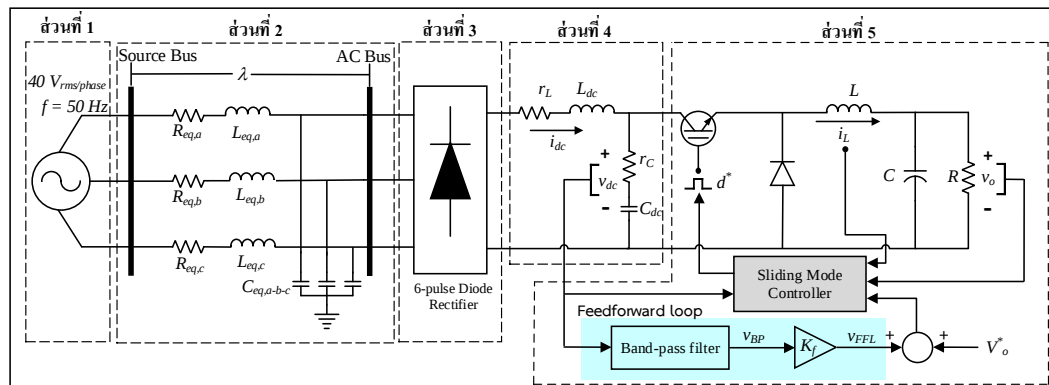
5.2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า

ตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าเป็นวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพให้กับระบบด้วยการสร้างสัญญาณชดเชยเพิ่มเข้าไปยังตัวควบคุมเดิมที่มีอยู่แล้วของวงจรแปลงผันกำลัง โดยการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการดังกล่าวมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งจากรูปสามารถอธิบายได้ว่า ตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าจะตรวจจับสัญญาณไฟฟ้า $X(s)$ เช่น กระแสไฟฟ้าและ/หรือแรงดันไฟฟ้าที่มีการสั่นไหว จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มากรองด้วยตัวกรองความถี่ เช่น ตัวกรองความถี่สูง (high-pass filter) ตัวกรองความถี่ต่ำ (low-pass filter) ตัวกรองความถี่แถบผ่าน (band-pass filter) หรือตัวกรองความถี่แถบหยุด (band-stop filter) แล้วคูณด้วยอัตราขยายของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า (K_f) เพื่อให้ได้สัญญาณชดเชย $Y(s)$ และเพิ่มเข้าไปยังตัวควบคุมเดิมที่มีอยู่แล้วของวงจรแปลงผันกำลัง โดยสัญญาณ $Y(s)$ ที่ได้จะมีเฟสตรงข้ามกับสัญญาณ $X(s)$ และเมื่อคูณด้วยค่าอัตราขยาย K_f ที่เหมาะสมแล้วจะสามารถลบล้างผลการสั่นไหวและไม่คงที่ของสัญญาณ $X(s)$ จนกระทั่งระบบสามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้ (M. Wu and D. D. -C. Lu, 2014; M. Wu, D. D. -C. Lu and C. K. Tse, 2015; M. Wu and D. D. -C. Lu, 2015; รัฐพล โพธิ์สังข์, 2563)

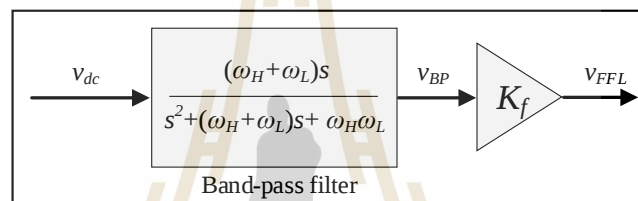


รูปที่ 5.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งวิธีการที่นำเสนอแสดงได้ดังพื้นที่สีฟ้า โดยเมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ แรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรองหรือแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของวงจรแปลงผันแบบบัค (v_{dc}) จะเกิดการสั่นไหวด้วยความถี่ที่เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้ตัวกรองความถี่แถบผ่านมาทำการกรองแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวรอบ ๆ ความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการกรองจะมีความถี่และมีเฟสตรงข้ามกับความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ จากนั้นนำแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาคูณกับค่าอัตราขยาย K_f เพื่อสร้างเป็นแรงดันไฟฟ้าชดเชย (v_{FLL}) ที่มีขนาดเหมาะสมและเพียงพอสำหรับการสร้างเสถียรภาพให้กับระบบ แล้วฉีดไปยังตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเดิมที่มีอยู่แล้วของวงจรแปลงผันแบบบัค โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าที่ใช้ตัวกรองความถี่แถบผ่านสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพ



รูปที่ 5.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้าที่ใช้ตัวกรองความถี่แถบผ่าน

จากรูปที่ 5.3 สามารถเขียนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังสมการที่ (5-1) ดังนี้

$$\frac{v_{FFL}(s)}{v_{dc}(s)} = \frac{K_f (\omega_H + \omega_L) s}{s^2 + (\omega_H + \omega_L) s + (\omega_H \omega_L)} \quad (5-1)$$

- โดยที่
- v_{FFL} คือ แรงดันไฟฟ้าชดเชย
 - v_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรอง
 - K_f คือ ค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้า (Feedforward Loop gain)
 - ω_H คือ ค่าความถี่ตัดสูง (High cutoff frequency)
 - ω_L คือ ค่าความถี่ตัดต่ำ (Low cutoff frequency)

สำหรับค่าความถี่ ω_H และค่าความถี่ ω_L สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5-2) และสมการที่ (5-3) ตามลำดับ เมื่อความถี่ ω_0 คือ ค่าความถี่ศูนย์กลางของตัวกรองแถบผ่าน

$$\omega_H = 2\omega_0 \quad (5-2)$$

$$\omega_L = \frac{\omega_0}{2} \quad (5-3)$$

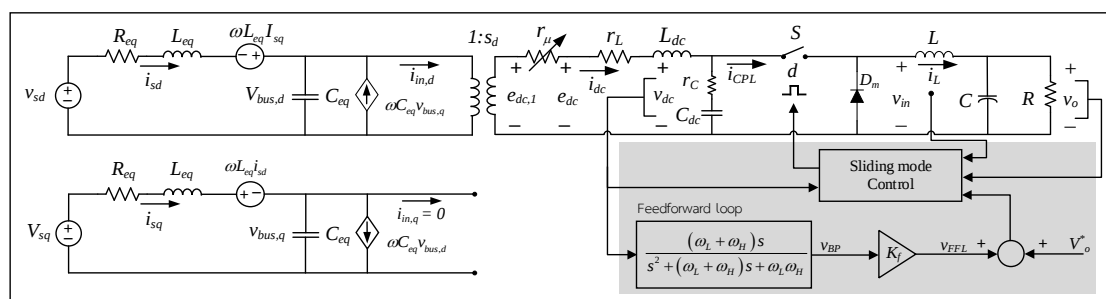
ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวกรองความถี่แถบผ่านเพื่อกรองแรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรองรอบ ๆ ความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นค่าความถี่ ω_0 จะถูกกำหนดให้เท่ากับค่าความถี่เรโซแนนซ์ (ω_r) ของระบบ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (5-4)

$$\omega_0 = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_{dc} C_{dc}}} \quad (5-4)$$

นอกจากการออกแบบความถี่ตัวกรองแถบผ่านแล้ว การออกแบบค่าอัตราขยาย K_f มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการกำจัดผลกระทบที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะออกแบบค่าอัตราขยาย K_f ผ่านการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องดำเนินการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 5.2.2 ดังนี้

5.2.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพ

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพดังแสดงในรูปที่ 5.2 จะอาศัยองค์ความรู้ที่ได้จากบทที่ 3 ซึ่งจะสามารถเขียนวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบที่อยู่บนแกนหมุนดีคิวได้ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ดังนี้



รูปที่ 5.4 วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนหมุนดีคิวของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพ

จากรูปที่ 5.4 จะพบว่ามีส่วนที่แตกต่างไปจากบทที่ 3 คือ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่มีการพิจารณาพร้อมกับตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้า ดังแสดงด้วยพื้นที่สีเทาซึ่งจะเป็นส่วนที่ต้องดำเนินการพิสูจน์หาแบบจำลองเพิ่มเติมจากบทที่ 3 โดยตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้าจะตรวจจับแรงดันไฟฟ้า v_{dc} จากนั้นนำไปกรองด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่านที่ได้รับการออกแบบให้มีความถี่ศูนย์กลางเท่ากับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.2.1 ซึ่งจะได้แรงดันไฟฟ้าที่ผ่านการกรอง $v_{BP}(s)$ ที่อยู่ในโดเมนเอส (s-domain) หรือโดเมนความถี่ (frequency domain) แสดงได้ดังสมการที่ (5-5) และเมื่อนำแรงดันไฟฟ้า $v_{BP}(s)$ คูณกับค่าอัตราขยาย K_f จะได้แรงดันไฟฟ้าชดเชย ($V_{FFL}(s)$) บนโดเมนความถี่ ดังแสดงในสมการที่ (5-6)

$$v_{BP}(s) = \left(\frac{(\omega_L + \omega_H)s}{s^2 + (\omega_L + \omega_H)s + \omega_L\omega_H} \right) v_{dc}(s) \quad (5-5)$$

$$v_{FFL}(s) = K_f v_{BP}(s) \quad (5-6)$$

จากสมการที่ (5-5) และสมการที่ (5-6) พบว่า สมการดังกล่าวอยู่ในโดเมนความถี่ ซึ่งไม่สามารถนำไปสร้างเป็นแบบจำลองของระบบได้โดยตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแปลงให้อยู่ในโดเมนเวลา (time-domain) ซึ่งทำได้โดยเริ่มจากการจัดรูปสมการที่ (5-5) ใหม่ดังสมการที่ (5-7)

$$V_{BP}(s) = s v_{df}(s) \quad (5-7)$$

โดย $v_{df}(s)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-8)

$$v_{df}(s) = \frac{(\omega_L + \omega_H)}{s^2 + (\omega_L + \omega_H)s + \omega_L\omega_H} v_{dc}(s) \quad (5-8)$$

จากนั้นจัดรูปสมการที่ (5-8) ใหม่จะได้ดังสมการที่ (5-9)

$$s^2 v_{df}(s) = (\omega_L + \omega_H) v_{dc}(s) - s v_{df}(s) (\omega_L + \omega_H) - \omega_L \omega_H v_{df}(s) \quad (5-9)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (5-9) ร่วมกับสมการที่ (5-7) จะได้สมการของแรงดันไฟฟ้า $V_{BP}(s)$ ที่อยู่บนโดเมนความถี่แสดงได้ดังสมการที่ (5-10)

$$sV_{BP}(s) = (\omega_L + \omega_H)v_{dc}(s) - (\omega_L + \omega_H)V_{BP}(s) - \omega_L\omega_H v_{df}(s) \quad (5-10)$$

ดำเนินการแปลงสมการ (5-6) สมการที่ (5-7) และสมการที่ (5-10) ให้อยู่ในโดเมนเวลาโดยอาศัยการแปลงลาปลาซแบบผกผัน (inverse laplace transformation) ดังนั้นจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ในส่วนของตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้า ดังแสดงในสมการที่ (5-11) สมการที่ (5-12) และสมการที่ (5-13)

$$\dot{v}_{FFL} = K_f v_{BP} \quad (5-11)$$

$$\dot{v}_{df} = v_{BP} \quad (5-12)$$

$$\dot{v}_{BP} = (\omega_L + \omega_H)v_{dc} - (\omega_L + \omega_H)v_{BP} - \omega_L\omega_H v_{df} \quad (5-13)$$

จากสมการสร้างสัญญาณการควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (u_{eq}) ดังสมการที่ (3-77) ในบทที่ 3 เมื่อมีการพิจารณาตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้าสำหรับการสร้างเสถียรภาพเพิ่มเติม V_o^* ในสมการที่ (3-77) จะถูกแทนด้วย $V_o^* + K_f v_{BP}$ ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการสร้างสัญญาณการควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่มีพิจารณาร่วมกับตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้าแสดงได้ดังสมการที่ (5-14) ดังนี้

$$u_{eq} = \frac{V_o}{V_{dc}} \alpha - \frac{I_L}{V_{dc}} \beta + \frac{(V_o^* + K_f v_{BP})}{V_{dc}} \gamma \quad (5-14)$$

$$\text{โดยที่ } \alpha = \frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC}$$

$$\beta = \frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC}$$

$$\gamma = \frac{mRLC(K+1)}{aRC}$$

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า สามารถดำเนินการได้โดยแทนค่า d ในสมการที่ (3-53) ในบทที่ 3 ด้วย u_{eq} ดังสมการที่ (5-14) ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอแสดงในสมการที่ (5-15)

$$\begin{cases}
 \dot{i}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{sd} + \omega i_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} v_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(\lambda) \\
 \dot{i}_{sq} = -\omega i_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} v_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(\lambda) \\
 \dot{v}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} i_{sd} + \omega v_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} i_{dc} \\
 \dot{v}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} i_{sq} - \omega v_{bus,d} \\
 \dot{i}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} v_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} i_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} v_{dc} \\
 \quad + \frac{r_C v_o i_L}{v_{dc}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRCL_{dc}} \right) - \frac{r_C i_L^2}{v_{dc}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRCL_{dc}} \right) \\
 \quad + \frac{r_C i_L (V_o^* + K_f V_{bpf})}{v_{dc}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRCL_{dc}} \right) \\
 \dot{v}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} i_{dc} - \frac{v_o i_L}{v_{dc}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRCC_{dc}} \right) \\
 \quad + \frac{i_L^2}{v_{dc}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRCC_{dc}} \right) - \frac{i_L (V_o^* + K_f V_{bpf})}{v_{dc}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRCC_{dc}} \right) \\
 \dot{i}_L = v_o \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRCL} \right) - i_L \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRCL} \right) \\
 \quad + (V_o^* + K_f V_{bpf}) \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRCC_{dc}} \right) - \frac{1}{L} v_o \\
 \dot{v}_o = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} v_o \\
 \dot{v}_{BP} = (\omega_L + \omega_H) v_{dc} - (\omega_L + \omega_H) v_{BP} - \omega_L \omega_H v_{df} \\
 \dot{v}_{df} = v_{BP}
 \end{cases} \tag{5-15}$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพดังสมการที่ (5-15) แม้ว่าจะเป็นแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่ยังคงเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากปรากฏการณ์การคูณกันระหว่างตัวแปรสถานะภายในแบบจำลอง ซึ่งทำให้

แบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้วิธีการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในระบบให้มีความเป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งมาพิจารณาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นในรูปของการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยรอบ ๆ จุดปฏิบัติงาน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรสถานะของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กได้ดังสมการที่ (5-16) เมื่อ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ คือ เมทริกซ์จาโคเบียนของระบบ ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_0$ และค่าตัวแปรอินพุต $\mathbf{u}_0$

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (5-16)$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ: $\delta \mathbf{x} = [\delta i_d \ \delta i_q \ \delta v_{bus,d} \ \delta v_{bus,q} \ \delta i_{dc} \ \delta v_{dc} \ \delta i_L \ \delta v_o \ \delta v_o]$
 $\delta v_{BP} \ \delta v_{df}]^T$
 ตัวแปรอินพุต: $\delta \mathbf{u} = [\delta v_m \ \delta V_o^*]^T$
 ตัวแปรเอาต์พุต: $\delta \mathbf{y} = [\delta i_{dc} \ \delta v_{dc} \ \delta i_L \ \delta v_o]^T$

เมื่อเมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีการสร้างเสถียรภาพสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-17) ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{3\sqrt{2}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3\sqrt{2}}{\pi L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} & a(5,6) & a(5,7) & a(5,8) & 0 & a(5,10) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & a(6,6) & a(6,7) & a(6,8) & 0 & a(6,10) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,7) & a(7,8) & 0 & \frac{K_f}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_L + \omega_H & 0 & 0 & \omega_L \omega_H & -\omega_L - \omega_H \end{bmatrix}_{10 \times 10} \quad (5-17)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3} \cos(\lambda_0)}{\sqrt{2} L_{eq}} & 0 \\ \frac{\sqrt{3} \sin(\lambda_0)}{\sqrt{2} L_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_C i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right) \\ 0 & \frac{-i_{L,0}}{C_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right) \\ 0 & \frac{1}{L} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{10 \times 2}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 10}$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{4 \times 2}$$

เมื่อ

$$a(5,6) = -\frac{1}{L_{dc}} - \frac{r_C v_{o,0} i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) + \frac{r_C i_{L,0}^2}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) - \frac{r_C (V_o^* + K_f v_{BP,0}) i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(5,7) = \frac{r_C v_{o,0}}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) - \frac{2r_C i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) - \frac{r_C (V_o^* + K_f v_{BP,0})}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(5,8) = \frac{r_C i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right)$$

$$a(5,10) = \frac{K_f r_C i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,6) = \frac{V_{o,0} i_{L,0}}{C_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) - \frac{i_{L,0}^2}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) + \frac{(V_o^* + K_f v_{BP,0}) i_{L,0}}{L_{dc} v_{dc,0}^2} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,7) = -\frac{v_{o,0}}{C_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) + \frac{2i_{L,0}}{C_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) + \frac{(V_o^* + K_f v_{BP,0})}{C_{dc} v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,8) = -\frac{i_{L,0}}{C_{dc}v_{dc,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,10) = -\frac{K_f i_{L,0}}{C_{dc}v_{dc,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(7,7) = -\frac{1}{L} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right)$$

$$a(7,8) = -\frac{1}{L} + \frac{1}{L} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right)$$

จากสมการที่ (5-17) จะสังเกตได้ว่าองค์ประกอบของเมทริกซ์ **A(x₀,u₀)** และ **B(x₀,u₀)** จะปรากฏตัวแปร $v_{dc,0}$, λ_0 , $i_{L,0}$, $v_{o,0}$, $v_{df,0}$ และ $v_{BP,0}$ ซึ่งเป็นค่าในสภาวะอยู่ตัวที่จุดปฏิบัติการต่าง ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาค่าในสภาวะอยู่ตัวของตัวแปรดังกล่าวซึ่งทำได้โดยอาศัยการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าพื้นฐานมาวิเคราะห์วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.4 ดังนั้นค่าในสภาวะอยู่ตัวดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5-18)

$$\begin{cases} v_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}v_{bus,0}) \\ i_{L,0} = \frac{v_{o,0}}{R} \\ v_{o,0} = V_o^* \\ v_{df} = 0 \\ v_{BP} = 0 \end{cases}$$

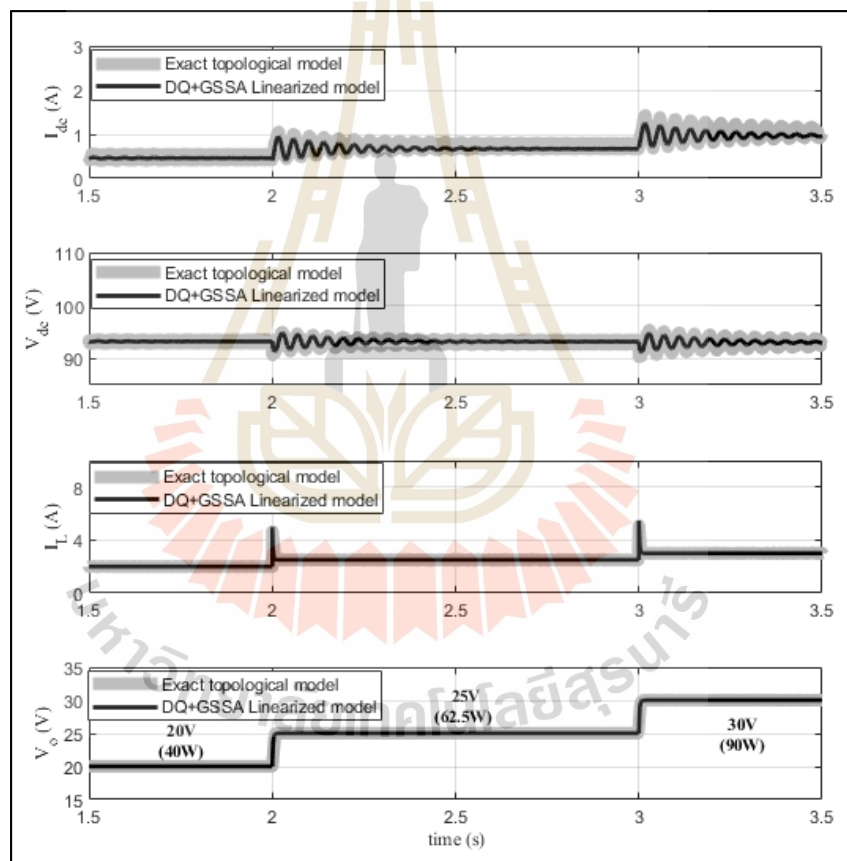
(5-18)

$$\text{โดยที่ } i_{dc,0} = \frac{\sqrt{3} \left| \frac{v_s e^{j0} - v_{bus,0} e^{-j\lambda_0}}{Z e^{j\gamma}} \right|}{\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi}}$$

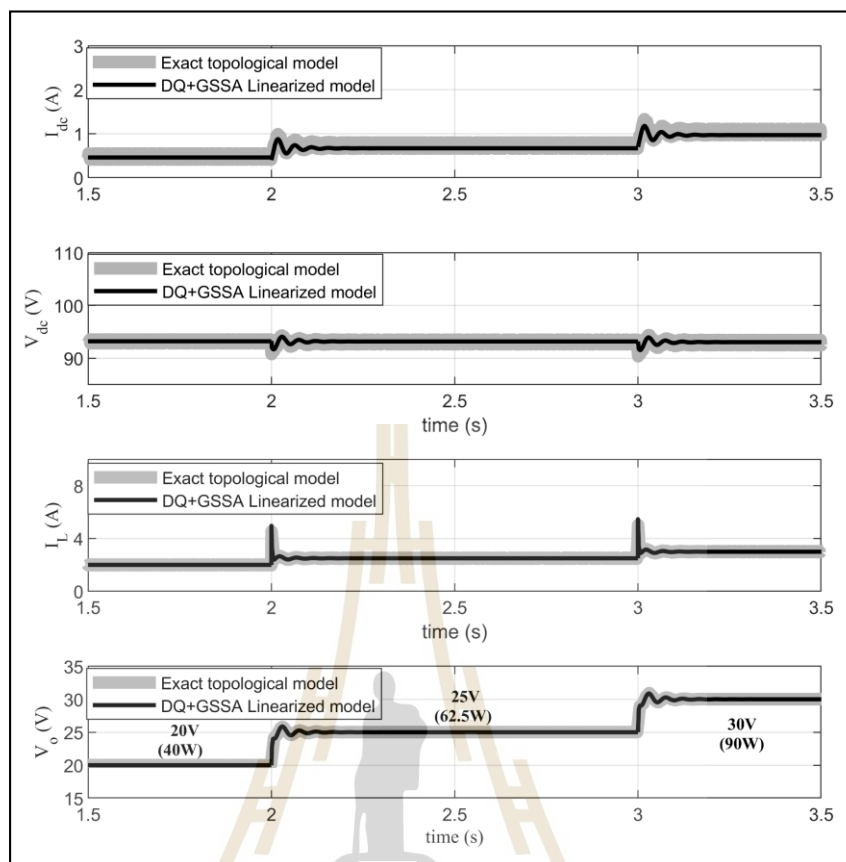
$$Z = \sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}$$

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

จากสมการที่ (5-18) จะปรากฏตัวแปร $v_{bus,0}$ และ λ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถคำนวณหาได้จากการไหลของกำลังไฟฟ้าระหว่างบัสแหล่งจ่ายไฟฟ้าและบัสไฟฟ้ากระแสสลับ ด้วยวิธีการของนิวตัน-ราฟสัน เช่นเดียวกับรายละเอียดที่ได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.4.3 ในบทที่ 3 และเพื่อเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพนั้นมีความถูกต้อง งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าวผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของระบบเป็นดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 และรายละเอียดของชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงได้ดังภาคผนวก ค.



รูปที่ 5.5 ผลตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อ K_f เท่ากับศูนย์



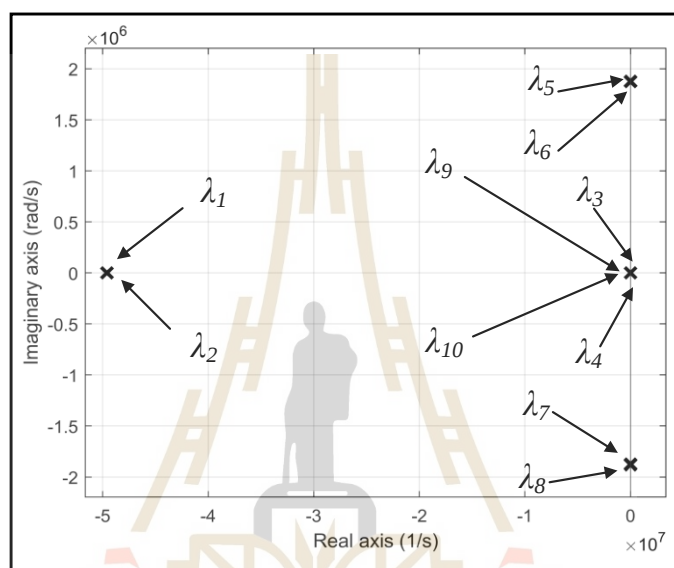
รูปที่ 5.6 ผลตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อ K_f เท่ากับ 0.8

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นเมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายถึงไม่มีการสร้างเสถียรภาพและ K_f เท่ากับ 0.8 เป็นกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ตามลำดับ โดยจากผลการตรวจสอบพบว่า เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก (v_o) มีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 V ($P_{CPL} = 40$ W) เป็น 25 V ($P_{CPL} = 62.5$ W) และ 30 V ($P_{CPL} = 90$ W) ในช่วงเวลา 1.5 วินาที ถึง 3.5 วินาที ผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องและตรงกันทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้ามีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าอัตราขยาย K_f เพื่อสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ดังรายละเอียดที่จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.2.3

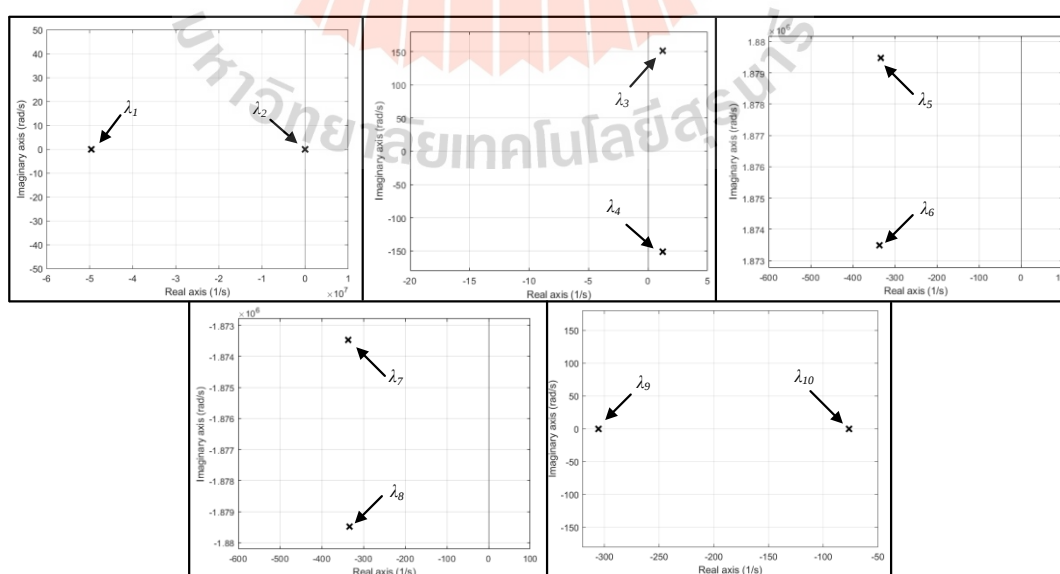
5.2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพและการยืนยันผลของการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 4 ที่ผ่านมาพบว่าระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก (v_o)

มีค่าเท่ากับ 42 V ($P_{CPL} = 176.4$ W) ซึ่งเกิดขึ้นก่อนค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบ ($P_{CPL} = 360$ W) ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องสร้างเสถียรภาพเพื่อให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อไปได้ โดยการออกแบบค่าอัตราขยาย K_f เพื่อสร้างเสถียรภาพให้กับระบบจะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับศูนย์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.7 และตำแหน่งแบบละเอียดของค่าเจาะจงแต่ละคู่แสดงได้ดังรูปที่ 5.8

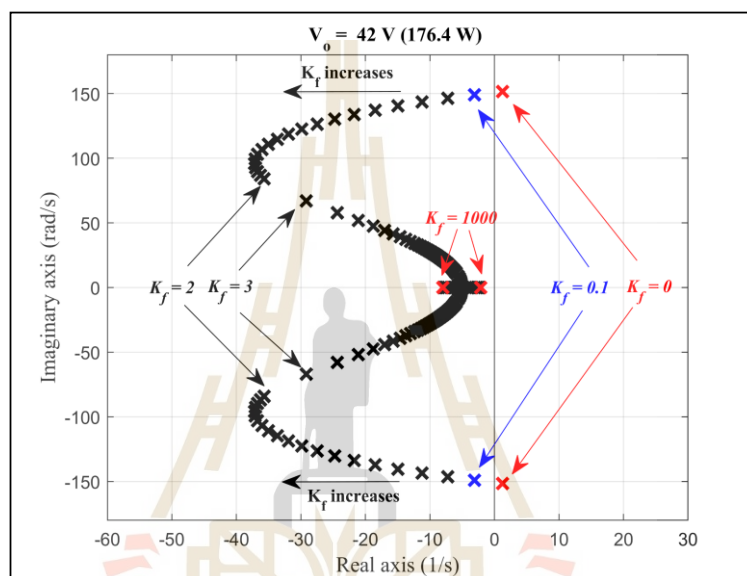


รูปที่ 5.7 ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ



รูปที่ 5.8 ตำแหน่งของค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ

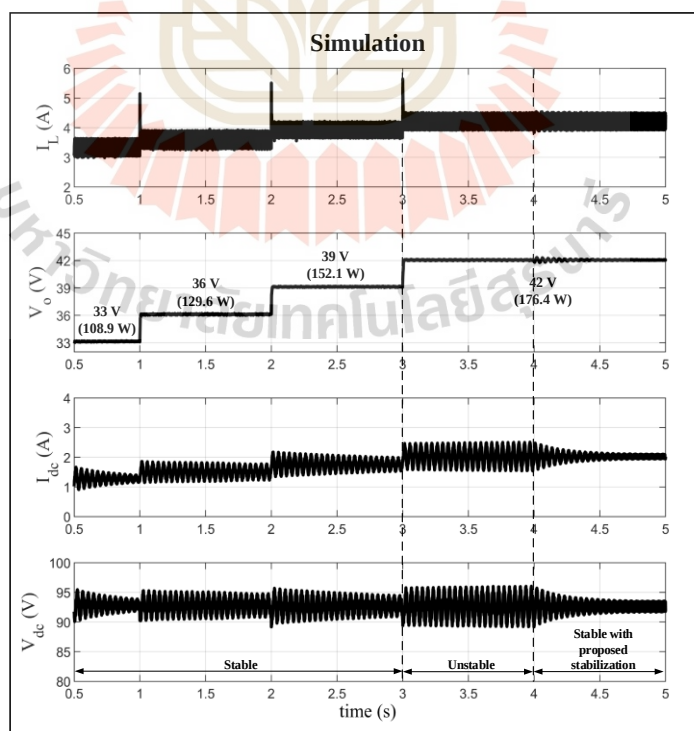
จากรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 จะพบว่า ระบบที่มีการสร้างเสถียรภาพจะมีค่าเจาะจงทั้งหมด 10 ค่า คือ λ_1 ถึง λ_{10} โดยการออกแบบค่าอัตราขยาย K_f จะพิจารณาไปที่ค่าเจาะจงเด่นของระบบนั้นคือ λ_3 และ λ_4 เนื่องจากค่าเจาะจงดังกล่าวมีส่วนจริงเมื่อเทียบกับส่วนจริงของค่าเจาะจงอื่น ๆ เท่ากับ 10 เท่า สำหรับการเลือกใช้ค่าอัตราขยาย K_f จะพิจารณาค่าที่น้อยและเพียงพอต่อการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพของระบบ โดยเส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นของระบบที่จุดการขาดเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยาย K_f ตั้งแต่ 0 ถึง 1000 สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 5.7 ดังนี้



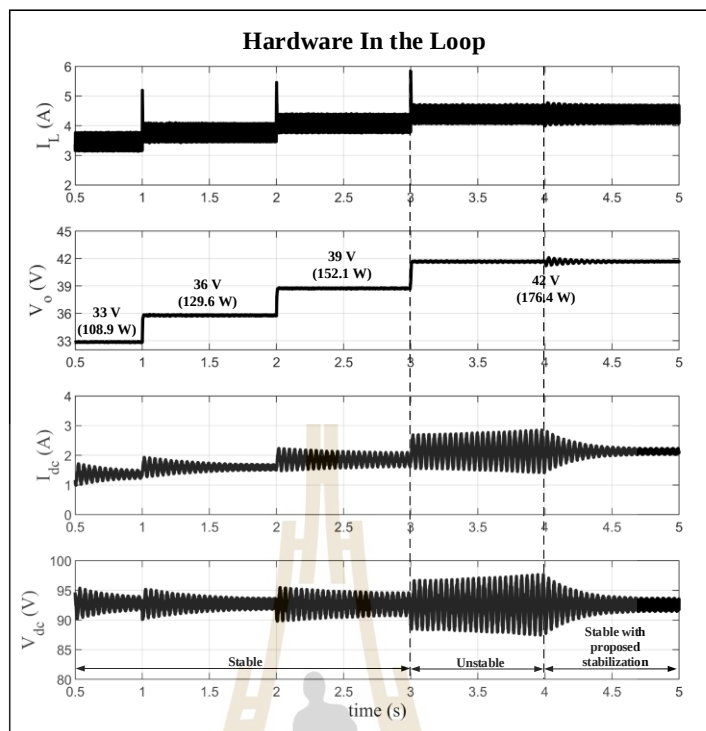
รูปที่ 5.9 เส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นที่จุดการขาดเสถียรภาพเมื่อ K_f มีการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 5.9 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อกำหนดให้อัตราขยาย K_f มีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นจะมากกว่าศูนย์หรืออยู่ทางด้านขวามือของระนาบเอส หมายความว่าระบบจะทำงานไม่มีการสร้างเสถียรภาพ จึงส่งผลให้ระบบยังคงขาดเสถียรภาพ แต่เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f มีค่าเท่ากับ 0.1 ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นจะน้อยกว่าศูนย์หรืออยู่ทางด้านซ้ายมือของระนาบเอส ซึ่งหมายความว่า ระบบที่ขาดเสถียรภาพจะกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้ง ในขณะที่การเพิ่มค่า K_f ไปเรื่อย ๆ จะทำให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายมือเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งที่ค่า K_f เท่ากับ 2 ค่าเจาะจงเด่นจะเริ่มมีการเคลื่อนที่วกกลับจากทางด้านซ้ายมือไปทางด้านขวามือของระนาบเอส และเมื่อค่า K_f เท่ากับ 1000 ค่าเจาะจงเด่นจะมีเฉพาะส่วนจริงโดยไม่ปรากฏค่าในส่วนจินตภาพ แต่ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.1 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยและเพียงพอสำหรับการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพของระบบ โดยการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพที่ได้จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังและโปรแกรมสำหรับ

การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพสามารถดูได้จากภาคผนวก ค. และภาคผนวก ง. ตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายถึงระบบไม่มีการสร้างเสถียรภาพตั้งแต่ช่วงเวลา 0.5 วินาทีถึง 4 วินาที เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัคมีการเปลี่ยนแปลงจาก 39 V ($P_{CPL} = 152.1$ W) เป็น 42 V ($P_{CPL} = 176.4$ W) เป็นจุดการขาดเสถียรภาพของระบบในช่วงเวลาที่ 3 วินาที ถึง 4 วินาที แรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรอง (v_{dc}) และกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรอง (i_{dc}) จะเกิดการสั่นไหวเพิ่มมากขึ้นจนไม่สามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งในรูปที่ 5.8 และในบทที่ 4 ที่ผ่านมามีระบบจะขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ และเมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.1 ซึ่งหมายถึงระบบมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอ ที่ช่วงเวลา 4 วินาที ถึง 5 วินาที จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรองและกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรอง จะมีการสั่นไหวที่ลดลงและสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ กล่าวคือค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.1 เป็นค่าที่น้อยและเพียงพอต่อการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า วิธีการสร้างเสถียรภาพที่นำเสนอสามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมา มีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ได้ดังรูปที่ 5.7 โดยในลำดับถัดไปจะเป็นการวิเคราะห์หาค่าอัตราขยาย K_f ที่ทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบหรือที่แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัคเท่ากับ 60 V ($P_{CPL, rated} = 360$ W) ดังรายละเอียดที่จะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 5.2.4 ดังนี้



รูปที่ 5.10 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เมื่อมีการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ

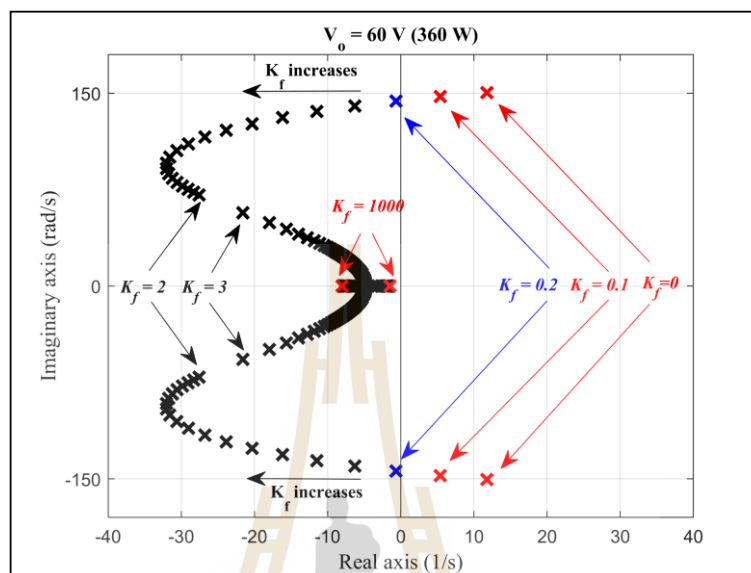


รูปที่ 5.11 การจำลองสถานการณ์บนฮาร์ดแวร์ในลูปเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ

5.2.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพและการยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า

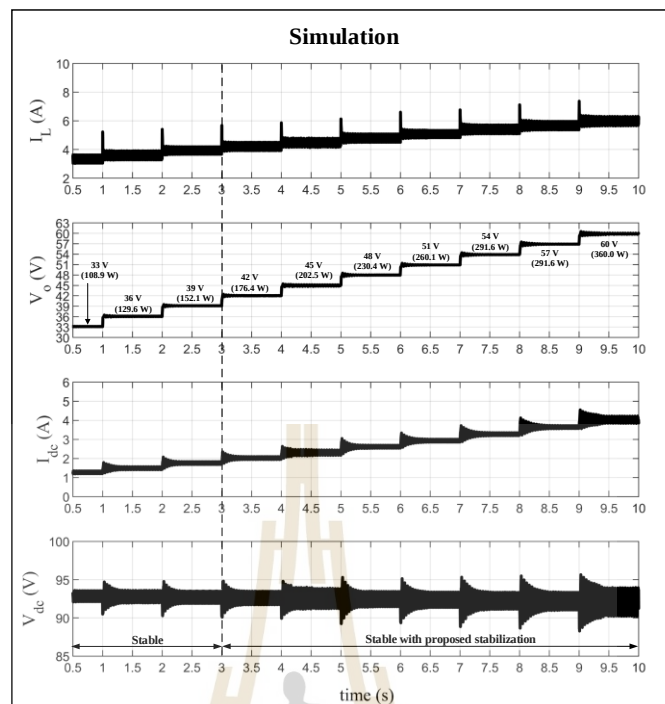
การวิเคราะห์และเลือกค่าอัตราขยาย K_f ที่น้อยและเพียงพอที่จะทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพตั้งแต่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบจะดำเนินการเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.2.3 กล่าวคือ จะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยเส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นที่ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยาย K_f ตั้งแต่ 0 ถึง 1000 แสดงได้ดังในรูปที่ 5.12 โดยจากรูปสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายความว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาทำงานโดยไม่มีการสร้างเสถียรภาพส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเอส ดังนั้นระบบจะยังคงขาดเสถียรภาพ เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f มีค่าเท่ากับ 0.1 ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นจะยังคงอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบเอส หมายความว่า ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.1 นี้ไม่เพียงพอที่จะทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด แต่เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f มีค่าเท่ากับ 0.2 ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นจะเคลื่อนที่จากทางด้านขวามือมาอยู่ทางด้านซ้ายมือของระนาบเอส ซึ่งหมายความว่าระบบจะสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด ดังนั้นค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.2 จึงเป็นค่าที่น้อยและเพียงพอที่จะทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ สำหรับการยืนยันผล

การวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพที่อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 ตามลำดับ

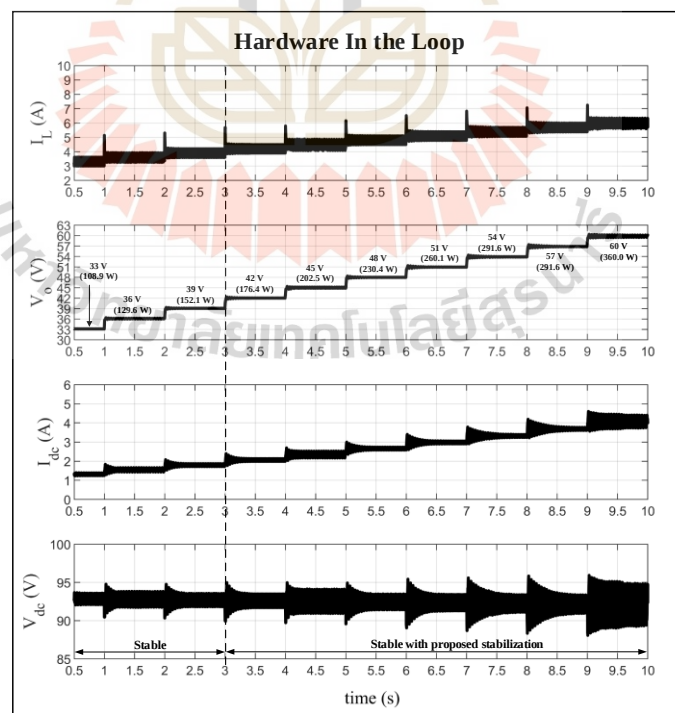


รูปที่ 5.12 เส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นที่จุดกำลังไฟฟ้าค่าพิกัดเมื่อ K_f มีการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 จะพบว่า เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.2 ตั้งแต่ช่วงเวลา 0.5 วินาที ถึง 10 วินาที โดยที่แรงดันไฟฟ้าขาออกเริ่มต้นของวงจรแปลงผันแบบบัค (V_o) เท่ากับ 33 V ($P_{CPL} = 108.9$ W) ที่เวลา 0.5 วินาที และทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาออกครั้งละ 3 V ทุก ๆ 1 วินาที จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ 60 V ($P_{CPL, rated} = 360$ W) ที่เวลา 9 วินาที แรงดันไฟฟ้าที่วงจรรอง (V_{dc}) และกระแสไฟฟ้าที่วงจรรอง (i_{dc}) เมื่อเกิดการกระเพื่อมจะสามารถเข้าสู่สถานะสมดุลได้ ซึ่งสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ได้ในรูปที่ 5.12 จึงสรุปได้ว่าค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.2 เป็นค่าที่น้อยและเพียงพอสำหรับการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบ โดยสามารถทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าวิธีการสร้างเสถียรภาพด้วยชุดเซตอุปบ่อนไปหน้าดังที่ได้นำเสนอ สามารถกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งนอกจากจะทำให้ระบบไม่เกิดการขาดเสถียรภาพแล้วยังทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบได้อีกด้วย



รูปที่ 5.13 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เมื่อมีการสร้างเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 5.14 ผลการจำลองสถานการณ์บนฮาร์ดแวร์ในรูป เมื่อมีการสร้างเสถียรภาพตั้งแต่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า

5.3 สรุป

บทที่ 5 นี้เป็นการนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยได้เริ่มต้นจากการนำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า พร้อมทั้งการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอ เพื่อใช้ในการออกแบบค่าอัตราขยาย K_f ที่อาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยเลือกใช้ค่าอัตราขยาย K_f ที่น้อยและเพียงพอต่อการเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพของระบบและที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบ พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องและยืนยันผลของการสร้างเสถียรภาพผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีโดยแสดงให้เห็นว่าการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการที่นำเสนอสามารถกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งนอกจากจะทำให้ระบบไม่เกิดการขาดเสถียรภาพแล้ว ยังสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบได้อีกด้วย ซึ่งในบทถัดไปจะเป็นการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับยืนยันผลทั้งหมดเพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและแสดงให้เห็นว่า องค์ความรู้และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ



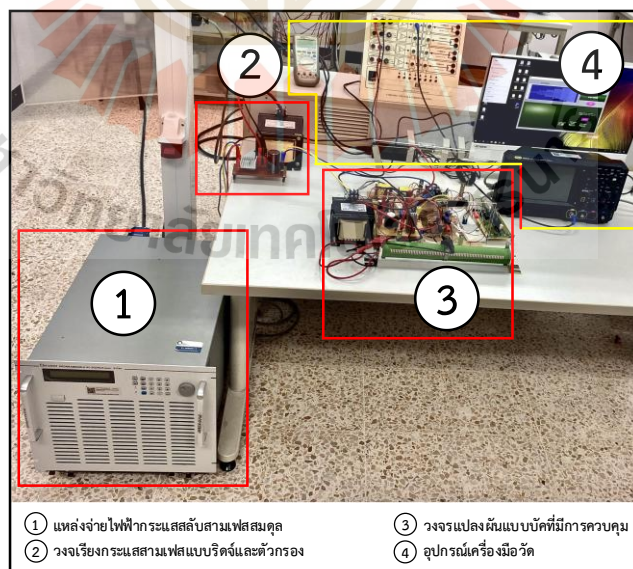
บทที่ 6

การสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

6.1 บทนำ

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ทั้งการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพดังรายละเอียดที่ได้นำเสนอไว้ ในบทที่ 4 และบทที่ 5 ที่ผ่านมา ได้รับการยืนยันความถูกต้องผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันว่าแนวคิด องค์ความรู้ และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ในบทที่ 6 นี้จึงเป็นการนำเสนอการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในห้องปฏิบัติการ พร้อมทั้งแสดงผลการทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ เพื่อแสดงให้เห็นว่าชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นให้ผลที่ถูกต้องและเหมาะสมต่อการนำไปใช้สำหรับยืนยันผลการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาต่อไป

6.2 การสร้างชุดทดสอบ



รูปที่ 6.1 ภาพรวมของชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ภาพรวมของชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่าชุดทดสอบแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่ ① ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล ส่วนที่ ② วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์และวงจรกรอง และส่วนที่ ③ วงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยจากรูปที่ 6.2 จะพบว่าส่วนที่ ① ได้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแบบโปรแกรมได้ (programmable AC power supply) ยี่ห้อ chroma รุ่น 61704 ในขณะที่ส่วนที่ ② และส่วนที่ ③ มีรายละเอียดการเลือกใช้อุปกรณ์ดังต่อไปนี้

6.2.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เป็นวงจรสำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์แบบสำเร็จรูป Vishay Bridge Rectifier รุ่น VS-36MT160 ที่มีพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 35 A และพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1600 V ดังแสดงในรูปที่ 6.2 และมีการติดตั้งร่วมกับแผ่นระบายความร้อน (heat sink) ดังแสดงในรูปที่ 6.3 เพื่อช่วยระบายความร้อน และป้องกันไม่ให้งจรเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนที่สูงมากเกินไป โดยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6-1)

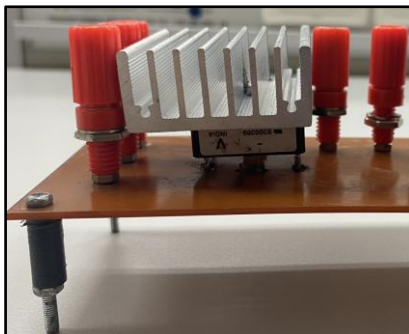
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_s \quad (6-1)$$

โดยที่ V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

V_s คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งมีหน่วยเป็นค่าอาร์เอ็มเอส (rms)



รูปที่ 6.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์



รูปที่ 6.3 การติดตั้งแผ่นระบายความร้อนสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

6.2.2 วงจรกรอง

วงจรกรองทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง (DC-link filter) ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุแสดงได้ดังรูปที่ 6.4 ซึ่งวงจรกรองนี้มีหน้าที่กรองสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ให้มีความเรียบและคงที่มากขึ้น

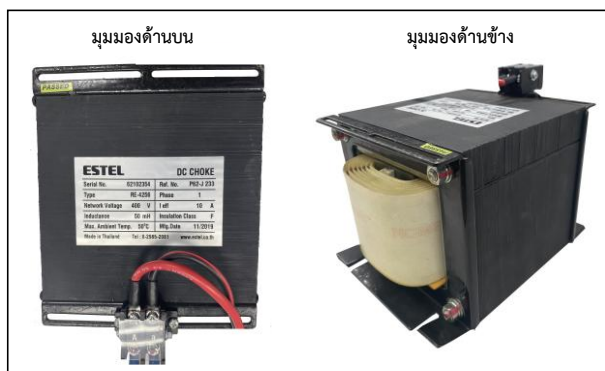


รูปที่ 6.4 วงจรกรอง

โดยรายละเอียดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรกรองที่เลือกใช้จะแสดงได้ดังนี้

1) ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองของ งานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำของบริษัท ESTEL ประเภท RE-4256 ขนาด 50 mH ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 400 V และ 10 A ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

2) ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง งานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ตัวเก็บประจุของบริษัท NIPPON รุ่น Radial Electrolytic Capacitors ขนาด $1000\ \mu\text{F}$ ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ $450\ \text{V}$ ดังแสดงในรูปที่ 6.6

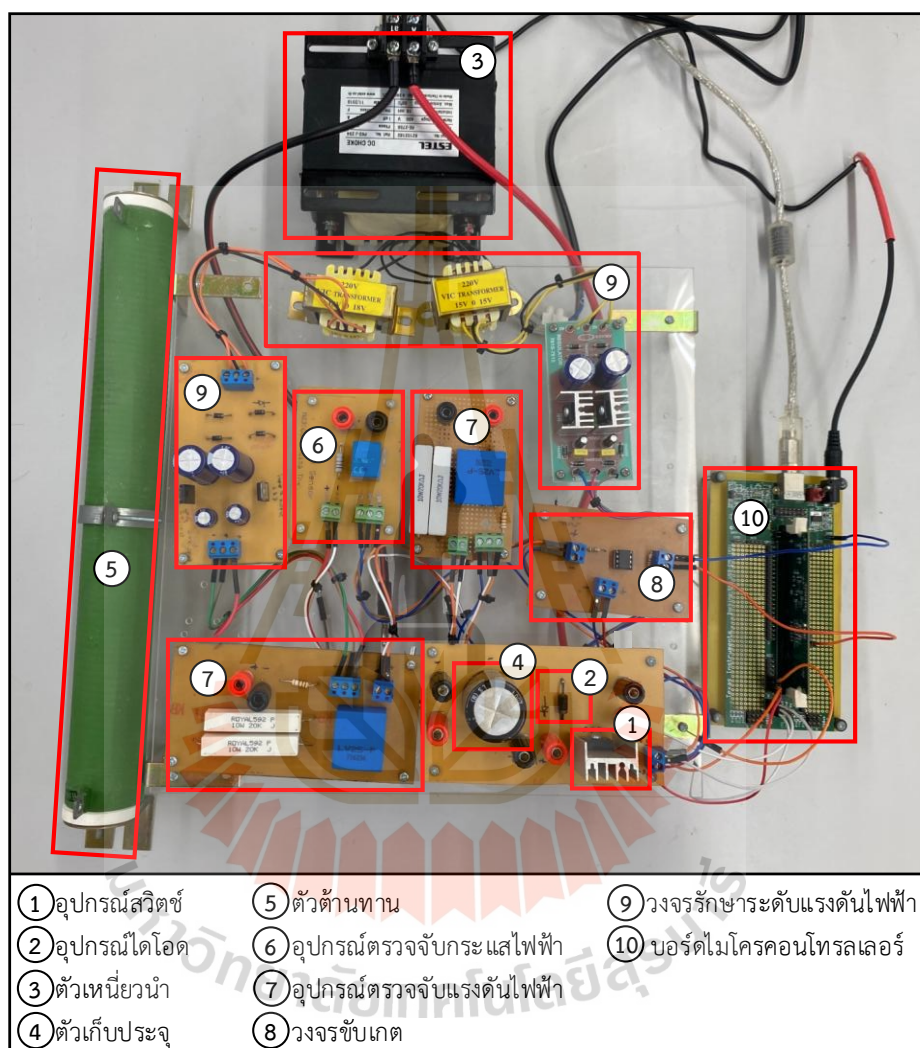


รูปที่ 6.6 ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

6.2.3 วงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

ชุดทดสอบวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน แสดงได้ดังรูปที่ 6.7 ซึ่งจากรูปจะพบว่า สามารถแบ่งออกได้เป็น 10 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ ① อุปกรณ์สวิตช์ส่วนที่ ② ไดโอด ส่วนที่ ③ ตัวเหนี่ยวนำ ส่วนที่ ④ ตัวเก็บประจุ ส่วนที่ ⑤ ตัวต้านทานซึ่งเป็นโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัก ส่วนที่ ⑥ อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า ส่วนที่ ⑦ อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้า ส่วนที่ ⑧ วงจรขับเคลื่อน (gate driver) ส่วนที่ ⑨ วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า และส่วนที่ ⑩ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้

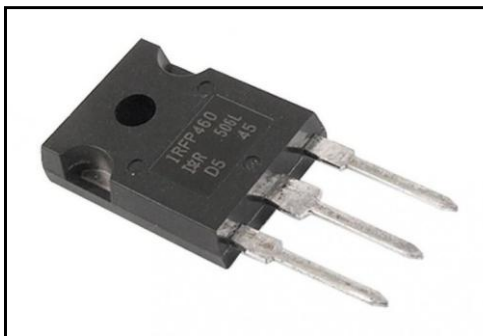
ออกแบบชุดทดสอบให้สามารถทำงานได้จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 360 W หรือพิกัดแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัค (v_o) เท่ากับ 60 V ซึ่งรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ที่เลือกใช้งานแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 6.7 ชุดทดสอบของวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1) อุปกรณ์สวิตช์

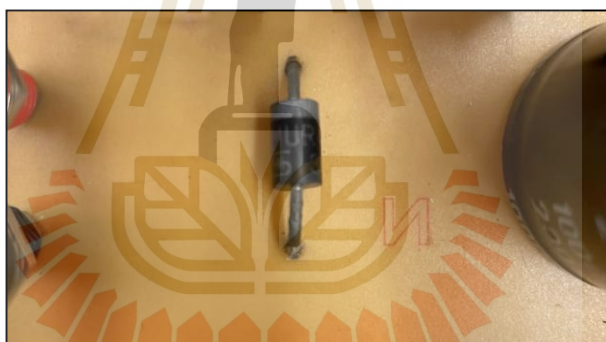
อุปกรณ์สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัค เป็นมอดูลสวิตช์มอสเฟต (mosfet) รุ่น IRFP460 ของบริษัท Vishay ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 500 V และ 20 A ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 อุปกรณ์สวิตช์

2) ไดโอด

ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบักแสดงได้ดังรูปที่ 6.9 ซึ่งเป็นไดโอดกำลังรุ่น MUR460 ของบริษัท Vishay มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 400 V



รูปที่ 6.9 อุปกรณ์ไดโอด

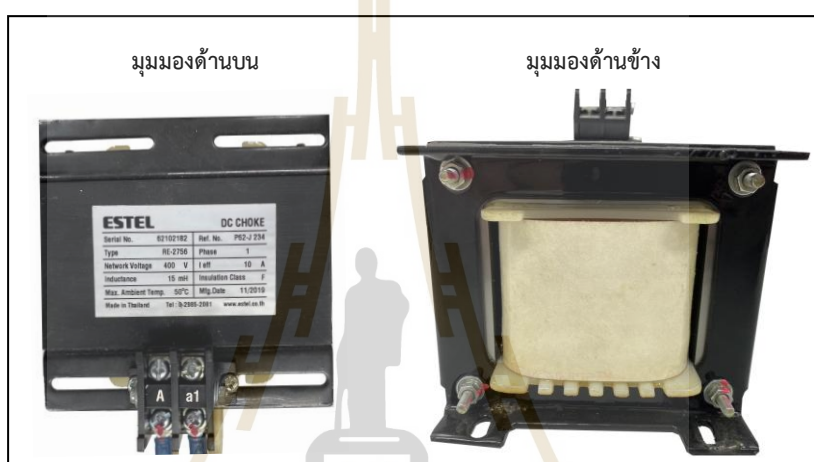
3) ตัวเหนี่ยวนำ

ค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (6-2)

$$L > \frac{(V_{dc} - V_o)}{f \Delta i_L V_{dc}} V_o \quad (6-2)$$

โดยที่ Δi_L คือ ค่ากระแสไฟฟ้าพลัว (ripple current)

เมื่อพิจารณาสมการที่ (6-2) ร่วมกับค่าพิกัดต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันแบบบัก ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของวงจรแปลงผันแบบบัก (v_{ac}) เท่ากับ 93.56 V แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก (v_o) เท่ากับ 60 V และความถี่การสวิตช์ (f_s) เท่ากับ 10 kHz และกำหนดให้ กระแสไฟฟ้าพลั่ว (Δi_L) มีค่าไม่เกิน 0.2 A จะสามารถคำนวณขนาดของตัวเหนี่ยวนำ (L) ได้เท่ากับ 11 mH และเมื่อคำนึงถึงตัวประกอบนิรภัย (safety factor) เท่ากับ 25% แล้ว งานวิจัยวิทยานิพนธ์ จึงได้เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาด 15 mH ของบริษัท ESTEL รุ่น RE-2756 ดังแสดงในรูปที่ 6.10 ซึ่งมี พิกัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 400 V และ 10 A ตามลำดับ



รูปที่ 6.10 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก

4) ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัก สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (6-3)

$$C > \frac{\Delta i_L}{8f\Delta v_C} \quad (6-3)$$

โดยที่ ΔV_C คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าพลั่ว (ripple voltage)

เมื่อพิจารณาสมการที่ (6-3) และกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าพลั่ว (Δv_C) มีค่าไม่เกิน 2.8 mV จะสามารถคำนวณขนาดของตัวเก็บประจุ (C) ได้เท่ากับ 892.86 μF และเมื่อคำนึงถึง

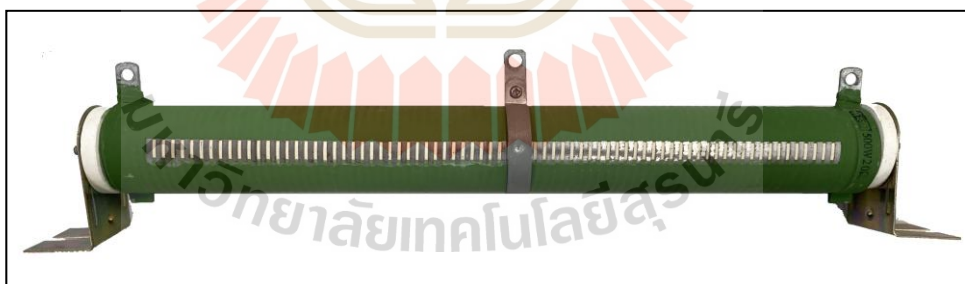
ตัวประกอบนิรภัยเท่ากับ 25% งานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด $1000\ \mu\text{F}$ ของบริษัท Nichicon ดังแสดงในรูปที่ 6.11 ซึ่งมีพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 200 V



รูปที่ 6.11 ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัก

5) ตัวต้านทาน

ตัวต้านทานซึ่งเป็นโหลดของวงจรแปลงผันแบบบัก งานวิจัยวิทยานิพนธ์ใช้ตัวต้านทานกำลังประเภท Dummy Load Resistor ขนาด $10\ \Omega$ ซึ่งมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 500 W แสดงได้ดังรูปที่ 6.12

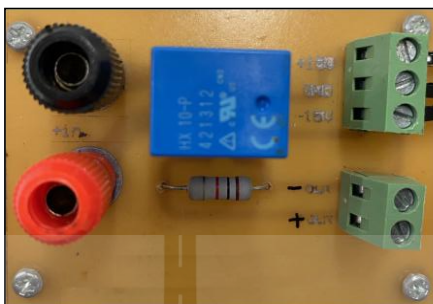


รูปที่ 6.12 โหลดตัวต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัก

6) อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า

อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า มีหน้าที่ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก โดยจะตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 V ถึง 3.3 V ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการส่งไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผลและสร้างสัญญาณควบคุม โดยอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าที่เลือกใช้เป็น

Current Transducer รุ่น HX 10-P ของบริษัท LEM สามารถตรวจจับกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 10 A ดังแสดงในรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า

7) อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

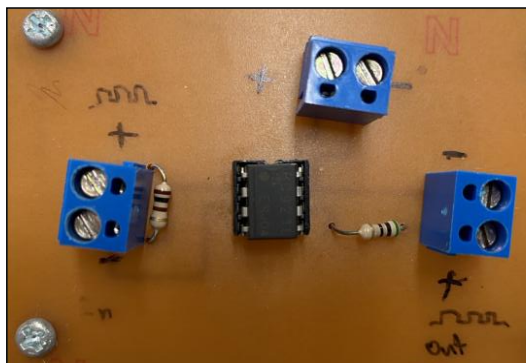
อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้า มีหน้าที่ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัค จากนั้นจะส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0 V ถึง 3.3 V ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผลและสร้างสัญญาณควบคุม โดยอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้างัดกล่าวคือรุ่น LV 25-P ของบริษัท LEM ซึ่งสามารถตรวจจับแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 600 V ดังแสดงในรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

8) วงจรขับเคลื่อน

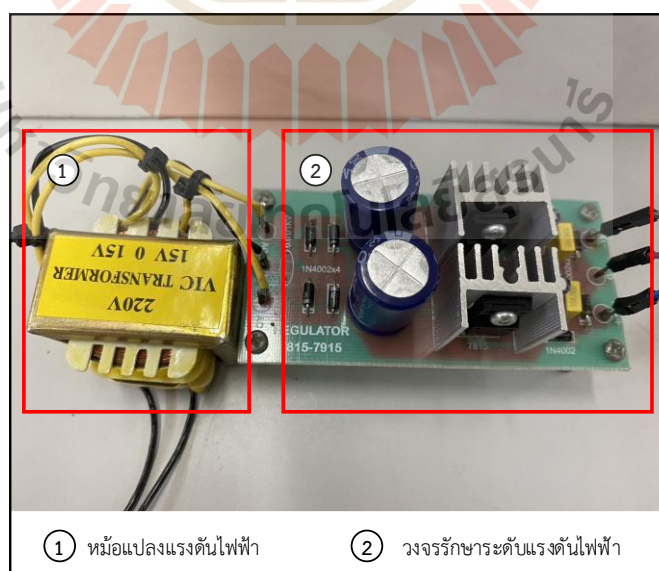
วงจรขับเคลื่อน (gate driver circuit) มีหน้าที่ในการขยายสัญญาณควบคุมจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3.3 V ให้มีขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 15 V เพื่อให้มีขนาดของแรงดันไฟฟ้าเพียงพอต่อการควบคุมการเปิดและปิดของอุปกรณ์สวิตช์ซมอสเฟต โดยวงจรขับเคลื่อนดังกล่าวคือ PC923 ของบริษัท SHARP ดังแสดงในรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 วงจรขั้วเกด

9) วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 6.16 ซึ่งจากรูปจะพบว่าประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ ① หม้อแปลงไฟฟ้าของบริษัท VIC มีหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก $220\text{ V}_{\text{rms}}$ ให้มีค่าเท่ากับ 15 V_{rms} และส่วนที่ ② วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส มีหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 15 V_{rms} ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นใช้ไอซีคงค่าแรงดันไฟฟ้าเบอร์ 7815 และไอซีเบอร์ 7915 เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าคงที่ -15 V , 0 V และ $+15\text{ V}$ สำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้า อุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้า และวงจรขั้วเกดของชุดทดสอบ



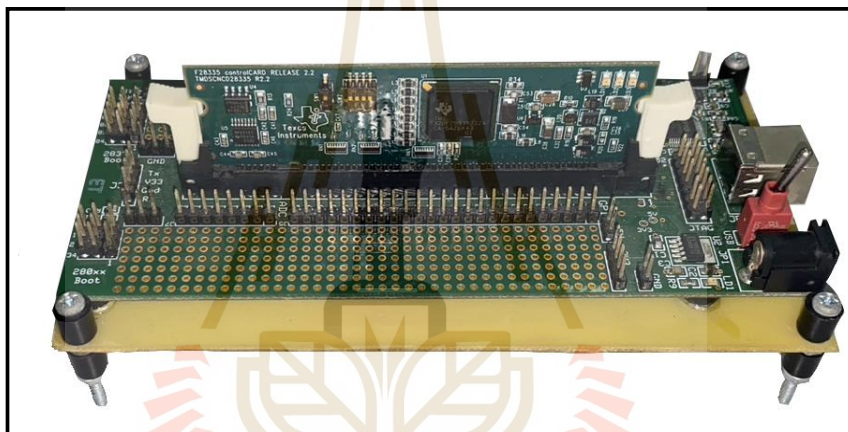
① หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า

② วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

รูปที่ 6.16 วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

10) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

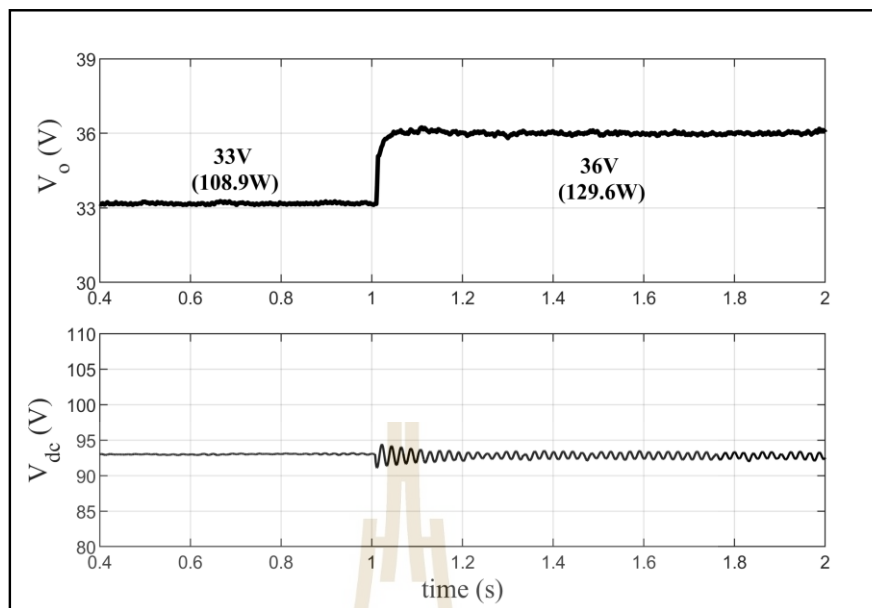
งานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335 ของบริษัท Texas Instruments ดังแสดงในรูปที่ 6.17 สำหรับทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณควบคุมวงจรแปลงผันแบบบักโดยรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากอุปกรณ์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าและอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณแอนะล็อก (analog) ผ่านช่องรับสัญญาณ ADC ของบอร์ดแล้วมาแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (digital) เพื่อใช้ในการประมวลผลสร้างสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลือนดังสมการที่ (3-84) ในบทที่ 3 ซึ่งตัวควบคุมโหมดการเลือนจะถูกโปรแกรมลงในบอร์ดดังกล่าว ด้วยภาษาซีที่อาศัยโปรแกรม Code Composer Studio จากนั้นจะส่งออกสัญญาณพีดีบีแอลยูเอ็มขนาด 3.3 V ผ่านช่องส่งสัญญาณ ePWM ของบอร์ดไปยังวงจรขับเคลื่อนต่อไป



รูปที่ 6.17 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp™ F28335

6.3 ผลการทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ

การทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ จะดำเนินการโดยกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของวงจรแปลงผันแบบบัก (V_o^*) จาก 33 V เป็น 36 V ที่เวลา 1 วินาที ผลการทดสอบที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 6.18 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ในช่วงเวลาที่ 0.4 วินาที ถึง 1 วินาที แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก (v_o) จะมีค่าเท่ากับ 33 V และเมื่อถึงวินาทีที่ 1 แรงดันไฟฟ้างอกจะมีค่าเพิ่มเป็น 36 V จนกระทั่งถึงเวลาที่วินาทีที่ 2 ซึ่งแรงดันในทั้งสองช่วงเป็นไปตามแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยัน ได้ว่าชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการสามารถให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องและสามารถนำไปใช้สำหรับตรวจสอบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพ เพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและแสดงให้เห็นว่าองค์ความรู้ และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในบทที่ 7 ต่อไป



รูปที่ 6.18 ผลการทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ

6.4 สรุป

บทที่ 6 นี้เป็นการนำเสนอการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยได้กล่าวถึง อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ได้ออกแบบเลือกใช้ รวมถึงนำเสนอผลการทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ โดยจากผลแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมโหมดการเลื้อนสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบักได้ถูกต้องตามค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่โปรแกรมไว้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพที่ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับองค์ความรู้และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ โดยการยืนยันผลของเสถียรภาพด้วยชุดทดสอบจะได้รับการนำเสนอในบทที่ 7

บทที่ 7

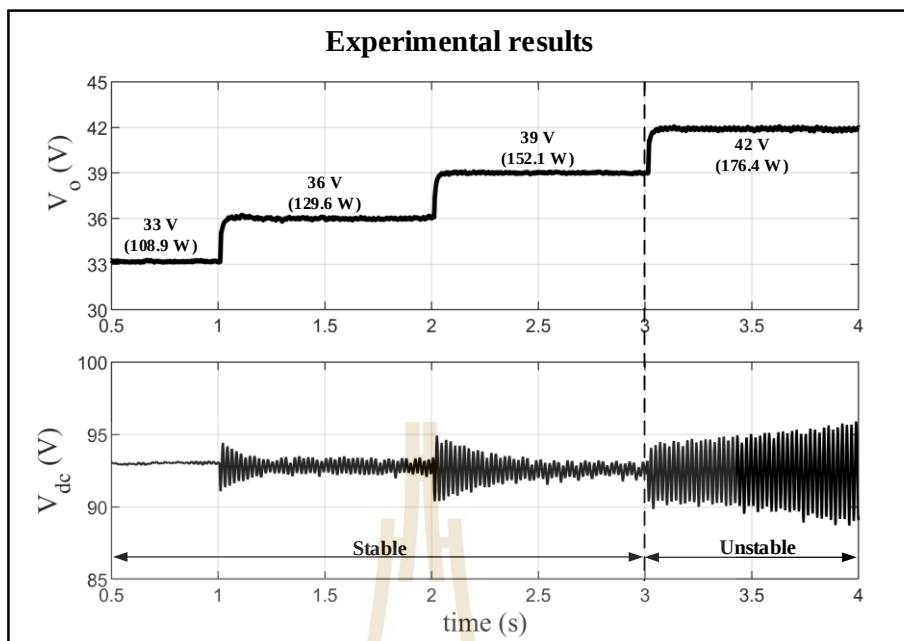
ผลการทดสอบเสถียรภาพของชุดทดสอบ

7.1 บทนำ

การทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการดังรายละเอียดที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 6 ที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัสได้ถูกต้องเป็นไปตามค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าชุดทดสอบสามารถนำไปใช้สำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพทั้งหมดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ ดังนั้นเนื้อหาในที่ 7 นี้จึงเป็นการนำเสนอการทดสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยชุดทดสอบ โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว กรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพ ณ จุดการขาดเสถียรภาพของระบบ และกรณีที่มีการสร้างเสถียรภาพจากจุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ โดยผลทดสอบที่ได้จะเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและแสดงให้เห็นว่าองค์ความรู้และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความถูกต้องซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

7.2 ผลการทดสอบการขาดเสถียรภาพ

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ดังที่ได้นำเสนอไว้ในรูปที่ 4.2 ในบทที่ 4 พบว่าระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 176.4 W ซึ่งจากการตรวจสอบความถูกต้องผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางทฤษฎี ดังนั้นเพื่อยืนยันว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้นจริง งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงดำเนินการทดสอบจุดการขาดเสถียรภาพของชุดทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.1 ดังนี้



รูปที่ 7.1 การทดสอบการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบ

จากรูปที่ 7.1 จะพบว่า ในช่วงเวลาที่ 0.5 วินาที ถึง 3 วินาที เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัค (v_o) มีการเปลี่ยนแปลงจาก 33 V ($P_{CPL} = 108.9$ W) เป็น 36 V ($P_{CPL} = 129.6$ W) และ 39 V ($P_{CPL} = 152.1$ W) แรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรอง (v_{dc}) มีลักษณะของการสั่นไหวที่ลดลงและสามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลานี้ชุดทดสอบยังคงทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ แต่อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่ 3 วินาที ถึง 4 วินาที เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัคมีการเปลี่ยนแปลงจาก 39 V ($P_{CPL} = 152.1$ W) ไปเป็น 42 V ($P_{CPL} = 176.4$ W) แรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรองจะเกิดการสั่นไหวที่เพิ่มมากขึ้นและไม่สามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้ ซึ่งสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 4.2 ในบทที่ 4 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้นก่อนค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการสร้างเสถียรภาพเพื่อให้ระบบสามารถทำงานต่อได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบ โดยการสร้างเสถียรภาพของชุดทดสอบจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 7.3

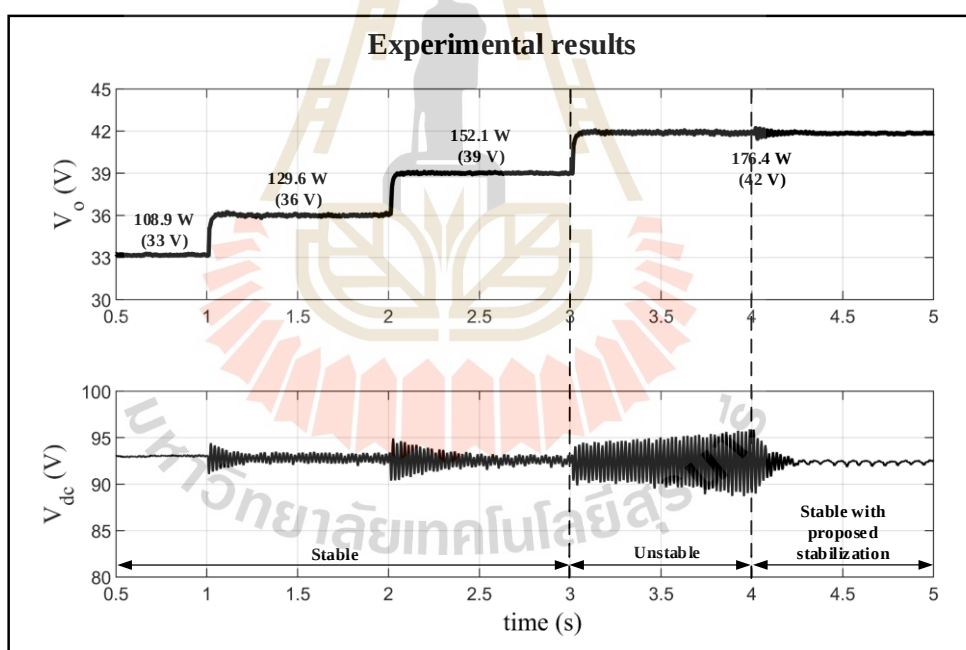
7.3 ผลการทดสอบการสร้างเสถียรภาพ

การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา อาศัยค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า (K_f) ที่มีค่าน้อยและเพียงพอต่อการสร้างเสถียรภาพซึ่งจากผลการตรวจสอบความถูกต้องผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปทั้งการสร้างเสถียรภาพ ณ จุดการขาดเสถียรภาพในหัวข้อที่ 5.2.3 และการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดในหัวข้อที่ 5.2.4 ในบทที่ 5 พบว่าผลที่ได้มี

ความสอดคล้องและตรงกับผลวิเคราะห์เสถียรภาพทางทฤษฎี ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือ และแสดงให้เห็นว่าองค์ความรู้และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถใช้งานได้จริง ในทางปฏิบัติ ดังนั้นหัวข้อที่ 7.3 นี้จึงได้ทดสอบการสร้างเสถียรภาพให้กับชุดทดสอบด้วย ตัวชดเชยอุป้อนไปหน้า ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมการสร้างเสถียรภาพของชุดทดสอบสามารถ ดูได้จากภาคผนวก จ. และผลการทดสอบการสร้างเสถียรภาพสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

7.3.1 ผลการทดสอบการสร้างเสถียรภาพ ณ จุดการขาดเสถียรภาพ

จากเส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นที่จุดการขาดเสถียรภาพเมื่อ K_f มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งได้นำเสนอไว้ดังรูปที่ 5.7 ในบทที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.1 เป็นค่าที่น้อยและเพียงพอที่สามารถสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพของระบบได้ และจาก ผลการตรวจสอบความถูกต้องผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์ แบบฮาร์ดแวร์ในรูปในรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 ตามลำดับ พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้อง และตรงกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางทฤษฎี โดยผลการทดสอบการสร้างเสถียรภาพ ณ จุดการขาดเสถียรภาพสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.2



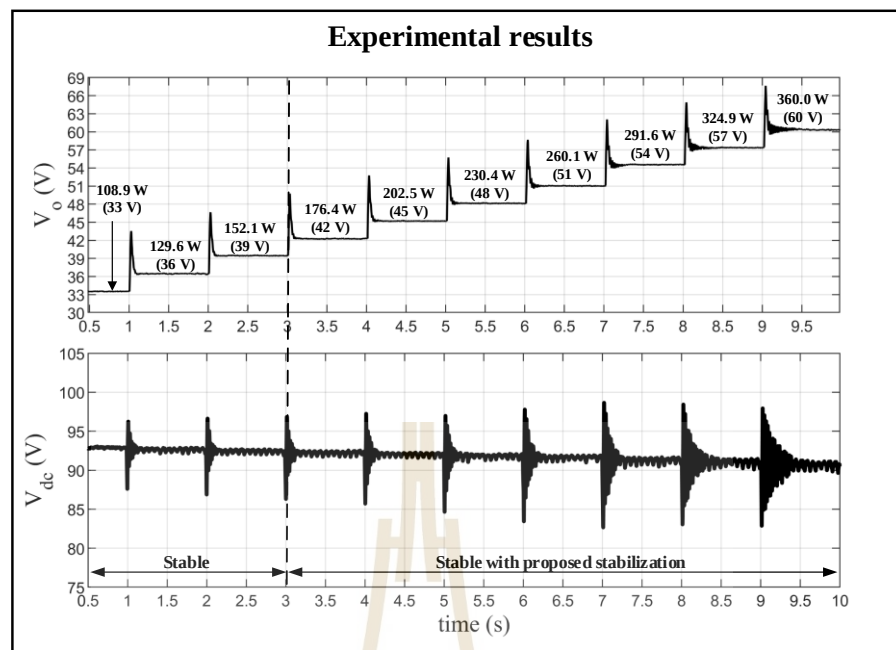
รูปที่ 7.2 การทดสอบการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบ

จากรูปที่ 7.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายถึงระบบไม่มีการสร้างเสถียรภาพ ตั้งแต่ช่วงเวลา 0.5 วินาที ถึง 4 วินาที เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบ buck มีการเปลี่ยนแปลงจาก 39 V ($P_{CPL} = 152.1$ W) เป็น 42 V ($P_{CPL} = 176.4$ W) ในช่วงเวลาที่ 3 วินาที ถึง 4 วินาที แรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรอง (v_{dc}) จะเกิดการสั่นไกวเพิ่ม

มากขึ้นจนไม่สามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 4.2 ในบทที่ 4 และในรูปที่ 5.7 ในบทที่ 5 ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ และเมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.1 ซึ่งหมายถึงระบบมีการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอ ในช่วงเวลา 4 วินาที ถึง 5 วินาที จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรองจะมีการสั่นไหวที่ลดลงและสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ซึ่งหมายถึงระบบมีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าวิธีการสร้างเสถียรภาพที่นำเสนอสามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้

7.3.2 ผลการทดสอบการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า

จากเส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นที่จุดกำลังไฟฟ้าค่าที่พิกัดเมื่อ K_f มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งได้รับการนำเสนอไว้ดังรูปที่ 5.10 ในบทที่ 5 แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.2 เป็นค่าที่น้อยและเพียงพอที่สามารถสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบได้ และจากผลการตรวจสอบความถูกต้องผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปในรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 ตามลำดับพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางทฤษฎี ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันและแสดงให้เห็นว่าองค์ความรู้ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ สามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงได้ดำเนินการทดสอบสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า โดยผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.3 ซึ่งจากรูปจะพบว่า เมื่อกำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.2 ตั้งแต่ช่วงเวลา 0.5 วินาที ถึง 10 วินาที โดยที่แรงดันไฟฟ้าขาออกเริ่มต้นของวงจรแปลงผันแบบบัส (v_o) เท่ากับ 33 V ($P_{CPL} = 108.9$ W) ที่เวลา 0.5 วินาที และทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาออกครั้งละ 3 V ในทุก ๆ 1 วินาที จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ 60 V ($P_{CPL, rated} = 360$ W) ที่เวลา 9 วินาที แรงดันไฟฟ้าที่วงจรกรอง (v_{dc}) จะปรากฏการสั่นไหวในช่วงสภาวะชั่วคราวและการสั่นไหวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ ซึ่งสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ได้ในรูปที่ 5.10 จึงสามารถยืนยันได้ว่าวิธีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูบป้อนไปหน้า สามารถกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้และทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่าองค์ความรู้และวิธีการสร้างเสถียรภาพที่นำเสนอมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ



รูปที่ 7.3 การทดสอบการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ
จนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดจากชุดทดสอบ

7.3 สรุป

บทที่ 7 นี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ทั้งผลการทดสอบการขาดเสถียรภาพ ผลการสร้างเสถียรภาพ ณ จุดการขาดเสถียรภาพ และผลการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า เพื่อใช้ยืนยันผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีทั้งหมดและเพื่อให้ผลการศึกษาวิจัยของวิทยานิพนธ์มีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจากความสอดคล้องและตรงกันของผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป และผลที่ได้จากชุดทดสอบที่แสดงให้เห็นว่า ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และวิธีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าที่นำเสนอ สามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดการทำงานจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า ที่ประกอบด้วย การวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพ จึงเป็นการยืนยันได้ว่าแนวคิด องค์ความรู้ และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ รวมถึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้หรือต่อยอดพัฒนาสำหรับการสร้างเสถียรภาพให้กับระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคตได้

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยเริ่มต้นจากการสำรวจ ปรัชณวกรรมและงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของ วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง รวมทั้งการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของ ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาและค้นคว้า ถือเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญ ในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนางานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างเสถียรภาพให้กับ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ด้วยตัวตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า เพื่อทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถทำงาน ได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าปกติของระบบ ซึ่งเป็นจุดเด่นและวัตถุประสงค์หลักของ งานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค้นคว้า และการสำรวจปรัชณวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ทั้งหมด ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 2

การสำรวจปรัชณวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 พบว่าวงจรอิเล็กทรอนิกส์- กำลังที่มีการควบคุมได้ถูกประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากวงจรดังกล่าว สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้า และ/หรือกระแสไฟฟ้า และ/หรือกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามความต้องการ ของผู้ใช้งานได้ แต่อย่างไรก็ตามตัวควบคุมแต่ละแบบล้วนมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน การเลือก ใช้ตัวควบคุมให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงานของ ระบบ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับการควบคุมวงจร แปลงผันแบบบัก เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็ว ส่งผลทำให้ระบบ เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ไวและมีความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวที่ต่ำ นอกจากนี้ยังมีความคงทนที่ทำให้ ยังคงสมรรถนะการควบคุมได้แม้จะมีสัญญาณจากภายนอกมารบกวนหรือค่าพารามิเตอร์ของระบบ เกิดการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม ไม่ว่าจะเป็นตัวควบคุมโหมด การเลื่อนหรือตัวควบคุมอื่น ๆ ล้วนมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีลักษณะ เป็นตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อนำโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ผ่านวงจรกรอง ค่าความต้านทานที่เป็นลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะไปลดทอนค่าความหน่วง ของวงจรกรองซึ่งปกติจะมีค่าเป็นบวก จึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าที่ วงจรกรองเกิดการสั่นไหวและเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น หมายความว่าจะมีลักษณะ เป็นค่าความต้านทานที่ติดลบเพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรองเกิด

การสั้นไกวเพิ่มขึ้น จนกระทั่งไม่สามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้ กล่าวคือ ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพโดยการขาดเสถียรภาพอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังหรือส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ นอกจากนี้แล้ว โหลดดังกล่าวยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อคาดเดาปริมาณของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่จะส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพสำหรับหลักการทำงานของระบบที่จุดดังกล่าว โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้อาศัยใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจรส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนหากนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยอาศัยทฤษฎีการแปลงแกนตติศด้วยวิธีการแปลงของพาร์คมผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยเริ่มต้นจากการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งพบว่า ผลตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องและตรงกัน จึงสามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง สามารถพัฒนาเพื่อต่อยอดเป็นแบบจำลองของระบบในกรณีที่มิตัวควบคุมเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพได้ จากนั้นจึงดำเนินการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีการควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ได้แล้วจะพบว่าเป็นแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งไม่สามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงได้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้อนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งมาทำการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นในแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้น โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในปริมาณเพียงเล็กน้อยรอบจุดปฏิบัติงานของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งทำให้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กที่มีค่าขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบที่อยู่ในรูปของเมทริกซ์จาโคเบียน จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ พบว่า แบบจำลองดังกล่าวให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งในสถานะชั่วครู่และในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่พิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้อง แม่นยำ และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและสร้างเสถียรภาพให้กับระบบได้ โดยรายละเอียดการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและผลการตรวจสอบความถูกต้องได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 3

สำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณางานวิจัยวิทยานิพนธ์เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อคาดเดาปริมาณของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงแล้วพิจารณาไปที่ค่าเจาะจงเด่นของระบบ เนื่องจากค่าเจาะจงดังกล่าวมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบมากที่สุด และการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP

รุ่น eZdsp™ F28335 โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปและยืนยันได้ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และจุดการขาดเสถียรภาพจะเกิดขึ้นก่อนค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่นำเสนอสามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลกระทบต่อนิยามของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรอง โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรองเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองถึงแม้ว่าจะทำให้กระแสฟลักซ์มีค่าลดลง แต่กลับส่งผลทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ลดลงด้วย ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองโดยมีการคำนึงถึงผลการกระทบต่อนิยามของระบบโดยรวมด้วย โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์เสถียรภาพและการตรวจสอบความถูกต้องได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 4

การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีวัตถุประสงค์เพื่อให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อไปจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้วิธีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวควบคุมแบบฟuzzy logic เนื่องจากเป็นวิธีการที่อาศัยการแก้ไขหรือตัดแปลงระบบควบคุมโดยไม่มีการเพิ่มอุปกรณ์พาสซีฟเข้าไปในระบบ ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อขนาด น้ำหนักและกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ การสร้างเสถียรภาพจะเริ่มต้นด้วยการนำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของตัวควบคุมแบบฟuzzy logic จากนั้นจะเป็นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพ ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะถูกใช้เพื่อการออกแบบค่าอัตราขยาย K_f ที่อาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง แล้วเลือกใช้ค่าอัตราขยาย K_f ที่น้อยและเพียงพอต่อการสร้างเสถียรภาพ ณ จุดการขาดเสถียรภาพและที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า โดยผลการยืนยันของการสร้างเสถียรภาพผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป มีความสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีซึ่งแสดงให้เห็นว่าการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการที่นำเสนอสามารถกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งนอกจากจะทำให้ระบบไม่เกิดการขาดเสถียรภาพแล้ว ยังสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดการทำงานจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบได้อีกด้วย โดยรายละเอียดการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้รับการเสนอไว้ในบทที่ 5

การสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับใช้ในการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพ เพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับองค์ความรู้และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูล วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์และวงจรกรอง และวงจรแปลงผันแบบบuckที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งวงจรแปลงผันแบบบuckจะได้รับการออกแบบให้สามารถทำงานได้จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้ยังได้มีการทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ โดยจากผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่า ชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการสามารถให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องและเป็นไปตามค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่กำหนดได้ไว้ ดังนั้นชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและ

การสร้างเสถียรภาพได้ โดยรายละเอียดการสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา พร้อมทั้งการทดสอบระบบได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 6

การทดสอบเสถียรภาพของชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับการยืนยันผลการศึกษาวิจัยทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ที่ประกอบด้วย การวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพ ซึ่งทั้งผลจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป และผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่มีความสอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่า องค์ความรู้และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า สามารถทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดงานการทำงานภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบ ซึ่งอาจต่อยอดพัฒนาและประยุกต์ใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคตได้ โดยรายละเอียดการทดสอบเสถียรภาพของชุดทดสอบได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 7

8.2 สรุปจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน เพื่อทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อไปจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า โดยได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นมาช่วยในการออกแบบค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า (K_f) ซึ่งวิธีการที่นำเสนอ ยังไม่มีการประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา อีกทั้งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ยืนยันผลของเสถียรภาพด้วยชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า วิธีการสร้างเสถียรภาพที่นำเสนอสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

8.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1) ผลการสร้างเสถียรภาพที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป และผลจากการทดสอบจริงพบว่าค่าอัตราขยาย K_f ที่เพิ่มมากขึ้น แม้จะสามารถสร้างเสถียรภาพให้กับระบบได้ แต่สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัสจะลดลง เนื่องจากการดัดแปลงตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ดังนั้นสำหรับงานในอนาคตควรนำเอาวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาช่วยในการออกแบบค่าอัตราขยาย K_f ที่นอกจากจะต้องสามารถเสถียรภาพให้กับระบบได้แล้ว ผลการตอบสนองของระบบภายหลังการสร้างเสถียรภาพจะต้องมีสมรรถนะที่ดีด้วย

2) ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.2 เป็นค่าที่น้อยและเพียงพอที่สามารถสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าอัตราขยาย K_f ดังกล่าว บางครั้งอาจมีค่ามากเกินไปสำหรับกำลังไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัสบางค่า ซึ่งค่าอัตราขยาย K_f ที่มากเกินไปนี้จะส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัสได้ หรือในกรณีค่า K_f ที่น้อยเกินไปไม่สามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดได้

ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตควรใช้การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวเพื่อคำนวณหาค่า K_f ที่เหมาะสมและแปรเปลี่ยนไปตามค่าของกำลังไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบักได้ เพื่อให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าโดยไม่ส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัก

3) วิธีการสร้างเสถียรภาพที่นำเสนอด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้านั้นเป็นการดำเนินการทางด้านโหลด แม้จะสามารถสร้างเสถียรภาพให้กับระบบได้ แต่มีข้อเสียคืออาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมของโหลด ซึ่งทำให้สมรรถนะโดยรวมของโหลดลดลง ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตควรให้ความสำคัญกับการออกแบบค่าอัตราขยาย K_f ที่ไม่เพียงแค่พิจารณาในแง่ของเสถียรภาพเท่านั้น แต่ยังต้องคำนึงถึงความไวของตำแหน่งโพล (pole sensitivity) เพื่อให้ได้ค่าอัตราขยาย K_f ที่การควบคุมของโหลดจะต้องมีสมรรถนะที่ดีด้วย



รายการอ้างอิง

- กองพัน อารีรักษ์ (2564). แบบจำลองวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลัง. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: บริษัท จรัสสินทวงศ์ จำกัด
- อภิชัย สุษะพันธ์ (2558). การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- อภิชัย สุษะพันธ์ (2564). การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- รัฐพล โพธิ์สังข์ (2563). การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้รูปแบบไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- อลิสตา ถนอมเมือง (2565). การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้วิธีการวางโพล วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- อภิชัย สุษะพันธ์, สุรบดินทร์ แดงด่อน, กองพัน อารีรักษ์, “การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัสที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์”, การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 16 (ECTI-CARD, สุรินทร์, 2567, หน้า 166-170
- P K, Prakash S. A Review of High Efficiency Power Converters for Electric Vehicles Applications. In: *2024 5th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*. Coimbatore, India; 2024. p. 26-29

- Khera FA, Gerada C, Bozhko S, Wheeler PW. AC/DC Converter Topologies Comparison for More Electric Aircraft Applications. In: *2022 IEEE 7th Southern Power Electronics Conference (SPEC)*. Nadi, Fiji; 2022. p. 1-6.
- Devi M, Lakshmi S. Comparative Study of DC-DC Converters Used in Electric and Hybrid Automobiles. In: *2024 5th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*. Coimbatore, India; 2024. p. 1-6.
- Carmona R, Stowhas-Villa A, Rojas CA, Renaudineau H, Marin J. High Power Density Electric Vehicle Powertrain Based on a T-Type DAB Partial Power DC-DC Converter. In: *2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP)*. Florianopolis, Brazil; 2023. p. 1-6.
- Sahoo S, Selvam K, Dhiman H, Shah K. Comparing On-Board Chargers and Quasi-Z-Source Converters for Integrated Charge Controller Applications in Electric Vehicles: An In-Depth Analysis. In: *2023 First International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computational Intelligence (ICAEECI)*. Tiruchengode, India; 2023. p. 1-8.
- Chub A, Buticchi G, Sidorov V, Vinnikov D. Zero-Redundancy Fault-Tolerant Resonant Dual Active Bridge Converter for More Electric Aircrafts. In: *2022 IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. Kiel, Germany; 2022. p. 1-6.
- Ismagilov FR, Vavilov VE, Hakimov RA, Yamalov II, Urazbakhtin RR. Issues of Future Aircraft DC/DC Converters Design and Construction. In: *2023 9th International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics (EECR)*. Wuhan, China; 2023. p. 1-5.
- Luckett B, He J. Genetic Algorithm Enabled Multi-Objective Design Optimization of Power Converters for Electric Aircraft Propulsion. In: *2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Nashville, TN, USA; 2023. p. 1836-1842.

- Carcouet S, Ecrabey J. High efficiency low voltage isolated DC-DC converter based on GaN devices for aircraft application. In: *2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe)*. Aalborg, Denmark; 2023. p. 1-9.
- Zhu Y, Yan X, Wang Z, Yang T, Bozhko S, Wheeler P. Half-Bridge-Active-Clamp Converter with High Step-down Capabilities for More Electric Aircraft Applications. In: *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Brussels, Belgium; 2022. p. 1-6.
- Deng S, Lei T, Li R, Yu H, Zhang X, Zhang X. Research on Control Methods for Multi-Port Converters in Electric Aircraft. In: *2024 8th International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA)*. Hong Kong, Hong Kong; 2024. p. 185-193.
- Ahmed N, Imran MT, Hasnaine QR, Mahmud S. Comparative Performance Analysis Between DC-DC Multi-Input ZETA and Multi-Input SEPIC Converter for Hybrid Renewable Energy System. In: *2023 First International Conference on Cyber Physical Systems, Power Electronics and Electric Vehicles (ICPEEV)*. Hyderabad, India; 2023. p. 1-6.
- Alsokhry F. Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System Under Various Operating Conditions. In: *2024 IEEE 8th Energy Conference (ENERGYCON)*. Doha, Qatar; 2024. p. 1-6.
- N AKS, SSP S, Mahalakshmi R. Implementation of Effective Controller for Solar Fed RSC Based Grid Connected DFIG. In: *2022 International Conference on Futuristic Technologies in Control Systems & Renewable Energy (ICFCR)*. Malappuram, India; 2022. p. 1-5.
- Alquiza LKP, Recto KHA, Loresco PJM, Villalobos J. Comparative Assessment of Off-shore Wind Converters and Wave Energy Converters in the Philippines. In: *2023 IEEE 15th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*. Coron, Palawan, Philippines; 2023. p. 1-6.

- Lijin KL, Mohammed SS, Shanir PP, Haw LK. A Non-Isolated Two Input Single Output (TISO) DC-DC converter for Energy Storage Applications. In: *2022 International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST)*. Miri Sarawak, Malaysia; 2022. p. 238-242.
- Anita, Meher J, Roy K. Comparative Analysis of High Gain DC-DC Boost Converter with Different Controllers. In: *2024 IEEE International Conference on Smart Power Control and Renewable Energy (ICSPCRE)*. Rourkela, India; 2024. p. 1-6.
- Saravanan K, Ramaswamy A. Electro-Kinetic Energy Extraction from Civil machinery Vehicles by using Electromagnetic Inductive loop and Ultra lift Luo Converter. In: *2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)*. Bhopal, India; 2023. p. 1-4.
- Korada SR, Brinda R, Soubache ID. Analysis of Power Electronics Contribution to Electric Vehicles using Renewable Energy. In: *2023 International Conference on Data Science and Network Security (ICDSNS)*. Tiptur, India; 2023. p. 1-6.
- Guercio A, Curto D. Estimation of the energy producibility of an offshore wave energy converter. In: *OCEANS 2022 - Chennai*. Chennai, India; 2022. p. 1-5.
- Mohammad K, Amir M, Rashid MF, Rahman A, Ahmad M. Analysis of various DC-DC Converter Control Schemes Fed with Solar PV for PMDC Motor Drive. In: *2022 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON)*. Kollam, India; 2022. p. 1-6.
- Kumari N, Kalam MA, Modi V. Analysis Of ANN Control With Buck Converter For Output Voltage Control Of Wind turbine For Battery Charging. In: *2022 IEEE 2nd International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (iSSSC)*. Gunupur, Odisha, India; 2022. p. 1-5.
- Zentani A, Almaktoof A, Kahn MTE, Elmezughi MK. An Effectual Control Technique for Islanded Operation of a Step-Up Power Converter Fed by Small Wind Turbine System. In: *2022 International Conference on Electrical Engineering and Sustainable Technologies (ICEEST)*. Lahore, Pakistan; 2022. p. 1-6.

- I. -H. Chung, M. -J. Zhang and C. -P. Chu, "Scaled Component Models for Wind Farm Power Analysis Based on Direct-Drive Wind Turbines," *2024 IEEE 7th Eurasian Conference on Educational Innovation (ECEI)*, Bangkok, Thailand, 2024, pp. 399-404
- Wang Y, Fang Z, Zhang B, Aisikaer, Lv H, Song L. LFAC-DRU-HVDC Based Offshore Wind Power Delivery Solution. In: *2023 3rd International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS)*. Dali, China; 2023. p. 999-1003.
- Yuan X, Zhang Y, Peng X. Power Converter Technologies for 20MW Wind Turbines. In: *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Detroit, MI, USA; 2022. p. 1-8.
- Pakdeeto J, Thanommuang A, Chaicharoenudomrung K, Areerak K, Areerak K. The Effect of Parameter Variations of System Stability for AC-DC Power System Feeding Controlled Buck Converter. In: *2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*. Nakhon Ratchasima, Thailand; 2021. p. 61-64.
- Pakdeeto J, Thanommuang A, Areerak K. The DC Voltage Controller Design of Traction Substation in Heavy Rail Systems. In: *2024 12th International Electrical Engineering Congress (IEEECON)*. Pattaya, Thailand; 2024. p. 1-4.
- Pakdeeto J, Thanommuang A, Chaicharoenudomrung K, Areerak K, Areerak K. The Effect of Parameter Variations of System Stability for AC-DC Power System Feeding Controlled Buck Converter. In: *2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*. Nakhon Ratchasima, Thailand; 2021. p. 61-64.
- Santiprapan P, Areerak K, Areerak K. An Adaptive Gain of Proportional-Resonant Controller for an Active Power Filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2024;39(1):1433-1446.
- Kumar A, Dwivedi P, Bose S. Design and Analysis of Buck Converter Using Sliding Mode Approach. In: *2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES)*. Prayagraj, India; 2020. p. 1-6.

- Hashmi SHM, Memon AY. Simulation of PWM based Sliding Mode Controller for a DC-DC Buck Converter on FIL. In: *2020 17th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. Islamabad, Pakistan; 2020. p. 344-349.
- Mohanty S, Choudhury A, Pati S, Kar SK, Khatua S. A comparative analysis between a single loop PI, double loop PI and Sliding Mode Control structure for a buck converter. In: *2021 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODICON)*. Bhubaneswar, India; 2021. p. 1-6.
- Mituletu I-C, Anghel D, Ardeljan L, Magda M. DC-DC Buck Converter Based on Arduino Uno Sliding Mode Controller. In: *2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. Bucharest, Romania; 2021. p. 1-6.
- Roy TK, Pramanik MAH, Faria F, Ghosh SK. Speed Control of a DC-DC Buck Converter Fed DC Motor Using an Adaptive Backstepping Sliding Mode Control Approach. In: *2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. Perth, Australia; 2021. p. 1-6.
- Mouslim S, Jenkal S, Imodane B, Ajaamoum M, Oubella M. Simulation and analyses of Buck converter using SMC with two control techniques. In: *2022 International Conference on Microelectronics (ICM)*. Casablanca, Morocco; 2022. p. 185-188.
- Setthawong N, Areerak K, Santiprapan P, Panpean C, Areerak K. Gain Tuning Technique Based on Sliding Mode Control for Shunt Active Power Filter. In: *2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. Khon Kaen, Thailand; 2022. p. 1-4.
- Kumbhare JM, Kadwane SG, Patil M. Development of Fuzzy Controller Using 8-Bit Microcontroller for Switch Mode DC Servo Motor Control. In: *2022 IEEE Delhi Section Conference (DELCON)*. New Delhi, India; 2022. p. 1-10.

- Ramesh G, Babu VR. Comparative Study of PI and Fuzzy Control Strategies to A Novel Buck-Boost Converter. In: *2022 First International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT)*. Trichy, India; 2022. p. 1-6.
- Yadav S, Namrata K, Kumar N, Samadhiya A. Multiphase Buck Converters for Power Delivery Using Neural Network Control Scheme. In: *2022 4th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE)*. Shillong, India; 2022. p. 1-6.
- Kalson S, Kar SR. Comparison of Buck Converter Control Methods. In: *2022 2nd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)*. Hubli, India; 2022. p. 1-8.
- Tarik MN, Biswas SP, Mondal S, Nahin NI, Paul AK, Haque SS. A Robust PI-Lag Compensator for DC-DC Buck Converter Fed DC Motor Drives. In: *2023 6th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)*. Khulna, Bangladesh; 2023. p. 1-6.
- Jaid A, Durge G, Joshi A, Kalambe K, Dhale H, Patankar S. Comparative Study of PID and State Feedback Controller for Level Control System. In: *2023 4th IEEE Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*. Bangalore, India; 2023. p. 1-5.
- Adeel M, Fayyaz U, Rafi U, Farooq MU. Design of a Buck Converter with an Analogue PI Controller for Wide Load Range Applications. In: *2023 4th International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*. Sukkur, Pakistan; 2023. p. 1-5.
- Mao T, Li L, Cao Y. Sliding mode control of synchronous Buck converter based on variable speed reaching law. In: *2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. Shanghai, China; 2024. p. 1058-1063.
- Ning W, Li L, Cao Y. Research on Buck Converter with Improved Approach Rate Compound Sliding Mode Control Based on PSO. In: *2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. Shanghai, China; 2024. p. 1064-1069.

- Marcillo KEL, et al. Interval Robust Controller to Minimize Oscillations Effects Caused by Constant Power Load in a DC Multi-Converter Buck-Buck System. *IEEE Access*. 2019;7: 26324-26342.
- Lorzadeh O, Lorzadeh I, Soltani MN, Hajizadeh A. A Novel Active Stabilizer Method for DC/DC Power Converter Systems Feeding Constant Power Loads. In: *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Vancouver, BC, Canada; 2019. p. 2497-2502.
- Babaiahgari B, Jeong Y, Park J-D. Stability Enhancement Method for DC Microgrids with Constant Power Loads using Variable Inductor. In: *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. New Orleans, LA, USA; 2020. p. 2236-2240.
- Babaiahgari B, Jeong Y, Park J-D. Dynamic Control of Region of Attraction Using Variable Inductor for Stabilizing DC Microgrids With Constant Power Loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2021;68(10): 10218-10228.
- Zhang H, et al. Robust Cooperative Predictive Control of DC Microgrids with Constant Power Loads. In: *2023 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE)*. Wuhan, China; 2023. p. 1-6.
- Zhang R, Lei J, Xiang X, Li W, He X, Zhao R. A Negative Parallel Virtual RLC Damper for LC-filtered Constant Power Load in DC Microgrid. In: *2021 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*. Haikou, China; 2021. p. 1689-1694.
- Liu L, Wang D, Ni Y, Song K, Li Y, Sun G. Stability Control of Boost Converter with Constant Power Load by ABSMC. In: *2023 5th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES)*. Shenyang, China; 2023. p. 18-23.
- Li Y, Vannorsdel KR, Zirger AJ, Norris M, Maksimovic D. Current Mode Control for Boost Converters With Constant Power Loads. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2012;59(1):198-206.

- Zhang H, et al. Robust Cooperative Predictive Control of DC Microgrids with Constant Power Loads. In: *2023 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE)*. Wuhan, China; 2023. p. 1-6.
- Scher AD, Kosik M, Pham P, Costinett D, Hossain E. Stability Analysis and Efficiency Optimization of an Inductive Power Transfer System With a Constant Power Load. *IEEE Access*. 2020;8: 209762-209775.
- Mahdavyfakhr M, Amiri N, Lin H, Jatskevich J. Dynamic Analysis of AC Microgrids with Constant Power Loads or Sources. In: *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Vancouver, BC, Canada; 2021. p. 238-244.
- Yuan C, Huangfu Y, Ma R. Disturbance Observer-based Finite-time Control for DC-DC Converter Feeding Constant Power Loads with Unknown Load Variation. In: *2020 39th Chinese Control Conference (CCC)*. Shenyang, China; 2020. p. 5305-5310.
- Yuan C, Huangfu Y, Bai H, Pang S, Zhang H, Shi W. Stability Analysis and Active Stabilizer Design of The Bipolar DC Power System Feeding Constant Power Loads for Unmanned Aerial Vehicle. In: *2022 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*. Detroit, MI, USA; 2022. p. 1-6.
- Yuan C, Huangfu Y, Ma R. Adaptive Finite-time Control of DC-DC Converter Feeding Constant Power Load for Fuel Cell Vehicle. In: *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. Detroit, MI, USA; 2020. p. 1-6.
- Sebastià-Rullo M, Cid-Pastor A, Valderrama-Blavi H, Aroudi AE, Salamero LM. Passive Damping Stabilization for Constant-Power Loaded Boost Converter. In: *2023 IEEE 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Helsinki, Finland; 2023. p. 1-6.
- Sebastià-Rullo M, Cid-Pastor A, Valderrama-Blavi H, Aroudi AE, Martínez-Salamero L. Series Loss-Free Resistor as Stabilizing Active Damping of Constant-Power Load Systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2024;71(12):5847-5860.

- Deng S, Lei T, Jin X, Yu H, Zhang X, Zhang X. Research on Power Control Method of Fuel Cell UAV DC System with Constant Power Load. In: *2023 IEEE 14th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. Shanghai, China; 2023. p. 879-885.
- Krishan R, Y R, Kumar MP. Stability Assessment and Simplified Control Strategy for DC Microgrids with Constant Power Load. In: *2024 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. Seattle, WA, USA; 2024. p. 1-5.
- Krishan R, Rohith Y. Load and Generation Converters Control Strategy to Enhance the Constant Power Load Stability Margin in a DC Microgrid. *IEEE Access*. 2024;12: 35972-35983.
- Wang MF, Qu Wei D. Adaptive Synchronization of Chaotic Brushless DC Motors with Uncertain System Parameters Based on Lyapunov Stability theory. In: *2018 26th International Conference on Systems Engineering (ICSEng)*. Sydney, NSW, Australia; 2018. p. 1-4.
- Du W, Zhang J, Zhang Y, Qian Z, Peng F. Large signal stability analysis based on gyrator model with constant power load. In: *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. Detroit, MI, USA; 2011. p. 1-8.
- Shen Y, Yang S, Xing H, Wang D, Wang L. Large Signal Stability Analysis of More Electric Aircraft Power System. In: *2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe)*. Riga, Latvia; 2018. p. P.1-P.8.
- Wang Y, Xu F, Mao S, Yang S, Shen Y. Adaptive Online Power Management for More Electric Aircraft With Hybrid Energy Storage Systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2020;6(4): 1780-1790.
- Ma Y, Corzine K, Maqsood A, Gao F, Wang K. Stability Assessment of Droop Controlled Parallel Buck Converters in Zonal Ship DC Microgrid. In: *2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*. Washington, DC, USA; 2019. p. 268-272.
- Veerachary M, Anu. Stability Analysis of Higher-order Buck Converters: Participation Factors Approach. In: *2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*. Greater Noida, India; 2020. p. 165-170.

- Serra FM, Magaldi GL, Gil-González W, Montoya O. Passivity-Based PI Controller of a Buck Converter for Output Voltage Regulation. In: *2020 IEEE ANDESCON*. Quito, Ecuador; 2020. p. 1-6.
- Gil-González WJ, Montoya OD, Garces A, Serra FM, Magaldi G. Output Voltage Regulation For dc-dc Buck Converters: a Passivity-Based PI Design. In: *2019 IEEE 10th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS)*. Armenia, Colombia; 2019. p. 189-192.
- Roy R, Kapat S. Input Filter-Based Ripple Injection for Mitigating Limit Cycling in Buck Converters Driving CPL. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021;9(2):1315-1327.
- Babes B, Mekhilef S, Boutaghane A, Rahmani L. Fuzzy Approximation-Based Fractional-Order Nonsingular Terminal Sliding Mode Controller for DC-DC Buck Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2022;37(3):2749-2760.
- Ghosh G, Vyapari S, R VN. Impedance Model Based Small-Signal Stability Assessment of an Isolated EV Charger Using LLC Resonant Converter. In: *IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Singapore, Singapore; 2023. p. 1-6.
- Dalala ZM, Saadeh OS, Zahid ZU. DC link stability analysis of a multi-input single-output (MISO) power distribution system utilizing second life batteries. In: *2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Nashville, TN, USA; 2023. p. 2313-2317.
- Dalala ZM, Saadeh OS. A New Robust Control Strategy for Multistage PV Battery Chargers. In: *2018 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. Charlotte, NC, USA; 2018. p. 1-5.
- Wang Y, Liu D, Shen Z, Zhang Q, Deng F, Chen Z. A Nonlinear Stability Analysis Method of Grid-Connected Inverter. In: *2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC)*. Kigali, Rwanda; 2021. p. 1-5.

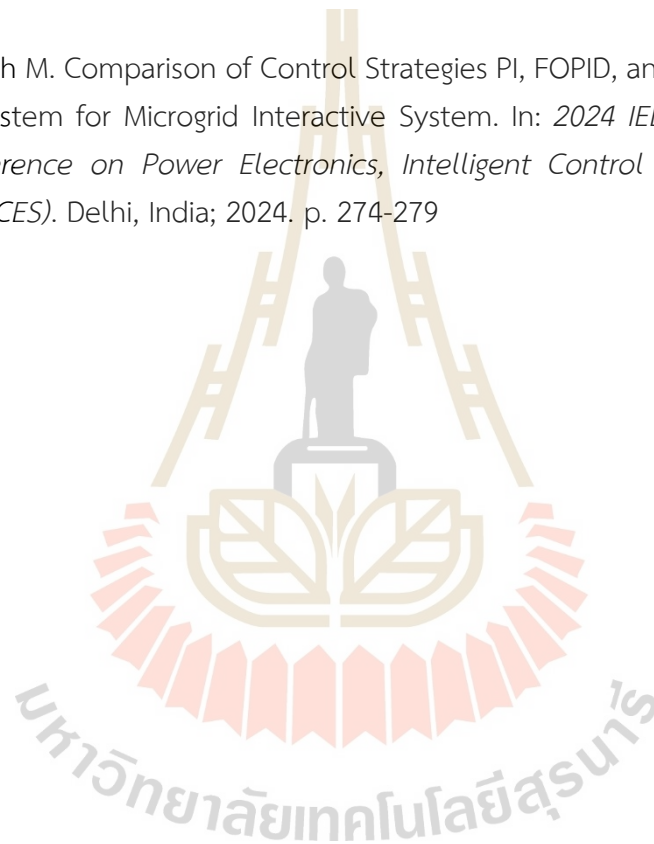
- Liu W, Zhang M, Zhan M. Modeling for Analyzing Practical Oscillation Event of AC/DC Distribution Networks with Power Electronic Transformer. In: *2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. Wuhan, China; 2021. p. 1-6.
- Chaicharoenaudomrung K, Pakdeeto J, Areerak K, Areerak K. Mathematical Model of DCMGs with PV arrays Feeding the Parallel Constant Power Loads. In: *2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Chiang Mai, Thailand; 2022. p. 1-4.
- Jessen K, Soltani M, Hajizadeh A, Jensen SH, Schaltz E. Modeling and Control Design for a Bidirectional DC-DC Converter System for Cyclic Operation of a Reversible Solid Oxide Electrolysis Cell Stack. In: *IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Singapore, Singapore; 2023. p. 1-6.
- Areerak K, Sopapirm T, Bozhko S, Hill CI, Suyapan A, Areerak K. Adaptive Stabilization of Uncontrolled Rectifier Based AC–DC Power Systems Feeding Constant Power Loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018;33(10):8927-8935.
- Shan Z, Fan S, Liu X, Ding X, Li Z. Transient Mitigation Using an Auxiliary Circuit in Cascaded DC–DC Converter Systems With Virtual Impedance Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022;69(5):4652-4664.
- Miao K, Zhang Y, Zhang J, Fan S, Yin X. Virtual RC Feedforward Control Strategy for Constant Power Load in Marine DC Microgrid. In: *2022 Power System and Green Energy Conference (PSGEC)*. Shanghai, China; 2022. p. 565-570.
- Bouroju S, Tah A. Modeling and Analysis of Actively-Damped DC-DC Boost Converter with Constant Power Load. In: *2024 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*. Bhopal, India; 2024. p. 1-6.
- Bouroju S, Tah A. Design of Full State Feedback Control for Boost Converter with Constant Power Load. In: *2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*. Hyderabad, India; 2024. p. 1-6.

- Abdolahi M, Adabi J, Mousavi SYM. An Adaptive Extended Kalman Filter With Passivity-Based Control for DC-DC Converter in DC Microgrids Supplying Constant Power Loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2024;71(5):4873-4882.
- Wu M, Lu DD. A Novel Stabilization Method of LC Input Filter With Constant Power Loads Without Load Performance Compromise in DC Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015;62(7):4552-4562.
- Wu J, Lu Y. Feedback Linearization Adaptive Control for a Buck Converter with Constant Power Loads. In: *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. Shenzhen, China; 2018. p. 1-6.
- Wu M, Lu DDC. Adding virtual resistance in source side converters for stabilization of cascaded connected two stage converter systems with constant power loads in DC microgrids. In: *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA)*. Hiroshima, Japan; 2014. p. 3553-3556.
- Wu M, Lu D-C. An active damping method for stabilization of cascaded connected two stage converter systems with constant power loads in DC microgrids. In: *2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Melbourne, VIC, Australia; 2014. p. 2664-2667.
- Wu M, Lu D-C. A Novel Stabilization Method of LC Input Filter With Constant Power Loads Without Load Performance Compromise in DC Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015;62(7):4552-4562.
- Wu J, Lu Y. Adaptive Backstepping Sliding Mode Control for Boost Converter With Constant Power Load. *IEEE Access*. 2019;7:50797-50807.
- Zehra S, Kansara AP. A Combination of the SMC Controller with the PI Controller for Brushless DC Motor Speed Control. In: *2024 International Conference on Electrical Electronics and Computing Technologies (ICEECT)*. Greater Noida, India; 2024. p. 1-5.

Hosseini A, Hosseinnataj S, Adabi J. Bidirectional DISO DC-DC Converter Based on Fixed-Frequency Sliding Mode Control Strategy. In: *2024 32nd International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Tehran, Iran, Islamic Republic of; 2024. p. 1-5.

Singh AP, Ahmad AU, Sahay K. Sliding Mode Control for DC Microgrid Powered by Solar PV, Fuel Cell and Energy Storage System with Pulsating Loads. In: *2024 IEEE Third International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. Delhi, India; 2024. p. 583-588.

Yegon P, Singh M. Comparison of Control Strategies PI, FOPID, and ANFIS Controllers in EV System for Microgrid Interactive System. In: *2024 IEEE Third International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. Delhi, India; 2024. p. 274-279



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a golden-yellow structure resembling a traditional Thai stupa or a stylized 'H' shape. Inside this structure is a grey silhouette of a person standing on a pedestal. Below the stupa-like structure is a circular emblem with a red and white design. At the bottom, the university's name is written in Thai script.

ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

S. Daengdon, A. Suyapan, K-P. Areerak, J. Pakdeeto, “Stability Investigation of AC-DC Power System feeding a Buck Converter Controlled by Sliding Mode Controller,” in *IEEE Access*, vol. xx, no. xx, pp. xx-xx, 2025, doi:10.1109/ACCESS.2025.3585767.

อภิชัย สุยะพันธ์, สุรบดินทร์ แดงดอน, กองพันธ์ อารีรักษ์. (2567). การออกแบบตัวควบคุม โหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์. *การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 16 (ECTI-CARD)*. สุรินทร์: หน้า 166-170

สุรบดินทร์ แดงดอน, อภิชัย สุยะพันธ์, กองพันธ์ อารีรักษ์. (2568). การออกแบบตัวควบคุม โหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม*, ปีที่ 18 ฉบับที่ 2, หน้า 132-143.

Date of publication xxxx 00, 0000, date of current version xxxx 00, 0000.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2024.Doi Number

Stability Investigation of an AC-DC Power System feeding a Buck Converter Controlled by Sliding Mode Controller

SURABADIN DAENGDON¹, APICHAH SUYAPAN², KONGPAN AREERAK¹, (Member, IEEE), AND JAKKRIT PAKDEETO³

¹School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand

³Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800, Thailand

Corresponding author: Apichai Suyapan (apichai.suyapa@kmutt.ac.th)

This work is funded by the National Research Council of Thailand (NRCT) under Grant N42A670152, and was supported in part by the King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thailand, and in part by the Suranaree University of Technology (SUT), Thailand.

ABSTRACT Power converters are a highly important technology for power systems in electric vehicles (EVs), as well as in the generation and utilization of renewable energy. However, controlled power converters behave as constant power loads which directly affect the stability of the system. Therefore, this article presents stability investigation of an AC-DC power system feeding a buck converter controlled by a sliding mode controller. The stability analysis is conducted using the eigenvalue theorem and based on a system mathematical model derived through a combination of the DQ and the generalized state-space averaging methods. The theoretical analysis is verified through simulation on MATLAB/SIMULINK, hardware-in-the-loop (HIL), and experimental testing. The results demonstrate that the considered system exhibits instability due to the constant power load effect, which aligns with the theoretical predictions. In addition, the variation of DC-link filter parameters directly impacts the system stability. The resulting results provide useful insights for avoiding system operation at the unstable point and for designing the filter when the system stability is considered. Furthermore, this study serves as a foundation for future research.

INDEX TERMS Small-Signal Stability Analysis, AC-DC Power System, Buck Converter, Sliding Mode Controller, Mathematical Model

I. INTRODUCTION

In the present and future, environmental concerns regarding carbon dioxide emissions have significantly increased the demand for clean energy sources. As a result, electrical energy, which is considered a clean form of energy, has gained much attention. Consequently, power electronics, especially power converters, have become essential technologies. The power converters are widely used to convert and control electrical energy to suitable the requirements of various systems. One major application is in electric vehicle power systems, including electric cars, electric trains, submarines, and aircraft. The power converters play a key role in converting power from energy sources such as batteries or other sources into suitable for system loads. They also control the speed of electric motors for acceleration, braking, and speed regulation in driving

systems [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]. Moreover, the power converters are crucial in the production and utilization of renewable energy such as solar, wind, and hydropower [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]. These converters require controllers to ensure the output signal meets the desired specifications. However, when the power converters are controlled, they behave as constant power loads (CPLs) that exhibit negative impedance characteristics for the overall system. When the CPLs are connected to the power system through a filter circuit, their negative impedance reduces the damping ratio of the filter. This can cause the instability of the electrical system. The instability can damage the overall of the power system or degrade the control performance [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25]. Therefore, it is necessary to analyze the stability of systems that include the controlled

power converters. This can help to predict and avoid the operating of the system at unstable points. Therefore, this article presents the stability investigation of an AC-DC power system feeding a buck converter controlled by sliding mode controller (SMC). The AC-DC power system using a three-phase bridge rectifier is considered because it is commonly used in renewable energy applications at this moment, such as wind and hydro turbines to generate the electricity [26], [27], [28], [29], [30], [31]. It is also found in electric vehicle architectures, including the electrical power systems of electric cars, electric trains, submarines, aircraft, and battery charging systems for electric vehicles [32], [33], [34], [35]. For this study, the buck converter controlled by the SMC behaves as a CPL, which directly affects system stability. Therefore, the stability investigation aims to predict the unstable points and investigate the effects of DC-link filter parameter changes on the system stability. The stability analysis is based on the eigenvalue theorem using a mathematical model derived through a combination of the DQ and generalized state-space averaging methods. The stability results are verified through the simulation on MATLAB/SIMULINK, HIL, and experiment in the laboratory. All results are consistent and confirm that the system instability is caused by the constant power load effect. Moreover, the variation of the DC-link filter parameters also directly impacts the system stability. The study results are useful for avoiding the operation at the unstable points and can use for designing the filter in terms of the system stability.

The key contributions of the article are the stability analysis based on a resulting mathematical model of a three-phase bridge rectifier feeding a buck converter controlled by SMC and including the design of the SMC for the considered system has not yet been published in existing literature. Moreover, this study also fills a research gap

related to system stability in EVs and renewable energy systems.

This article is structured as follows. In Section II, a considered AC-DC power system is explained. Section III presents the derivation of mathematical model and the SMC design. The stability analysis and the effects of the DC-link variation are investigated in Section IV. The validation results and discussions are addressed in Section V. Finally, Section VI gives conclusions and suggestions for future research.

II. A CONSIDERED AC-DC POWER SYSTEM

The AC-DC power system considered in this article is illustrated in Figure 1. The system consists of five main parts. Part 1 is a balanced three-phase AC power source, which generates balanced three-phase AC electricity. Part 2 is a power transmission line that delivers the AC power to the Part 3 which is a three-phase bridge rectifier, that converts the AC signals into DC signals. Part 4 is a DC-link filter, which smooths and stabilizes the DC output from the rectifier. Part 5 is a buck converter that regulates the output voltage using the SMC. In general, buck converters are commonly regulated using PI controllers due to their simplicity in design and effectiveness in reducing steady-state error. However, PI controllers exhibit certain limitations, particularly in scenarios requiring fast dynamic response, where their performance may be inadequate [36], [37]. For this reason, the SMC is chosen in this study because it can provide fast dynamic response, allowing the system to reach steady-state quickly without steady-state error. The system exhibits robustness, ensuring continuous control performance even in the presence of external disturbances or system parameter variations [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45]. The buck converter, whether controlled by the SMC or other controllers, behaves as a CPL.

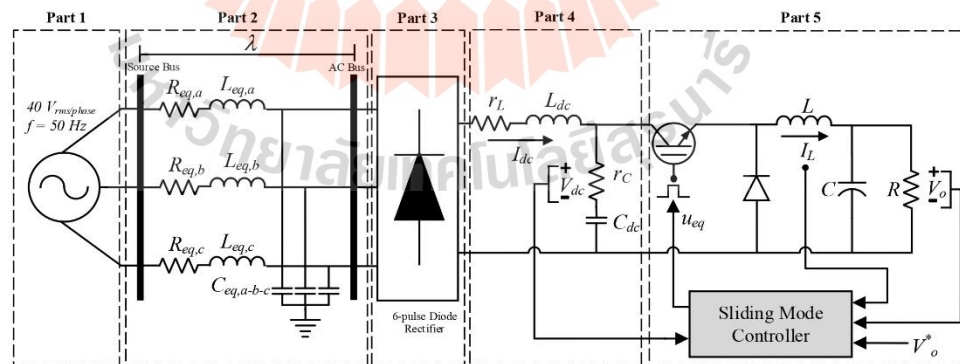


FIGURE 1. Considered AC-DC power system feeding a controlled buck converter.

The characteristics of the CPL are illustrated in Figure 2, where an increase in load current leads to a decrease in load voltage, and vice versa, in order to maintain constant power. This inverse behavior results in negative impedance, which reduces the positive damping of the filter circuit. As a result, the CPL behavior can cause the system instability. Therefore, the stability analysis of the considered power system is very important.

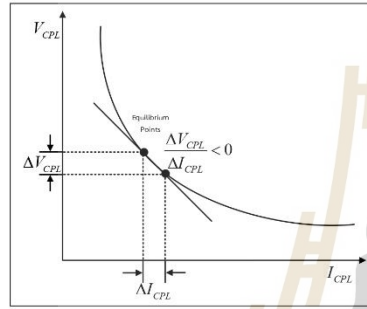


FIGURE 2. Characteristic of CPLs

III. DERIVATION OF MATHEMATICAL MODEL

For stability analysis of the considered power system, it is necessary to derive a system mathematical model. In this article, the model is derived using a combination of the DQ and the generalized state-space averaging (GSSA) methods. These methods can provide a time-invariant model which is suitable for the stability study. The DQ method is applied to eliminate the effects of the diode switching behavior of the three-phase bridge rectifier [46]. Meanwhile, the GSSA method is used to eliminate the switching effects of the buck converter [47]–[48]. The model derivation begins by considering the system without the controller. In this case, the SMC as shown in the gray area in Figure 1 is not taken into account at this stage. The derivation is based on the following assumptions: the power converter operates in continuous conduction mode (CCM). The overlap angle is less than 60 degrees and harmonics in the system are neglected.

For the mathematical model derivation, the considered power system can be divided into five parts. Each part is briefly described as follows:

A. A balanced three-phase AC source

The balanced three-phase AC source in the DQ rotating frame is represented by (1) [49], [50], [51].

$$\begin{cases} V_{sd} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda + \phi - \phi_1) \\ V_{sq} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda + \phi - \phi_1) \end{cases} \quad (1)$$

where V_m is the peak value of the phase voltage, λ is the phase shift angle between the source bus and the AC voltage bus, ϕ is the phase angle at the AC voltage bus, and ϕ_1 is the angular position of the DQ rotating frame.

B. Transmission line

The voltage drop across the power transmission line and the current flowing through the transmission line in the DQ rotating frame, are expressed by (2) and (3), respectively [49], [50], [51].

$$\begin{cases} \Delta V_{bus,d} = R_{eq} I_d + L_{eq} \frac{d}{dt} I_d - \omega L_{eq} I_q \\ \Delta V_{bus,q} = R_{eq} I_q + L_{eq} \frac{d}{dt} I_q + \omega L_{eq} I_d \end{cases} \quad (2)$$

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

where R_{eq} , L_{eq} , and C_{eq} represent the resistance, inductance, and capacitance of the transmission line, respectively. While, ω is the angular frequency of the power source.

C. A three phase bridge rectifier

The three-phase bridge rectifier consists of six diodes. After applying the DQ method, the three-phase diode bridge rectifier can be represented as a transformer in the DQ rotating frame. The transformer ratios, here are S_d and S_q can be given in (4). In addition, the relationships between the input and output voltages and currents of the rectifier are expressed in (5) and (6), respectively [49], [50], [51].

$$\begin{cases} S_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \sin(\phi - \phi_1) \\ S_q = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cos(\phi - \phi_1) \end{cases} \quad (4)$$

$$E_{dc,1} = S_d V_{bus,d} + S_q V_{bus,q} \quad (5)$$

where $E_{dc,1}$ is the output voltage of the rectifier excluding the effect of the overlap angle.

$$\begin{cases} I_{m,d} = S_d I_{dc} \\ I_{m,q} = S_q I_{dc} \end{cases} \quad (6)$$

where I_{dc} is the output current of the three-phase bridge rectifier

D. Open loop control of buck converter

In this section, the buck converter without the controller is considered. This means that, the sliding mode controller as shown in the gray area of Figure 1 is not yet included in the analysis. After applying the GSSA method to eliminate the switching effects, a time-invariant model of the buck converter can be obtained in (7) [49], [50], [51], where d is the duty cycle of the converter.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{dc}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} d \quad (7)$$

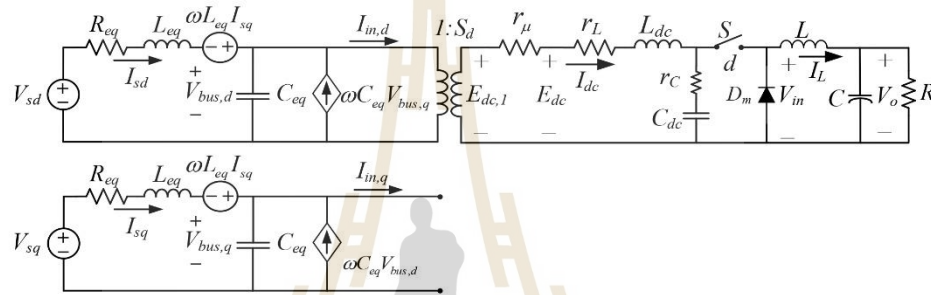


FIGURE 3. Equivalent circuit in the DQ rotating frame of the considered power system without the controller.

To simplify the model, the angular position of the DQ rotating frame is set equal to the phase angle at the AC voltage bus ($\phi_1 - \phi$) resulting in $S_q = 0$ and $I_{m,q} = 0$. This condition eliminates the q -axis components of the three-phase bridge rectifier. Therefore, the considered power system without the controller can be simplified into an equivalent circuit on the DQ rotating frame as shown in Figure 3. By applying the Kirchhoff's laws to analyze the equivalent circuit, a mathematical model of the system is expressed by (8).

$$\begin{cases} \dot{I}_d = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_d + \omega I_q - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_q = -\omega I_d - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_q - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_d - \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_q - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_C d}{L_{dc}} I_L \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{d}{C_{dc}} I_L \\ \dot{I}_L = \frac{d}{L} V_{dc} - \frac{1}{L} V_o \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \end{cases} \quad (8)$$

E. SMC

For the considered system, the buck converter is used to regulate the output voltage by using a SMC as shown in the gray area in Figure 1. In this article, the sliding surface equation of the controller is defined as a linear combination of the system's state variables as presented in (9) [52], [53].

$$S = ae_1 + be_2 + ce_3 \quad (9)$$

where e_1 is the current error, e_2 is the voltage error, and e_3 is the integral of the sum of e_1 and e_2 which contributes to improving the system performance by ensuring zero steady-state error. The e_1 , e_2 , and e_3 can be defined in (10), (11), and (12), respectively.

$$e_1 = I_L^* - I_L \quad (10)$$

$$e_2 = V_o^* - V_o \quad (11)$$

$$e_3 = \int (e_1 + e_2) dt \quad (12)$$

where I_L^* is the reference inductor current which is calculated from $K(V_o^* - V_o)$, I_L is the inductor current of the buck converter, V_o^* is the reference output voltage and V_o is the output voltage of the buck converter.

Considering the sliding surface equation from (9) to (12), together with the mathematical model of the buck converter

in (7), and assuming the system is under control and has reached the steady state, the output voltage of the buck converter will achieve the reference voltage. This means that the system operates along the sliding surface defined by the sliding equation. As a result, the value of the sliding surface becomes zero ($S=0$) as shown in (13). Based on this relationship, the derivative of the sliding surface equation also becomes zero ($\dot{S}=0$) as shown in (14) [52], [53].

$$S = [-a-b] \begin{bmatrix} I_L \\ V_o \end{bmatrix} - aK(V_o) + m \left[(K+1)(V_o^* - V_o) - I_L \right] dt = 0 \quad (13)$$

$$\dot{S} = [-a-b] \begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_o \end{bmatrix} - aK(\dot{V}_o) + m \left[(K+1)(V_o^* - V_o) - I_L \right] = 0 \quad (14)$$

Referring to (7) and (14), after setting $u_{eq} = d$, the control equation of the SMC for the considered power system can be obtained. This equation can be shown in (15), where a, b, m , and K are the parameters of the SMC.

$$u_{eq} = \frac{V_o}{V_{dc}} \alpha - \frac{I_L}{V_{dc}} \beta + \frac{V_o^*}{V_{dc}} \gamma \quad (15)$$

$$\text{where } \alpha = \frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC},$$

$$\beta = \frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC},$$

$$\gamma = \frac{mRLC(K+1)}{aRC}$$

Therefore, after substituting d in the uncontrolled system model in (8) with u_{eq} from (15), a time-invariant mathematical model of the considered AC-DC power system shown in Figure 1 can be expressed in (16) and it is suitable for stability investigation.

IV. STABILITY INVESTIGATION

This section presents the stability analysis to predict the unstable point of the system. It also includes the analysis of the DC-link parameter variations affect the system stability. The analysis is based on the linear system theory using the eigenvalue theorem. It is noticed that the mathematical model of the considered system given in (16) is nonlinear. After applying the linearization technique using the first-order Taylor's series, a resulting of linear or small-signal model for the considered system is obtained in (17). For this model, $A(x_0, u_0)$, $B(x_0, u_0)$, $C(x_0, u_0)$, and $D(x_0, u_0)$ are the Jacobian matrices of the system as detailed in the appendix. Their values depend on the state variables x_0 and the input variables u_0 .

$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{eq}} V_{bus,d} - \frac{(r_a + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} \\ + \frac{r_C I_L V_o^*}{V_{dc}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRCL_{dc}} \right) - \frac{r_C^2 I_L}{V_{dc}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRCL_{dc}} \right) \\ + \frac{r_C V_o I_L}{V_{dc}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRCL_{dc}} \right) \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{V_o I_L}{V_{dc}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRCC_{dc}} \right) \\ + \frac{I_L^2}{V_{dc}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRCC_{dc}} \right) - \frac{I_L V_o^*}{V_{dc}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRCC_{dc}} \right) \\ \dot{I}_L = V_o \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRCL} \right) \\ - I_L \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRCL} \right) + V_o^* \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRCC_{dc}} \right) - \frac{1}{L} V_o \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \delta \dot{x} = A(x_0, u_0) \delta x + B(x_0, u_0) \delta u \\ \delta \dot{y} = C(x_0, u_0) \delta x + D(x_0, u_0) \delta u \end{cases} \quad (17)$$

The stability analysis of the linearized system using the eigenvalue theorem can be investigated from the eigenvalues of the Jacobian matrix $A(x_0, u_0)$. The eigenvalues can be calculated from (18).

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (18)$$

where λ is the eigenvalues of the system

Therefore, the system is stable if the real parts of all eigenvalues are less than zero. This condition is expressed in (19).

$$\text{Re}(\lambda_i) < 0 \quad (19)$$

where $i=1,2,3,\dots,n$ (n is the number of the system state variables).

Based on the Jacobian matrix $A(x_0, u_0)$ and the system parameters specified in the appendix, the trajectory of the dominant eigenvalues of the considered system when the command output voltage of the buck converter increases from 33 V to 45 V can be obtained as shown in Figure 4. It can be observed that when the output voltage of the buck converter reaches 42 V, the power level of the constant power load (P_{CPL}) is equal to 176.4 W. The real part of the dominant eigenvalue becomes greater than zero at this point, which means it lies in the right half of the s-plane. Therefore, the considered power system becomes unstable when the P_{CPL} exceeds 176.4 W

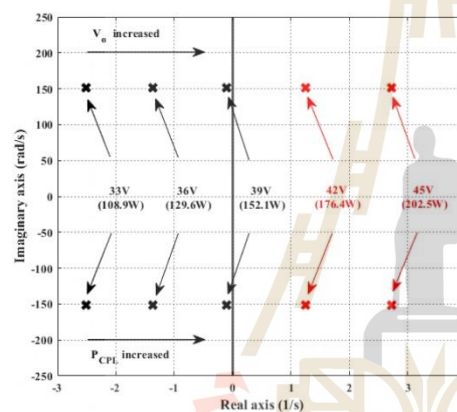


FIGURE 4. Dominant eigenvalues of the system for the stability analysis.

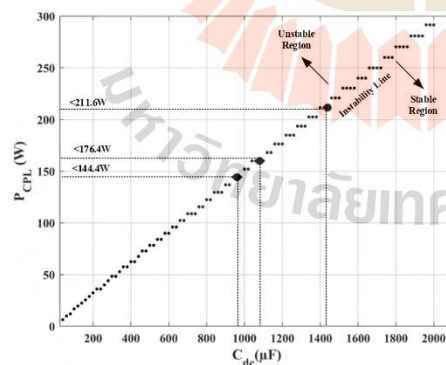


FIGURE 5. Effect on the system stability when the C_{dc} is varied.

As mentioned in the introduction section, the power systems are typically connected to CPLs through filter circuits. These filters can be designed or selected by engineers. Therefore, studying the effect of filter parameter variation on the system stability is important. It provides useful information for designing and selecting filters that take stability into account. The results of the stability analysis when the capacitance value of the DC-link filter (C_{dc}) is varied are shown with the instability line of Figure 5. It can be observed that when the C_{dc} are 940 μ F, 1051.55 μ F, and 1440 μ F, the system becomes unstable at the P_{CPL} equal to 129.6 W, 176.4 W, and 211.6 W, respectively. Therefore, it can be concluded that increasing of the C_{dc} improves the system stability.

The results of the stability analysis when the inductance of the DC-link filter (L_{dc}) is varied are shown as instability line in Figure 6. It can be seen that when the L_{dc} are 57 μ H, 40.78 μ H, and 21 μ H, the system becomes unstable when the CPL values are 115.6 W, 176.4 W, and 313.6 W, respectively. Therefore, it can be concluded that decreasing of the L_{dc} allows the system to operate with more stable. Engineers should be aware that increasing the L_{dc} filter to decrease ripple current may reduce the system's stability in terms of CPL effects. The validation of these analytical results will be presented in the next section.

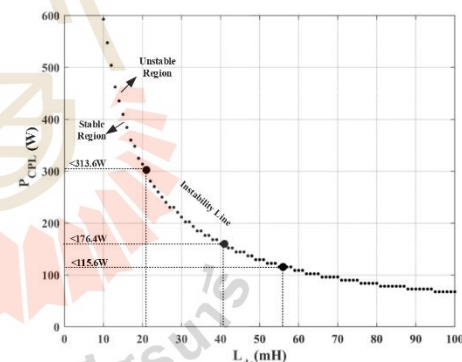


FIGURE 6. Effect on the system stability when the L_{dc} is varied.

V. VALIDATION OF RESULTS

The validation of the stability analysis results and the confirmation of the system stability in this study are carried out using three methods, here are the simulation using MATLAB/SIMULINK, hardware-in-the-loop (HIL) using MATLAB with a DSP eZdsp-TMF28335 board as shown in Figure 7, and the experimental testing of the considered power system using a test rig built in the laboratory as shown in Figure 8. In these tests, the SMC is programmed into the cZdsp-TMF28335 DSP board with the sampling frequency equal to 10 kHz

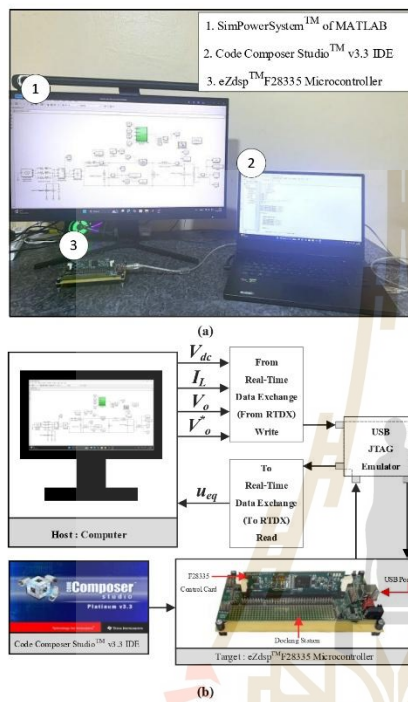


FIGURE 7. Hardware-in-the-Loop (HIL) simulation for the considered system. (a) Overview of the simulation setup. (b) Process diagram of simulation

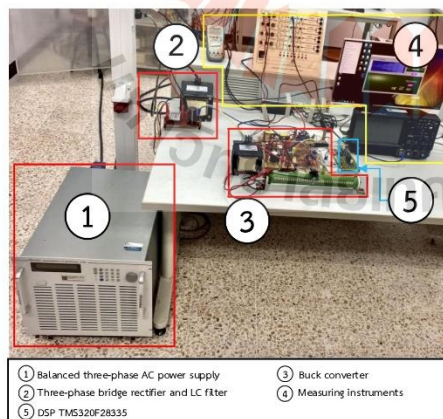


FIGURE 8. Experimental rig of the considered system in the laboratory.

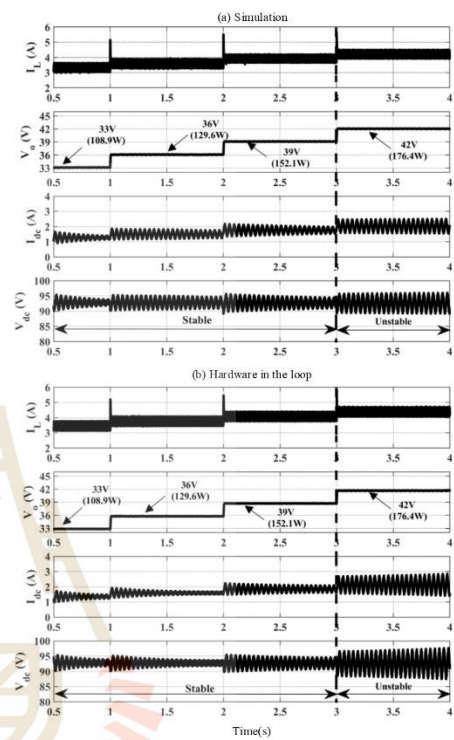


FIGURE 9. Instability results of the considered system via the simulation and HIL

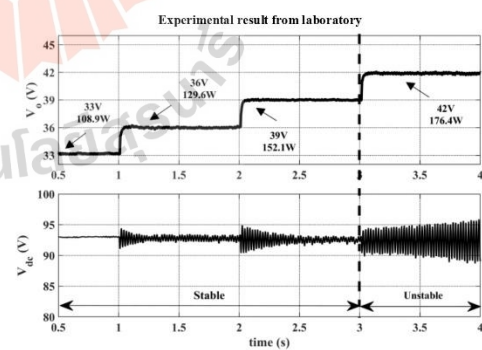


FIGURE 10. Instability results of the considered system via the experiment

The results from the simulation and the HIL confirming the system instability are shown in Figure 9, while the results from the experimental test are shown in Figure 10. From both figures, it can be observed that when the output voltage of the buck converter is increased to 42 V (corresponding to $P_{CPL} = 176.4$ W) at $t = 3$ s., the considered system becomes unstable. This instability is indicated by the increasing oscillations of the voltage across the DC-link filter (V_{dc}), which fails to settle to a steady-state value. The results are consistent with the theoretical analysis as presented in Figure 4, confirming that the instability of the considered system is caused by the CPL effect. The system becomes unstable when the P_{CPL} exceeds 176.4 W.

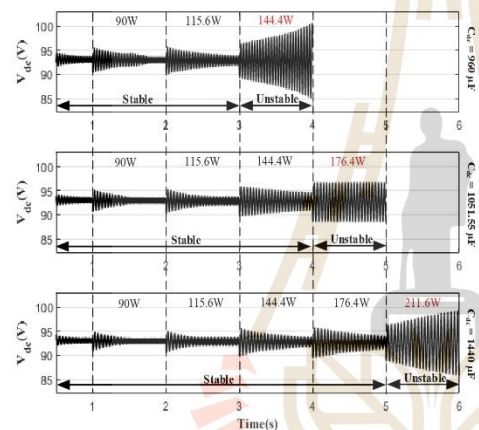


FIGURE 11. Simulation results when C_{dc} is varied

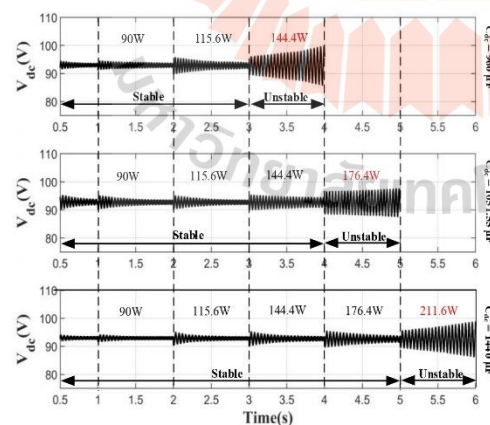


FIGURE 12. HIL results when C_{dc} is varied

The validation of the stability investigation when the parameter C_{dc} is varied through the simulation and the HIL can be shown in Figure 11 and Figure 12, respectively. It can be observed from both figures that in when C_{dc} is equal to 940 μ F, 1051.55 μ F, and 1440 μ F, the system becomes unstable at the P_{CPL} values of 129.6 W, 176.4 W, and 211.6 W, respectively. These results match the theoretical analysis previously presented in Figure 5. Therefore, it can be confirmed that increasing of the C_{dc} improves the stability of the system.

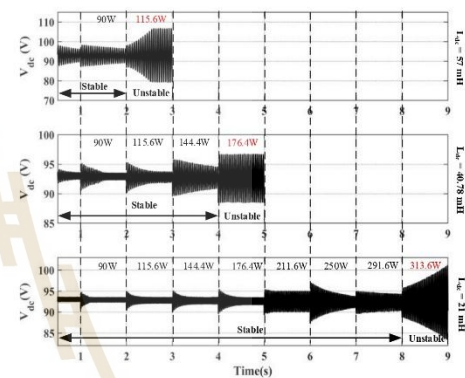


FIGURE 13. Simulation results when L_{dc} is varied

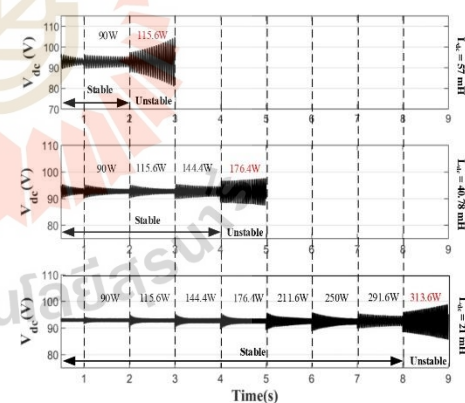


FIGURE 14. HIL results when L_{dc} is varied

Figure 13 and Figure 14 present the validation results of the stability investigation when the parameter L_{dc} is varied through the simulation and the HIL, respectively. It can be observed from both figures that when L_{dc} is set to 57 μ H, 40.78 μ H, and 21 μ H, the system becomes unstable at P_{CPL} values of 115.6 W, 176.4 W, and 313.6 W, respectively.

These results are consistent with the theoretical analysis as shown in Figure 6. Therefore, it can be confirmed that reducing of the L_{dc} increases the stability of the system.

According to the entire of the study results, it can be concluded that the proposed stability analysis and the investigation of the effects of DC-link filter parameter variations on the system stability can accurately predict the unstable point of the considered AC-DC power system. In addition, the results provide the useful information for engineers, especially in designing and selecting the filter circuits with proper consideration of system stability.

VI. CONCLUSION

This article presents a stability investigation of an AC-DC power system feeding a buck converter controlled by a SMC. The stability analysis using the eigenvalue theorem is based on the mathematical model derived from a combination of the DQ and GSSA methods. The analysis results are validated through three approaches, the simulation using MATLAB/SIMULINK, the HIL, and the experimentation in the laboratory. The proposed model accurately predicts the instability of the considered system caused by the CPLs effect. Additionally, the investigation for the variation of the filter parameters effect on the system stability indicates that increasing the capacitance of the filter or decreasing the inductance of the filter enhances the system stability. These findings provide valuable insights that can help avoid system operation at the unstable points and guide the design and selection of filter circuits when the system stability due to CPLs is taken into account. However, the stability analysis alone cannot restore stability once the system becomes unstable. In most cases, the instability occurs before reaching the rated power of the system. Therefore, the future research should focus on instability mitigation or stabilization methods that not only prevent instability but also allow the system to operate up to its full power level.

APPENDIX A

$$A(s_0, u_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & \omega & \frac{1}{L_a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega & \frac{R_a}{L_a} & 0 & \frac{1}{L_a} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_a} & 0 & 0 & 0 & \omega & \frac{2\sqrt{2}}{\pi C_a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_a} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2\sqrt{2}}{\pi L_a} & 0 & \frac{(r_c - r_c + r_c)}{L_a} & a(5,6) & a(5,7) & a(5,8) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_a} & a(6,6) & a(6,7) & a(6,8) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,7) & a(7,8) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$$

$$a(5,6) = -\frac{1}{L_a} \frac{r_c V_{a,0}}{L_a V_{a,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) + \frac{r_c I_{L,0}}{L_a V_{a,0}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) - \frac{r_c V_{a,0}}{L_a V_{a,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(5,7) = \frac{r_c V_{a,0}}{L_a V_{a,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) - \frac{2I_{L,0}}{L_a V_{a,0}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) - \frac{r_c V_{a,0}}{L_a V_{a,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(5,8) = -\frac{r_c I_{L,0}}{L_a V_{a,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,6) = \frac{V_{a,0} I_{L,0}}{C_a V_{a,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) - \frac{I_{L,0}^2}{L_a V_{a,0}^2} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) + \frac{V_{a,0} I_{L,0}}{L_a V_{a,0}^2} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,7) = -\frac{V_{a,0}}{C_a V_{a,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right) + \frac{2I_{L,0}}{C_a V_{a,0}} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right) + \frac{V_{a,0}}{C_a V_{a,0}} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right)$$

$$a(6,8) = -\frac{I_{L,0}}{C_a V_{a,0}} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right)$$

$$a(7,7) = \frac{1}{L} \left(\frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \right)$$

$$a(7,8) = -\frac{1}{L} \left(\frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \right)$$

$$B(s_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2} \cos(\lambda_1)}{L_a} & 0 \\ \frac{\sqrt{2} \sin(\lambda_1)}{L_a} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_c I_{L,0}}{L_a V_{a,0}} \left(\frac{mRLC(K-1)}{aRC} \right) \\ 0 & \frac{r_c I_{L,0}}{L_a V_{a,0}} \left(\frac{aRC(K+1)}{aRC} \right) \\ 0 & \frac{1}{L} \left(\frac{mRLC(K+1)}{aRC} \right) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C(s_0, u_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D(s_0, u_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

APPENDIX B

CONSIDERED SYSTEM PARAMETERS		
SYMBOL	VALUES	DESCRIPTIONS
V_s	40 $V_{rms, phase}$	Three-phase AC voltage source
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	Frequency of three-phase AC voltage source
R_{eq}	0.0956 Ω	Resistance of transmission line
L_{eq}	142.45 μ H	Inductance of transmission line
C_{eq}	2 nF	Capacitance of transmission line
r_L	0.2 Ω	Inner resistance of DC-link filter inductor
L_{dc}	40.78 mH	Inductance of DC-link filter
r_C	0.28 Ω	Inner resistance of DC-link filter capacitor
C_{dc}	1051.55 μ F	Capacitance of DC-link filter
L	15 mH	Inductance of buck converter
C	1000 μ F	Capacitance of buck converter
R	10 Ω	Resistive load of buck converter
f_s	10 kHz	Switching frequency of buck converter
a	8.2575	Parameters of sliding mode controller
b	79.5011	
m	4918	
K	49596	

REFERENCES

- [1] A. Chub, G. Buticchi, V. Sidorov and D. Vinnikov, "Zero-Redundancy Fault-Tolerant Resonant Dual Active Bridge Converter for More Electric Aircrafts," 2022 IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Kiel, Germany, 2022, pp. 1-6.
- [2] F. A. Khera, C. Gerada, S. Bozhko and P. W. Wheeler, "AC/DC Converter Topologies Comparison for More Electric Aircraft Applications," 2022 IEEE 7th Southern Power Electronics Conference (SPEC), Nadi, Fiji, 2022, pp. 1-6.

- [3] R. Carmona, A. Stowhas-Villa, C. A. Rojas, H. Renaudineau and J. Marin, "High Power Density Electric Vehicle Powertrain Based on a T-Type DAB Partial Power DC-DC Converter," *2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP)*, Florianopolis, Brazil, 2023, pp. 1-6.
- [4] Y. Zhu, X. Yan, Z. Wang, T. Yang, S. Bozhko and P. Wheeler, "Half-Bridge-Active-Clamp Converter with High Step-down Capabilities for More Electric Aircraft Applications," *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Brussels, Belgium, 2022, pp. 1-6.
- [5] S. Sahoo, K. Selvam, H. Dhiman and K. Shah, "Comparing On-Board Chargers and Quasi-Z-Source Converters for Integrated Charge Controller Applications in Electric Vehicles: An In-Depth Analysis," *2023 First International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computational Intelligence (ICAEECI)*, Tiruchengode, India, 2023, pp. 1-8.
- [6] B. Luckett and J. He, "Genetic Algorithm Enabled Multi-Objective Design Optimization of Power Converters for Electric Aircraft Propulsion," *2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Nashville, TN, USA, 2023, pp. 1836-1842.
- [7] F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, R. A. Hakimov, I. I. Yamalov and R. R. Urazbakhit, "Issues of Future Aircraft DC/DC Converters Design and Construction," *2023 9th International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics (EECR)*, Wuhan, China, 2023, pp. 1-5.
- [8] S. Deng, T. Lei, R. Li, H. Yu, X. Zhang and X. Zhang, "Research on Control Methods for Multi-Port Converters in Electric Aircraft," *2024 8th International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICOPESA)*, Hong Kong, Hong Kong, 2024, pp. 185-193.
- [9] K. P. and S. Prakash, "A Review of High Efficiency Power Converters for Electric Vehicles Applications," *2024 5th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESCS)*, Coimbatore, India, 2024, pp. 26-29.
- [10] K. Mohammad, M. Amir, M. F. Rashid, A. Rahman and M. Ahmad, "Analysis of various DC-DC Converter Control Schemes Fed with Solar PV for PMDC Motor Drive," *2022 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON)*, Kollam, India, 2022, pp. 1-6.
- [11] A. Guercio and D. Curto, "Estimation of the energy producibility of an offshore wave energy converter," *OCEANS 2022 - Chennai*, Chennai, India, 2022, pp. 1-5.
- [12] K. L. Lijin, S. Sheik Mohammed, P. P. Muhammed Shanir and L. K. Ilaw, "A Non-Isolated Two Input Single Output (TISO) DC-DC converter for Energy Storage Applications," *2022 International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST)*, Miri Sarawak, Malaysia, 2022, pp. 238-242.
- [13] S. R. Korada, R. Brinda and I. D. Soubache, "Analysis of Power Electronics Contribution to Electric Vehicles using Renewable Energy," *2023 International Conference on Data Science and Network Security (ICDSNS)*, Tiptur, India, 2023, pp. 1-6.
- [14] L. K. P. Alquiza, K. H. A. Recto, P. J. M. Loresco and J. Villalobos, "Comparative Assessment of Off-shore Wind Converters and Wave Energy Converters in the Philippines," *2023 IEEE 15th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, Coron, Palawan, Philippines, 2023, pp. 1-6.
- [15] N. Ahmed, M. T. Imran, Q. R. Hasnaine and S. Mahmud, "Comparative Performance Analysis Between DC-DC Multi-Input ZETA and Multi-Input SEPIC Converter for Hybrid Renewable Energy System," *2023 First International Conference on Cyber Physical Systems, Power Electronics and Electric Vehicles (ICPEEV)*, Hyderabad, India, 2023, pp. 1-6.
- [16] F. Alsokhry, "Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System Under Various Operating Conditions," *2024 IEEE 8th Energy Conference (ENERGYCON)*, Doha, Qatar, 2024, pp. 1-6.
- [17] Anita, J. Meher and K. Roy, "Comparative Analysis of High Gain DC-DC Boost Converter with Different Controllers," *2024 IEEE International Conference on Smart Power Control and Renewable Energy (ICSPCRE)*, Rourkela, India, 2024, pp. 1-6.
- [18] L. Liu, D. Wang, Y. Ni, K. Song, Y. Li and G. Sun, "Stability Control of Boost Converter with Constant Power Load by ABSMC," *2023 5th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES)*, Shenyang, China, 2023, pp. 18-23.
- [19] K. E. I. Marcillo et al., "Interval Robust Controller to Minimize Oscillations Effects Caused by Constant Power Load in a DC Multi-Converter Buck-Buck System," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 26324-26342, 2019.
- [20] Lorzadeh, I. Lorzadeh, M. N. Soltani and A. Hajizadeh, "A Novel Active Stabilizer Method for DC/DC Power Converter Systems Feeding Constant Power Loads," *2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Vancouver, BC, Canada, 2019.
- [21] B. Babaiahgari, Y. Jeong and J. -D. Park, "Stability Enhancement Method for DC Microgrids with Constant Power Loads using Variable Inductor," *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, New Orleans, LA, USA, 2020, pp. 2236-2240.
- [22] B. Babaiahgari, Y. Jeong and J. -D. Park, "Dynamic Control of Region of Attraction Using Variable Inductor for Stabilizing DC Microgrids With Constant Power Loads," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 10, pp. 10218-10228, Oct. 2021.
- [23] H. Zhang et al., "Robust Cooperative Predictive Control of DC Microgrids with Constant Power Loads," *2023 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE)*, Wuhan, China, 2023, pp. 1-6.
- [24] R. Zhang, J. Lei, X. Xiang, W. Li, X. He and R. Zhao, "A Negative Parallel Virtual RLC Damper for L-C-filtered Constant Power Load in DC Microgrid," *2021 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Haikou, China, 2021, pp. 1689-1694.
- [25] L. Liu, D. Wang, Y. Ni, K. Song, Y. Li and G. Sun, "Stability Control of Boost Converter with Constant Power Load by ABSMC," *2023 5th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES)*, Shenyang, China, 2023, pp. 18-23.
- [26] Y. E. Majeed, I. Ahmad and D. Habibi, "A Multiple-Input Cascaded DC-DC Converter for Very Small Wind Turbines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 6, pp. 4414-4423, June 2019.
- [27] N. Kumari, M. A. Kalam and V. Modi, "Analysis Of ANN Control With Buck Converter For Output Voltage Control Of Wind turbine For Battery Charging," *2022 IEEE 2nd International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (ISSSC)*, Gunupur, Odisha, India, 2022, pp. 1-5.
- [28] A. Zentani, A. Almaktoof, M. T. E. Kahn and M. K. Elmezzughi, "An Effectual Control Technique for Islanded Operation of a Step-Up Power Converter Fed by Small Wind Turbine System," *2022 International Conference on Electrical Engineering and Sustainable Technologies (ICEEST)*, Lahore, Pakistan, 2022, pp. 1-6.
- [29] X. Yuan, Y. Zhang and X. Peng, "Power Converter Technologies for 20MW Wind Turbines," *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, USA, 2022, pp. 1-8.
- [30] Y. Wang, Z. Fang, B. Zhang, Aisikaer, H. Lv and L. Song, "LFAC-DRU-HVDC Based Offshore Wind Power Delivery Solution," *2023 3rd International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS)*, Dali, China, 2023, pp. 999-1003.
- [31] H. Han et al., "Design of a Parallel All-DC Wind Power System With Turbine-Side Boost Based on a New DC Conversion," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 3054-3069, 2024.
- [32] U. Nayak, J. Chakraborty and A. K. Pati, "A Critical Review on Different DC-DC Converter and Charging Methods for EV Application," *2024 10th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, Chennai, India, 2024, pp. 1-6.
- [33] Sacco, P. Ladoux, S. Sanchez, B. Sonier and M. Hassan, "The Static Phase Converter. A Solution to Reinforce the Power Supply of 25 kV/ 50Hz Railway Lines," *2024 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Naples, Italy, 2024, pp. 1-6.
- [34] J. Fabre et al., "Characterization and Implementation of Resonant Isolated DC/DC Converters for Future MVdc Railway Electrification Systems," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 2, pp. 854-869.

- [35] R. Phosung, K. Areerak and K. Areerak, "Improvement in the Stability of DC Electrical Power Distribution Systems in More Electric Aircraft," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 100908-100920, 2024.
- [36] L. Lin et al., "Dual Natural Switching Surface Control for Multilevel Noninverting Buck-Boost Converter With Pulsed Power Loads," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 71, no. 9, pp. 10444-0454, Sept. 2024.
- [37] G. Kim and Y. Bak, "Improved Sliding Mode Control for Performance Enhancement of PMD Battery Charger Using Fuzzy Logic Control," in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 2080-2088, 2025.
- [38] Z. Wang, S. Li and Q. Li, "Discrete-Time Fast Terminal Sliding Mode Control Design for DC-DC Buck Converters With Mismatched Disturbances," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 2, pp. 1204-1213, Feb. 2020.
- [39] Y. Wang, W. Zhang and C. Xue, "Adaptive Continuous Sliding Mode Control of Buck Converters With Multidisturbances Based on Zero-Crossing Detection," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 72643-72657, 2022A. Harrison, private communication, May 1995.
- [40] W. Ning, L. Li and Y. Cao, "Research on Buck Converter with Improved Approach Rate Compound Sliding Mode Control Based on PSO," *2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, Shanghai, China, 2024, pp. 1064-1069.
- [41] N. Sethawong, K.-N. Areerak, P. Santiprapan, C. Panpean and K.-P. Areerak, "Gain Tuning Technique Based on Sliding Mode Control for Shunt Active Power Filter," *2022 International Electrical Engineering Congress (IEEECON)*, Khon Kaen, Thailand, 2022, pp. 1-4.
- [42] T. Boudra, A. Benheniche, F. Zebiri and Z. Bouchama, "Adaptive Control of a Buck Converter in Continuous Conduction Mode Using Sliding Mode Techniques," *2024 12th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, Batna, Algeria, 2024, pp. 137-142.
- [43] Q. Wu, S. Shen, K. Cheng and G. Tang, "Superspiral Sliding Mode Composite Control Strategy for Interleaved Parallel Buck Converter," *2024 4th International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS)*, Hangzhou, China, 2024, pp. 1103-1107.
- [44] X. Shen et al., "Finite-Time Sliding Mode Control for NPC Converters With Enhanced Disturbance Compensation," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 72, no. 4, pp. 1822-1831, April 2025.
- [45] X. Shen et al., "Fixed-Time Sliding Mode Control for NPC Converters With Improved Disturbance Rejection Performance," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2025, early access, doi:10.1109/TII.2025.3540481.
- [46] J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K.-N. Areerak and K.-P. Areerak, "Pole Placement Technique Optimized Gains by Adaptive Tabu Search for Instability Mitigation of AC-DC Power System Feeding a Controlled Buck Converter," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 107704-107718.
- [47] A. Sarwar, A. Shahid, A. Hudaif, U. Gupta and M. Wahab, "Generalized state-space model for an n-phase interleaved buck-boost converter," *2017 4th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics (UPCON)*, Mathura, India, 2017, pp. 62-67.
- [48] P. Azer and A. Emadi, "Generalized State Space Average Model for Multi-Phase Interleaved Buck, Boost and Buck-Boost DC-DC Converters: Transient, Steady-State and Switching Dynamics" in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 77735-77745, 2020.
- [49] 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," *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Cambridge, UK, 2008, pp. 19-24.
- [50] K.-N. Areerak, T. Sopapirm, S. Bozhko, C. I. Hill, A. Suyapan and K.-L. Areerak, "Adaptive Stabilization of Uncontrolled Rectifier Based AC-DC Power Systems Feeding Constant Power Loads," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 10, pp. 8927-8935, Oct. 2018.
- [51] R. Phosung, K.-P. Areerak, T. Sopapirm and K. Areerak, "Design and Optimization of Instability Mitigation for AC-DC Feeder Systems With Constant Power Loads Using Artificial Intelligence Techniques," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 5, pp. 5385-5397.
- [52] H. Komurcugil, S. Biricik and N. Guler, "Indirect Sliding Mode Control for DC-DC SEPIC Converters," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 6, pp. 4099-4108, June 2020.
- [53] C. A. Torres-Pinzón, F. Flores-Bahamonde, J. A. Garriga-Castillo, H. Valderrama-Blavi, R. Haroun and L. Martinez-Salamero, "Sliding-Mode Control of a Quadratic Buck Converter With Constant Power Load," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 71837-71852, 2022.



SURABADIN DAENGDON received the B.Eng (Hons) degree in electrical engineering from the Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, in 2022. Currently, he is pursuing the M.Eng. degree in electrical engineering. His main research interests include modeling, control, stability analysis, and stabilization of power electronic-based system.



APICHAI SUYAPAN received the B.Eng. (first-class honors), M.Eng., and Ph.D. degrees in electrical engineering from the Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2013, 2016, and 2021, respectively. From March 2019 to March 2020, he was a Visiting Student for conducting short-term research at the Institute for Aerospace Technology (IAT), University of Nottingham, Nottingham, U.K. In 2022, he was a Lecturer for the Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Bangkok, Thailand. Since December 2023, he has been a Lecturer for the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Bangkok, Thailand. His main research interests include stability studies of power systems with constant power loads, modeling and control of power electronic-based systems, control theory, and artificial intelligence applications.



KONGPAN AREERAK (Member, IEEE) obtained his B.Eng. and M.Eng. degrees in electrical engineering from the Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2000 and 2001, respectively. He subsequently received his Ph.D. degree in electrical engineering from the University of Nottingham, Nottingham, U.K., in 2009. In 2002, he served as a Lecturer in the Electrical and Electronic Department at Rangsit University, Thailand. Since 2003, he has been a Lecturer in the School of Electrical Engineering at SUT, where he is currently a Professor of Electrical Engineering. His research interests encompass system identifications, artificial intelligence applications, stability analysis of power systems with constant power loads, modeling and control of power electronic-based systems, and control theory.



Jakkrit Pakdeeto received B.Eng. (first-class honors), M.Eng., and Ph.D. degrees in electrical engineering from Suranaree University of Technology (SUT), Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2013, 2015 and 2019, respectively. In 2019, he was a researcher in Institute of research and development at SUT. Since 2020, he has been a lecturer in the department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology (KMUTNB), Thailand. He has received the Assistant Professor in Electrical Engineering in 2021. His main research interests include stability analysis, power electronics, AI applications, control theory and DC micro-grid systems.



การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักของระบบไฟฟ้ากำลัง เอชเป็นดีซี

The sliding mode controller design for buck converter fed by AC-DC power systems

สุรบัดินทร์ แดงดอน¹ กองพัน อารีรักษ์^{1*} อภิชัย สุธะพันธ์²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10140

Surabadin Daengdon¹ Kongpan Areerak^{1*} Apichai Suyapan²

¹ School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

* Corresponding author

E-mail: kongpan@sut.ac.th; Telephone: 0 4422 4520

วันที่รับบทความ 6 ธันวาคม 2567; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 2 กุมภาพันธ์ 2568; วันที่ตอบรับบทความ 5 กุมภาพันธ์ 2568

บทคัดย่อ

ตัวควบคุมพีไอเป็นตัวควบคุมที่ได้รับความนิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่บางครั้งอาจทำให้สมรรถนะของระบบไม่เป็นไปตามที่ต้องการเนื่องจากตัวควบคุมพีไออาจให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตของระบบที่ช้า เกิดการกวัดแกว่งของสัญญาณได้ง่าย อีกทั้งยังไม่มี ความคงทนต่อการรบกวนอีกด้วย ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซี ซึ่งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเป็นตัวควบคุมที่มีความคงทน อีกทั้งยังให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตของระบบที่รวดเร็ว โดยการออกแบบจะอาศัยวิธีการสุ่มค่าและเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนกับตัวควบคุมพีไอด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ผ่าน SimPowerSystemTM บนโปรแกรม MATLAB และผลจากชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนให้สมรรถนะการตอบสนองของระบบที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ โดยมีช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาที่เร็วที่สุดเร็วกว่า รวมถึงยังไม่ปรากฏการพุ่งต่ำและการพุ่งเกินอีกด้วย

คำสำคัญ

ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมพีไอ วงจรแปลงผันแบบบัก ระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซี

Abstract

The proportional-integral (PI) controllers are widely used in many applications. However, the system performance is occasionally undesired. The slowly dynamic response, the signal oscillation, and the vulnerability to disturbances can occur when the PI controller is applied. Therefore, this article presents the sliding mode controller (SMC) design for buck converter fed by AC-DC power systems. The SMC is considered because of its merit including the rapid dynamic response and robustness. The design process is based on a trial and error method. The intensive time-domain simulation using SimPowerSystemTM on MATLAB and the experimental rig built in the laboratory are used for the controller performance comparison between the SMC and PI controllers. The results show that the SMC can provide the system responses better than the PI controller in terms of rise time, settling time, undershoot, and overshoot.

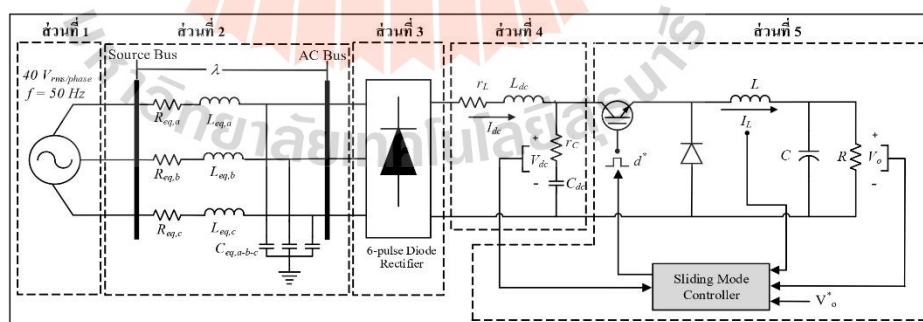
Keywords

sliding mode controller, PI controller, Buck converter, AC DC power system

1. บทนำ

ปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม (controlled power converter) ทั้งวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี เอซีเป็นดีซี และเอซีเป็นเอซี ได้ถูกนำมาใช้งานร่วมกับระบบต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ระบบควบคุมความเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า (electric vehicles : EVs) ระบบขับเคลื่อนของรถไฟไฟฟ้า (electric railway) ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น (more electric aircraft : MEA) และระบบแปลงผันกำลังสำหรับพลังงานทดแทน (renewable energy) เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมนิยมใช้ตัวควบคุมพื้นฐาน เช่น ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) [1-5] ที่มีข้อดีคือสามารถออกแบบได้ง่ายแม้ระบบจะมีความซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถลดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวได้อีกด้วย [5-6] อย่างไรก็ตามผลตอบสนองเชิงพลวัต (dynamic response) ของตัวควบคุมพีไอในบางครั้งยังปรากฏการพุ่งเกิน (overshoot) ที่สูง อีกทั้งยังมีช่วงเวลาขาขึ้น (rise time) และเวลาเข้าที่ (settling time) ที่นานอีกด้วย [7-8] ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาตัวควบคุมต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง โดยตัวควบคุมที่น่าสนใจคือ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่มีความคงทน

(robustness) ต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบและสิ่งรบกวนภายนอก (disturbance) อีกทั้งยังมีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็ว และปรากฏการพุ่งเกินที่ต่ำ ถึงแม้ว่าในบางครั้งอาจปรากฏการสั่น (chattering) ของสัญญาณ แต่สามารถออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยงเหตุการณ์นี้ได้ [9-19] ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี ซึ่งมีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดยจากงานวิจัยในอดีต พบว่าวงจรแปลงผันแบบบักส่วนใหญ่จะมีแหล่งจ่ายเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าคงที่ ในขณะที่แหล่งจ่ายที่พิจารณาในบทความนี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่คงที่ โดยจะมีค่าขึ้นอยู่กับการโหลดของระบบ ทำให้ต้องมีการนำเอาแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายดังกล่าวมาพิจารณาร่วมในการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งถือเป็นจุดเด่นของงานวิจัยในบทความนี้ การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจำเป็นต้องกำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อน (sliding surface equation) สำหรับใช้ในการควบคุม ซึ่งบทความนี้ได้กำหนดให้สมการพื้นผิวการเลื่อนเป็นแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ (linear combinations of the states) เนื่องจากสามารถพิจารณา



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัสได้ ทำให้ง่ายต่อการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม [20-23] อย่างไรก็ตามตัวควบคุมโหมดการเลื่อนยังไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ ดังนั้นบทความนี้จึงออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการสุ่มค่า (trial and error) และเพื่อเป็นการยืนยันว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอจึงได้ดำเนินการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างตัวควบคุมดังกล่าวทั้งสองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะมีผลการตอบสนองเชิงพลวัตของระบบที่ดีและรวดเร็ว โดยไม่พบการพุ่งเกินและพุ่งต่ำ (undershoot) อีกทั้งยังมีเวลาขึ้นและเวลาเข้าที่ที่น้อยกว่าเมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณาใช้ตัวควบคุมพีไอ ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ

บทความนี้ประกอบไปด้วย 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 บทนำ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่ 3 จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนโดยอาศัยวิธีการสุ่มค่าและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ส่วนที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมของระบบเมื่อมีการใช้ตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ และส่วนที่ 5 เป็นสรุปเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยต่อไปในอนาคต

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัสที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล ส่วนที่ 2 สายส่งกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสไปยังวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 วงจรเรียง

กระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่ 4 วงจรกรองสัญญาณดีซี (DC-Link filter) ทำหน้าที่กรองสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากส่วนที่ 3 ให้เรียบและคงที่มากขึ้น และส่วนที่ 5 วงจรแปลงผันแบบบัสที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแสดงดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	40 V _{rms}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
f	50 Hz	ความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
L_{eq}	142.45 μ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า
R_{eq}	0.0956 Ω	ความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า
L_{dc}	40.78 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_L	0.2 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
C_{dc}	1,051.55 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
r_C	0.28 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
L	15 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัส
C	1,000 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัส
R	10 Ω	โหลดความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัส
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัส

3. การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนแบบบล็อกสี่เหลี่ยมของรูปที่ 1 โดยการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนนั้นจำเป็นต้องกำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อน ซึ่งในบทความนี้ได้กำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อนเป็นแบบการรวมกันแบบเชิงเส้น

ของตัวแปรสถานะดังแสดงในสมการที่ (1) เนื่องจากสามารถนำมาพิจารณาพร้อมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบับได้ [20-23]

$$S = ae_1 + be_2 + me_3 \quad (1)$$

เมื่อ e_1 เป็นค่าความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้า e_2 เป็นค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้า และ e_3 เป็นค่าปริพันธ์ของผลรวม e_1 และ e_2 ดังแสดงในสมการที่ (2) สมการที่ (3) และสมการที่ (4) ตามลำดับ

$$e_1 = I_L^* - I_L \quad (2)$$

เมื่อ I_L^* คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำอ้างอิงคำนวณได้จาก $K(V_o^* - V_o)$ และ I_L คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบับ

$$e_2 = V_o^* - V_o \quad (3)$$

เมื่อ V_o^* คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกอ้างอิง และ V_o คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบับ

$$e_3 = \int (e_1 + e_2) dt \quad (4)$$

ดำเนินการแทนสมการที่ (2) ถึงสมการที่ (4) ลงในสมการที่ (1) จะได้สมการพื้นผิวการเคลื่อนแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะสำหรับวงจรแปลงผันแบบบับที่พิจารณา แสดงดังสมการที่ (5) ดังนี้

$$S = [-a-b] \begin{bmatrix} I_L \\ V_o \end{bmatrix} - aK(V_o) + m[(K+1)(V_o^* - V_o) - I_L] \quad (5)$$

เมื่อระบบมีการควบคุมและเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (steady state) ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบับจะเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง นั่นคือ ระบบจะเคลื่อนที่บนระนาบของพื้นผิวการเคลื่อนตามสมการพื้นผิวการเคลื่อนซึ่งทำให้ความสัมพันธ์ของสมการพื้นผิวการเคลื่อนเท่ากับศูนย์

($S = 0$) และอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเคลื่อนเท่ากับศูนย์ ($\dot{S} = 0$) [20-23] ดังนั้นเมื่อหาอนุพันธ์ของสมการที่ (5) จะได้สมการอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเคลื่อนแสดงดังสมการที่ (6) ดังนี้

$$[-a-b] \begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_o \end{bmatrix} - aK(\dot{V}_o) + m[(K+1)(V_o^* - V_o) - I_L] = 0 \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) จะพบว่า มีตัวแปร I_L และ $\dot{V}_o$ ปรากฏอยู่ในสมการ ซึ่งตัวแปรดังกล่าวคือ ตัวแปรสถานะในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบับซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ (7) [20-23] โดยที่ V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (input) ของวงจรแปลงผันแบบบับที่ได้มาจากแหล่งจ่ายที่เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ผ่านวงจรกรองสัญญาณดีซี ซึ่งจะมีค่าไม่คงที่และขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าของโหลดของวงจรแปลงผันแบบบับ และ $u(t)$ คือ สัญญาณการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (pulse width modulation : PWM) ที่จะได้มาจากตัวควบคุม

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1 \\ \frac{1}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{dc}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (7)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบับในสมการที่ (7) เป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร หากนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนดังกล่าว บทความนี้จึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method GSSA method) และอาศัยการประมาณค่าอันดับศูนย์เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบับที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time invariant model) [24-28] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมดังแสดงในสมการที่ (8)

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1 \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{dc}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} d \quad (8)$$

โดยที่ d คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการที่ (6) ร่วมกับสมการที่ (8) และกำหนดให้ $u_{eq} = d$ จะได้สมการของตัวควบคุมโหมตการเลื่อนสำหรับการควบคุมระบบไฟฟ้าที่พิจารณาแสดงได้ดังสมการที่ (9) ดังนี้

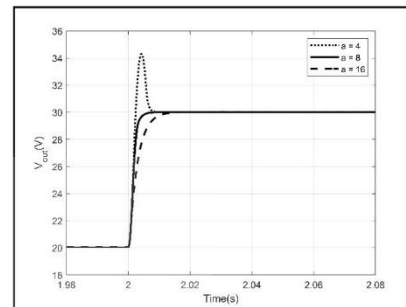
$$u_{eq} = \frac{V_o}{V_{dc}} \alpha - \frac{I_L}{V_{dc}} \beta + \frac{V_o^*}{V_{dc}} \gamma \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \alpha &= \frac{aRC + bL + aLK + mRLC(-K-1)}{aRC} \\ \beta &= \frac{bLR + aLKR + mRLC}{aRC} \\ \gamma &= \frac{mRLC(K+1)}{aRC} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (9) จะพบว่า R , L และ C เป็นค่าพารามิเตอร์ของระบบ V_{dc} , I_L และ V_o เป็นสัญญาณที่ต้องมีการวัด ในขณะที่พารามิเตอร์ a , b , m และ K เป็นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมตการเลื่อนที่จำเป็นต้องได้รับการออกแบบ แต่เนื่องจากยังไม่มีวิธีการทั่วไปในการออกแบบพารามิเตอร์ดังกล่าว ดังนั้นในบทความนี้จะออกแบบด้วยวิธีการสุ่มค่าดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ a

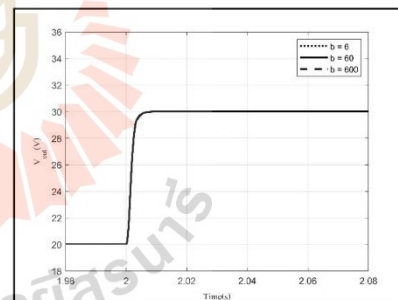
เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ a เป็น 4, 8 และ 16 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $b = 60$, $m = 6000$ และ $K = 4000$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม SIMULINK/MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า หากพารามิเตอร์ a มีค่าน้อยเกินไปจะส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบเกิดการพุ่งเกิน ในขณะที่ค่า a ที่มากเกินไปจะส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ช้า



รูปที่ 2 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ a

3.2 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ b

เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ b เป็น 6, 60 และ 600 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 8$, $m = 6000$ และ $K = 4000$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ b ไม่ส่งผลต่อสมรรถนะการตอบสนองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

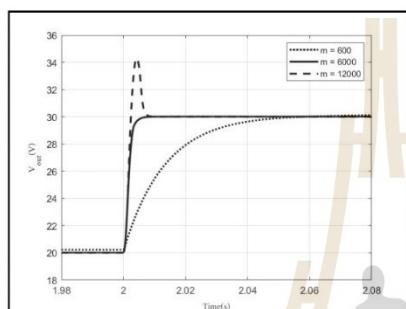


รูปที่ 3 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ b

3.3 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ m

เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ m เป็น 600, 6000 และ 12000 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 8$, $b = 60$ และ $K = 4000$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4 จากรูปจะพบว่า ถ้าพารามิเตอร์ m มีค่าน้อยเกินไปจะส่งผลให้ผลตอบสนอง

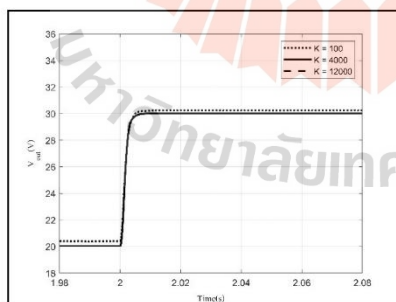
ของระบบเกิดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว อีกทั้งยังส่งผลให้เวลาขาขึ้นและเวลาเข้าที่ของระบบเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ในขณะที่ค่า m ที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการฟุ้งเกินของระบบ



รูปที่ 4 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ m

3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ K เป็น 100, 4000 และ 12000 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 8$, $b = 60$ และ $m = 6000$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า หากพารามิเตอร์ K มีค่าน้อยจนเกินไปจะส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบเกิดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว



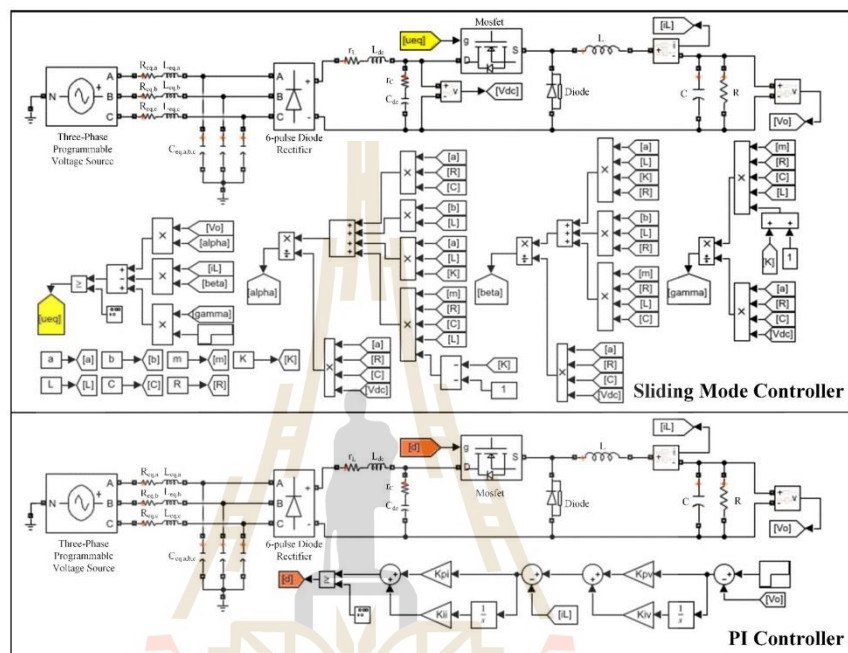
รูปที่ 5 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K

ดังนั้นจากการออกแบบและตรวจสอบสมรรถนะของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

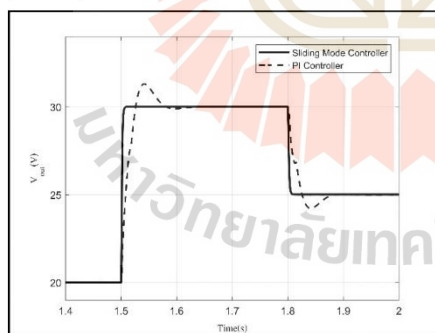
ดังรายละเอียดที่ได้นำเสนอไปข้างต้นจะพบว่า หากค่าของพารามิเตอร์ a , m และ K มากเกินไปหรือน้อยเกินไปอาจส่งผลให้สมรรถนะการควบคุมของระบบไม่ดี ในขณะที่พารามิเตอร์ b จะไม่ส่งผลต่อระบบ ดังนั้นจากผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้ บทความนี้จึงเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา คือ $a = 8$, $b = 60$, $m = 6000$ และ $K = 4000$ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะถูกใช้สำหรับการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดังที่จะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป

4. การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมระหว่างตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่นำเสนอและตัวควบคุมพื้นฐานและเป็นที่ยอมรับอย่างตัวควบคุมพีไอ โดยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสามารถออกแบบได้ด้วยวิธีการหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิด (closed-loop transfer function) และเทียบสัมประสิทธิ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบมาตรฐานของระบบอันดับสองดังรายละเอียดที่นำเสนอไว้ พอลัสเซปในภาคผนวก ซึ่งจะได้นำค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ คือ $K_{pv} = 0.1513$, $K_v = 15.7914$, $K_{pi} = 1.4102$, และ $K_{ii} = 632.9130$ โดยลำดับแรกจะเป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่อาศัย SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบที่พิจารณาแสดงได้ดังรูปที่ 6 และผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมผ่านการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 7 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า ผลตอบสนองของระบบที่พิจารณาเมื่อใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะมีช่วงเวลาขาขึ้น และเวลาเข้าที่ที่น้อยกว่าเมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณาใช้ตัวควบคุมพีไอ อีกทั้งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนยังไม่ปรากฏการฟุ้งเกินอีกด้วย ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะการควบคุมดีกว่าตัวควบคุมพีไอ โดยเมื่อคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์สมรรถนะที่ดีกว่าในแง่ของเปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกิน ช่วงเวลาขาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ เปอร์เซ็นต์การฟุ้งต่ำ และช่วงเวลาขาลง ได้เท่ากับ 100%, 92.3%, 99.3%, 100% และ 80% ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 2



รูปที่ 6 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของระบบที่พิจารณาโปรแกรม SIMULINK/MATLAB

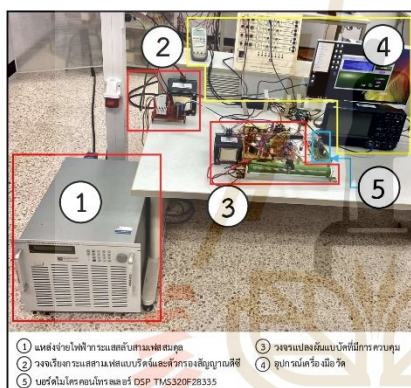


รูปที่ 7 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

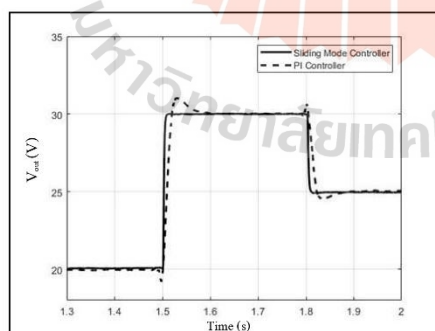
ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

	ตัวควบคุม โหมดการ- เลื่อน	ตัวควบคุมฟuzzy	เปอร์เซ็นต์ สมรรถนะ ที่ดีกว่า
เปอร์เซ็นต์ การพุ่งเกิน	0%	4.3%	100%
ช่วงเวลาขาขึ้น	0.001 วินาที	0.013 วินาที	92.3%
ช่วงเวลาเข้าที่	0.008 วินาที	1.23 วินาที	99.3%
เปอร์เซ็นต์ การพุ่งต่ำ	0%	2.68%	100%
ช่วงเวลาลง	0.001 วินาที	0.005 วินาที	80%

นอกจากการเปรียบเทียบและยืนยันผลผ่านการจำลอง-สถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แล้ว บทความนี้ยังได้นำเสนอผลจากชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการอีกด้วย โดยชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 8 ซึ่งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนและตัวควบคุมพีไอจะถูกโปรแกรมลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP TMS320F28335 โดยผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างตัวควบคุมโหมดการเลื่อนและตัวควบคุมพีไอของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาผ่านชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 ชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมผ่านชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 9 จะพบว่าเมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณา มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน จะใช้เวลาขาขึ้นและเวลาเข้าที่น้อยกว่าเมื่อระบบมีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ อีกทั้งตัวควบคุมโหมดการเลื่อนยังไม่ปรากฏการพุ่งเกินอีกด้วย ในขณะที่ผลตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอ จะปรากฏทั้งการพุ่งต่ำและการพุ่งเกิน โดยเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์สมรรถนะที่ดีกว่าในแง่ของเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินช่วงเวลาขาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ เปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำ และช่วงเวลาขาลงจะเท่ากับ 100%, 83.3%, 99.4%, 100% และ 75% ตามลำดับ ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 3 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอทั้งในแง่ของเวลาขาขึ้น เวลาเข้าที่ การพุ่งต่ำและการพุ่งเกิน และผลที่ได้จากชุดทดสอบเป็นการยืนยันได้อีกว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่นำเสนอสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมจากชุดทดสอบ

	ตัวควบคุมโหมดการ-เลื่อน	ตัวควบคุมพีไอ	เปอร์เซ็นต์สมรรถนะที่ดีกว่า
เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน	0%	3.87%	100%
ช่วงเวลาขาขึ้นวินาที	0.001	0.006	83.3%
ช่วงเวลาเข้าที่วินาที	0.007	1.13	99.4%
เปอร์เซ็นต์การพุ่งต่ำ	0%	1.36%	100%
ช่วงเวลาขาลงวินาที	0.001	0.004	75%

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัสของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซี โดยวงจรแปลงผันแบบบัสมีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าที่ไม่คงที่ ทำให้ต้องพิจารณาแรงดันไฟฟ้า

ดังกล่าวในการออกแบบและสร้างตัวควบคุมด้วย ซึ่งเป็นจุดเด่นของบทความนี้ เนื่องจากในอดีตวงจรแปลงผันแบบบัสจะมีแหล่งจ่ายที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าคงที่ สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนบทความนี้ได้อาศัยวิธีการสุ่มค่า พร้อมทั้งนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างการใช้อัตวควบคุมโหมดการเลื่อนกับตัวควบคุมพีไอ ผ่านการจำลองสถานการณ์ และผลจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลที่ได้จากชุดทดสอบมีความสอดคล้องกัน โดยแสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการใช้อัตวควบคุมโหมดการเลื่อนจะมีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ดีและรวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอ ทั้งในแง่ของช่วงเวลาขึ้นช่วงเวลาเข้าที่ การพุ่งต่ำ และการพุ่งเกิน แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่นำเสนอยังใช้วิธีการสุ่มค่าประกอบกับยังไม่มีวิธีการทั่วไปในการออกแบบ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตจะเป็นการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence : AI) มาประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน เพื่อให้มีสมรรถนะการควบคุมที่ดีที่สุดและสามารถให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตที่ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมทั้งอำนวยความสะดวกด้านสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อการทำวิจัย

ภาคผนวก

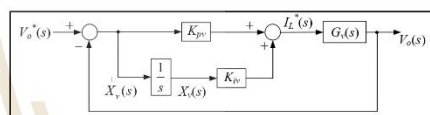
ตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในบทความนี้เป็นตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียง (cascade PI controller) โดยมีรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นรูปภายในและรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นรูปภายนอก ซึ่งการออกแบบค่าพารามิเตอร์ได้อาศัยวิธีการแบบดั้งเดิม โดยเป็นวิธีการหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดและเทียบสัมประสิทธิ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบมาตรฐานของระบบอันดับสองดังสมการที่ (10) เนื่องจากมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่าย และไม่ซับซ้อน [28]

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

โดยมีรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 ส่วน ซึ่งอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

1) ส่วนการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออก

แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดของส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัสแสดงได้ดังรูปที่ 10 ซึ่งจากรูปจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_v(s)$ ได้ดังสมการที่ (11)



รูปที่ 10 แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดของส่วนควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออก

$$G_v(s) = \frac{V_o(s)}{I_L(s)} = \frac{R}{sRC + 1} \quad (11)$$

ดังนั้นจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ดังสมการที่ (12) ดังนี้

$$T_v(s) = \frac{\left(\frac{K_{pv}s + K_{pi}}{C} \right)}{s^2 + \left(\frac{K_{pv}R + 1}{RC} \right)s + \left(\frac{K_{iv}}{C} \right)} \quad (12)$$

เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวหารของ $T_v(s)$ ในสมการที่ (12) กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบมาตรฐานของระบบอันดับสองในสมการที่ (10) ดังนั้น จะได้พารามิเตอร์สำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกดังแสดงในสมการที่ (13) และสมการที่ (14)

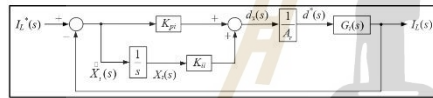
$$K_{pv} = \frac{2\zeta_v \omega_m RC - 1}{R} \quad (13)$$

$$K_{iv} = \omega_m^2 C \quad (14)$$

โดยที่ ω_m คือ ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของรูปแรงดันไฟฟ้า, ζ_v คือ อัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) ของรูปแรงดันไฟฟ้า

2) ส่วนการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ

แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดของส่วนควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัสแสดงได้ดังรูปที่ 11 ซึ่งจากรูปจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_i(s)$ ได้ดังสมการที่ (15)



รูปที่ 11 แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิดของส่วนควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ

$$G_i(s) = \frac{I_L(s)}{d(s)} = \frac{V_{dc}}{sL} \quad (15)$$

ดังนั้นจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดของรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำได้ดังสมการที่ (16)

$$T_i(s) = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{A_r L} \right) V_{dc}}{s^2 + \left(\frac{K_{pi} V_{dc}}{A_r L} \right) s + \left(\frac{K_{ii} V_{dc}}{A_r L} \right)} \quad (16)$$

เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวหารของ $T_i(s)$ ในสมการที่ (16) กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบมาตรฐานของระบบอันดับสองในสมการที่ (10) ดังนั้นจะได้พารามิเตอร์สำหรับการ

ควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำดังสมการที่ (17) และสมการที่ (18) ดังนี้

$$K_{pi} = \frac{2\zeta_i \omega_{ni} A_r L}{V_{dc}} \quad (17)$$

$$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 A_r L}{V_{dc}} \quad (18)$$

โดยที่ ω_{ni} คือ ความถี่ธรรมชาติของรูปกระแสไฟฟ้า, ζ_i คือ อัตราส่วนการหน่วงของรูปกระแสไฟฟ้า และ A_r คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยม

ดังนั้นสำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในส่วนของรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าจะดำเนินการออกแบบผ่านสมการที่ (13) และสมการที่ (14) ในขณะที่รูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าจะดำเนินการออกแบบผ่านสมการที่ (17) และสมการที่ (18) เมื่อกำหนดให้ $\zeta_v = 1$, $\zeta_i = 0.7$, $\omega_{nv} = 40\pi$ rad/s และ $\omega_{ni} = 200\pi$ rad/s และ $A_r = 10$ ซึ่งค่าดังกล่าวจะสามารถออกแบบได้จากค่าเวลาขาขึ้น (T_r) เท่ากับ 0.032 วินาที และค่าเวลาเข้าที่ (T_s) เท่ากับ 0.016 วินาที และกำหนดให้ ω_{ni} มีค่าเท่ากับ 5 เท่าของค่า ω_{nv} ดังนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เอดิงที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sridhar HS, Devaiah KS. Modelling and analysis of Voltage Mode control (VMC) of Buck Converter using P, PI, PID Controller. In: *2024 International Conference on Smart Systems for applications in Electrical Sciences (ICSSES)*. Tumakuru, India; 2024. p. 1-5.
- [2] Gaurav K, Upadhyaya S, Ashutosh, Joshi D. Enhanced gain double - output boost/buck DC-DC converter. In: *2024 15th International Conference on Computing Communication and*

- Networking Technologies (ICCCNT)*. Kamand, India; 2024. p. 1-6.
- [3] Yegon P, Singh M. Comparison of control strategies PI, FOPID, and ANFIS controllers in EV system for microgrid interactive system. In: *2024 IEEE Third International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. Delhi, India; 2024. p. 274-279.
- [4] Wang S, Juan L, Zhang L, Li S. Cascade sliding mode control based on extended state observer method for a DC-DC buck converter. In: *2021 40th Chinese Control Conference (CCC)*. Shanghai, China; 2021. p. 2366-2371.
- [5] Vishnu K, Nema RK, Ojha A. Boost converter with fuzzy logic, PI controller and sliding mode control for a variable source input. In: *2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE)*. Keonjhar, India; 2020. p. 1-5.
- [6] Tarik MN, Biswas SP, Mondal S, Nahin NI, Paul AK, Haque SS. A robust PI-Lag compensator for DC-DC buck converter fed DC motor drives. In: *2023 6th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)*. Khulna, Bangladesh; 2023. p. 1-6.
- [7] Lin L, Zhu Z, Liu Y, Li Z, Wang L, Ma F, et al. Dual natural switching surface control for multilevel noninverting Buck-Boost converter with pulsed power loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2024;71(9): 10444-10454.
- [8] Zehra S, Kansara AP. A combination of the SMC controller with the PI controller for brushless DC motor speed control. In: *2024 International Conference on Electrical Electronics and Computing Technologies (ICEECT)*. Greater Noida, India; 2024. p. 1-5.
- [9] Singh AP, Ahmad AU, Sahay K. Sliding mode control for dc microgrid powered by solar PV, fuel cell and energy storage system with pulsating loads. In: *2024 IEEE Third International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. Delhi, India; 2024. p. 583-588.
- [10] Gao H, Chen X, Ge L, Ma X. Regenerative braking energy recovery based on modified sliding mode control for DC/DC converter of high-speed railways system. In: *2024 5th International Conference on Electronic Communication and Artificial Intelligence (ICECAI)*. Shenzhen, China; 2024. p. 231-235.
- [11] Hosseini A, Hosseinnataj S, Adabi J. Bidirectional diso DC-DC converter based on fixed-frequency sliding mode control strategy. In: *2024 32nd International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Tehran, Iran, Islamic Republic of; 2024. p. 1-5.
- [12] Azimi M, Asadi M, Zakipour A. Second-order sliding mode control for DC-DC buck converter with input voltage ripple elimination. In: *2024 32nd International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Tehran, Iran, Islamic Republic of; 2024. p. 1-5.
- [13] Mhamdi I, Abbas M. Sliding mode control of a buck-boost converter connecting photovoltaic systems to microgrids. In: *2024 IEEE International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)*. Hammamet, Tunisia; 2024. p. 1-5.
- [14] Liu X, Hou S, Fang M. A Simple seamless switching strategy for four-switch buck-boost converter. In: *2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia)*. Chengdu, China; 2024. p. 2711-2715.
- [15] Prakash AC, Bajpai SS, Mohan V, SK K. A modular multilevel derived converter with a robust and dynamic sliding mode control for electric vehicles. In: *2024 IEEE 4th International Conference on VLSI Systems, Architecture,*

- Technology and Applications (VLSI SATA)*. Bangalore, India; 2024. p. 1-6.
- [16] Ning W, Li L, Cao Y. Research on buck converter with improved approach rate compound sliding mode control based on PSO. In: *2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. Shanghai, China; 2024. p.1064-1069.
- [17] Azimi M, Asadi M, Zakipour A. Second-order sliding mode control for DC-DC buck converter with input voltage ripple elimination. In: *2024 32nd International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Tehran, Iran, Islamic of Republic; 2024: p.1-5.
- [18] Lesniewski P, Jaskuta M. Sliding mode control for perturbed nonlinear systems with state and control signal constraints. *Energies*. 2023;16(14): p.1-12.
- [19] Setthawong N, Areerak K, Santiprapan P, Panpean C, Areerak K. gain tuning technique based on sliding mode control for shunt active power filter. In: *2022 International Electrical Engineering Congress (IEEECON)*. Khon Kaen, Thailand; 2022. p. 1-4.
- [20] Mao T, Li L, Cao Y. Sliding mode control of synchronous Buck converter based on variable speed reaching law. In: *2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. Shanghai, China; 2024. p. 1058-1063.
- [21] Ning W, Li L, Cao Y. Research on buck converter with improved approach rate compound sliding mode control based on PSO. In: *2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. Shanghai, China; 2024. p. 1064-1069.
- [22] อภิชัย สุยะพันธ์, สุรบดินทร์ แดงดอน, กองพันธ์ อารีรักษ์. การออกแบบตัวควบคุมใหม่ลดการเลือนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัสที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์. ใน: *การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 16 (ECTI-CARD)*. สุรินทร์, ประเทศไทย; 2567, หน้า 166-170
- [23] Mouslim S, Jenkal S, Imodane B, Ajaamoun M, Oubella M. Simulation and analyses of Buck converter using SMC with two control techniques. In: *2022 International Conference on Microelectronics (ICM)*. Casablanca, Morocco; 2022. p. 185-188.
- [24] Pakdeeto J, Thanommuang A, Areerak K, Areerak K. Pole placement technique optimized gains by adaptive Tabu search for instability mitigation of AC-DC power system feeding a controlled buck converter. *IEEE Access*. 2024;12: 107704-107718.
- [25] Phosung R, Areerak K, Sopapirm T, Areerak K. Design and optimization of instability mitigation for ac-dc feeder systems with constant power loads using artificial intelligence techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2022;37(5): 5385-5397.
- [26] Gowda MC, Savitha PB. Average current control of buck-boost converter. In: *2022 IEEE 9th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*. Prayagraj, India; 2022. p. 1-5.
- [27] Azer P, Emadi A. Generalized state space average model for multi-phase interleaved buck, boost and Buck-Boost DC-DC converters: transient, steady-state and switching dynamics. *IEEE Access*. 2020;8: 77735-77745.
- [28] Pakdeeto J, Thanommuang A, Chaicharoendomrung K, Areerak K, Areerak K. The effect of parameter variations of system stability for AC-DC power system feeding controlled buck converter. In: *2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*. Nakhon Ratchasima, Thailand; 2021. p. 61-64.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ครั้งที่ 16

16th ECTI-CARD 2024, Surin, Thailand

การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัก ที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

The Design of Sliding Mode Control for Buck Converter Connected to Three-Phase Bridge Rectifier

อภิชัย สุยะพันธุ์¹ สุรบดินทร์ แดงดอน² กองพัน อารีรัตน์^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี *Corresponding author : kongpan@sut.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุม (Regulated Power Converter) ได้ถูกนำมาใช้งานร่วมกับระบบต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย โดยตัวควบคุมที่นิยมใช้จะเป็นตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ซึ่งในบางครั้งอาจจะให้สมรรถนะผลตอบสนองของระบบไม่เป็นไปตามที่ต้องการ รวมถึงไม่มีความทนต่อสิ่งรบกวน ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (Sliding Mode Control) สำหรับวงจรแปลงผันแบบบักที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดยการออกแบบจะใช้วิธีการสุ่มค่า (Trial and Error) ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน และการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ใน SimPowerSystemTM บน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB พร้อมทั้งนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมเมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนกับตัวควบคุมพีไอ ซึ่งจากการตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอทั้งในแง่ของช่วงเวลารับ (Rise Time) ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time) และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Percent Overshoot)

คำสำคัญ: ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ตัวควบคุมพีไอ วงจรแปลงผันแบบบัก

Abstract

Currently, power converters controlled by PI controller are widely used in various systems. However, the PI controller cannot provide the desired system responses sometimes and it also lacks of the disturbance robustness. Therefore, this paper presents the design of sliding mode control for buck converter connected to three-phase bridge rectifier. The controller design is based on trial and error method. The simulation via SimPowerSystemTM on SIMULINK/MATLAB is used for the controller performance investigation. Additionally, the controller performance

comparison when the considered systems having the sliding mode control and the PI controller is also presented. The simulation results show that the proposed sliding mode control can provide the best output performance compared with the PI controller in terms of rise time, settling time, and percent overshoot.

Keywords: Sliding Mode Control, PI Controller, Buck Converter

1. บทนำ

ปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าถูกนำมาใช้งานร่วมกับระบบต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ระบบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในการควบคุมกระแสไฟฟ้าหรือความเร็วรอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้า หรือระบบควบคุมความเร็วของยานพาหนะไฟฟ้า (Electric Vehicles) ต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งจากระบบที่ได้ยกตัวอย่างมานั้น มักจะใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ เพื่อให้ได้สัญญาณขาออก (output) ตามที่ต้องการ ซึ่งตัวควบคุมพีไอเป็นที่นิยมใช้เนื่องจากเป็นตัวควบคุมพื้นฐานที่ออกแบบได้ง่าย และสามารถลดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (steady state error) ได้ แต่มีข้อเสียคือบางครั้งให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัต (dynamic response) ที่ช้าและไม่มีความทนต่อสิ่งรบกวน [1-2] จากงานวิจัยทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาแบบควบคุมอย่างต่อเนื่อง โดยตัวควบคุมที่ได้รับคามสนใจคือ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่สามารถใช้ได้กับทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็ว ส่งผลทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ไว นอกจากนี้ยังมีความทนทาน (robustness) ที่ทำให้ยังคงสมรรถนะการควบคุมได้แม้จะมีสัญญาณภายนอกมารบกวนหรือพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง [2-4] ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งงานวิจัยในอดีตมีการนำเสนอเฉพาะตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ใช้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีค่าคงที่เท่านั้น [3-5] ในทางกลับกันวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์จะมีค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ไม่คงที่และขึ้นอยู่กับโหลด

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ครั้งที่ 16

16th ECTI-CARD 2024, Surin, Thailand

โดยการออกแบบจะกำหนดสมการพื้นผิวการเลื่อน (sliding surface equation) สำหรับการควบคุมเป็นแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ (linear combinations of the states) เนื่องจากง่ายต่อการออกแบบและการนำไปใช้งาน [5] ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังกล่าวจะออกแบบโดยอาศัยวิธีการสุ่มค่า จากนั้นจะทำการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุมใหม่โดยการเลื่อนที่แน่นอน พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมเมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการควบคุมด้วยตัวควบคุมใหม่การเคลื่อนที่ของตัวควบคุมที่ได้ออกโดยการจำลองสถานการณ์ใน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมใหม่การเคลื่อนที่ให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่ดีและรวดเร็ว คือ มีช่วงเวลาขึ้น ช่วงเวลาเข้าที่ และเปอร์เซ็นต์การฟุ้งเกิน ที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่ได้อีก จึงเป็นการยืนยันได้ว่า ตัวควบคุมใหม่การเคลื่อนที่มีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมที่ได้อีก

บทความนี้ประกอบด้วย 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 เป็นการอธิบายระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมใหม่การเคลื่อนที่ ส่วนที่ 4 แสดงผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์สำหรับการตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุม และส่วนที่ 5 เป็นสรุปผลเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยในอนาคต

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุลและสายส่งกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสไปยังวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 2 ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ มีหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่ 3 วงจรกรองสัญญาณดิซ ทำหน้าที่กรองสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากส่วนที่ 2 ให้เรียบและคงที่มากขึ้น และส่วนที่ 4 วงจรแปลงผันแบบบักที่มี การควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำด้วยตัวควบคุมใหม่การเคลื่อน

ซึ่งเป็นโพลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 สำหรับการออกแบบตัวควบคุมบทความนี้จะแสดงดังตารางที่ 1

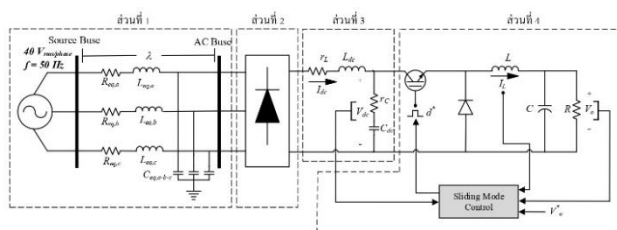
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า	หมายเหตุ
V_s	40 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
f	50 Hz	ความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
R_{eq}	0.0956 Ω	ความต้านทานของวงจรสมมูลสายส่ง
L_{eq}	142.45 μ H	ความเหนี่ยวนำของวงจรสมมูลสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของวงจรสมมูลสายส่ง
r_L	0.2756 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_{dc}	39.002 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_C	0.8327 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_{dc}	1052 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
L	15 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก
C	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัก
R	10 Ω	ความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัก
f_s	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก

3. การออกแบบตัวควบคุมใหม่การเคลื่อน

เมื่อพิจารณาวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมซึ่งแสดงในส่วนที่ 4 ของรูปที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักแสดงได้ดังสมการที่ (1) เมื่อ i_L คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัก, v_o คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัก, V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (input) ของวงจรแปลงผันแบบบัก, และ $u(t)$ คือ สัญญาณการสวิตช์แบบตีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation : PWM) ที่ได้จากตัวควบคุม [3-6]

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{dc}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (1)$$



รูปที่ 1 วงจรแปลงผันแบบบักที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ครั้งที่ 16

16th ECTI-CARD 2024, Surin, Thailand

การออกแบบตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนสำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบกึ่ง จินเป็นต้องกำหนดสมการพื้นผิวการเคลื่อน (S) โดยในบทความนี้ได้เลือกใช้สมการพื้นผิวการเคลื่อนเป็นแบบการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะที่อาศัยความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากง่ายต่อการออกแบบและการนำไปใช้งาน [5] ซึ่งสมการพื้นผิวการเคลื่อนดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2) ดังนี้

$$S = ae_1 + be_2 + me_3 \quad (2)$$

โดยที่ a , b และ m เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม ในขณะที่การกำหนดพื้นผิวของการเคลื่อนนั้นจะกำหนดให้ e_1 เป็นค่าความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้า e_2 เป็นค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้า และ e_3 เป็นค่าอินทิกรัลของความผิดพลาดของกระแสไฟฟ้ากับค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้า เพื่อช่วยในการปรับปรุงค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของระบบให้ต่ำลงยิ่งขึ้น [3] ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$\begin{cases} e_1 = i_{ref} - i_L \\ e_2 = V_o^* - v_o \\ e_3 = \int [e_1 + e_2] dt \end{cases} \quad (3)$$

โดยที่ $i_{ref} = K[V_o^* - v_o]$ ซึ่งพารามิเตอร์ K คือค่าอัตราขยายความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้า

ในสภาวะอยู่ตัวระบบจะเคลื่อนที่บนระนาบของพื้นผิวการเคลื่อนตามสมการพื้นผิวการเคลื่อน ซึ่งในอุดมคติเมื่อระบบเคลื่อนที่บนระนาบพื้นผิวการเคลื่อนจะมีความสัมพันธ์ของสมการพื้นผิวการเคลื่อนเท่ากับศูนย์ ($S = 0$) และอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเคลื่อนเท่ากับศูนย์ ($\dot{S} = 0$) ดังนั้นจึงทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะควบคุมซึ่งทำให้ค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์ ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบกึ่งที่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง เมื่อพิจารณาการหาอนุพันธ์สมการพื้นผิวการเคลื่อนดังสมการที่ (2) ร่วมกับสมการที่ (1) และสมการที่ (3) จะได้สมการอนุพันธ์ของสมการพื้นผิวการเคลื่อนดังสมการที่ (4) ดังนี้

$$\dot{S} = -\frac{aKi_L}{C} + \frac{aKv_o}{RC} + \frac{av_o}{L} - \frac{aV_o^*u(t)}{L} - \frac{bi_L}{C} + \frac{bV_o}{RC} + m[(K+1)(V_o^* - v_o) - i_L] \quad (4)$$

การคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุม (u_{eq}) จะพิจารณาจากเงื่อนไขการเข้าสู่สภาวะควบคุมจากสมการพื้นผิวการเคลื่อน คือ $\dot{S} = 0$ และ $u(t) = u_{eq}$ ซึ่งจะได้อสมการสำหรับการสร้างสัญญาณ PWM ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบกึ่งด้วยตัวควบคุม

โหมดการเคลื่อนดังสมการที่ (5) ซึ่งจากสมการจะพบว่าพารามิเตอร์ a , b , m และ K เป็นค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โหมดการเคลื่อนที่ต้องการออกแบบ โดยในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป นอกจากนี้การนำตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนมาใช้กับระบบเอชเป็นดีซีจินเป็นต้องมีการวัดค่าแรงดันบัสไฟตรง (V_{dc}) เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ u_{eq} ตามสมการที่ (5) ซึ่งถ้าเป็นระบบดีซีเป็นดีซีค่า V_{dc} สามารถกำหนดให้เป็นค่าคงที่ได้

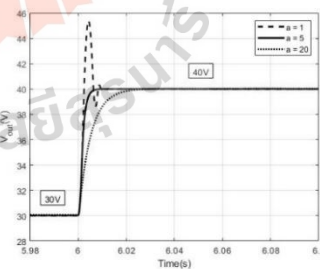
$$u_{eq} = \frac{aRCv_o - bL(Ri_L - v_o) - aLK(Ri_L - v_o) + mRLC[(K+1)(V_o^* - v_o) - i_L]}{aRCV_{dc}} \quad (5)$$

4. การตรวจสอบสมรรถนะของตัวควบคุม

จากสมการที่ (5) จะสังเกตได้ว่า ตัวควบคุมโหมดการเคลื่อนที่นำเสนอประกอบด้วยพารามิเตอร์ a , b , m และ K ซึ่งในบทความนี้ได้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวโดยใช้วิธีการสุ่มค่าและทำการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์บน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

• การออกแบบค่าพารามิเตอร์ a

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ a เป็น 1, 5 และ 20 โดยค่าพารามิเตอร์ $b = 40$, $m = 4000$ และ $K = 2000$ ผลการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า หากพารามิเตอร์ a มีค่ามากจะทำให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตของระบบมีแนวโน้มทำให้การพุ่งเกินลดลง ในขณะที่ช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ a

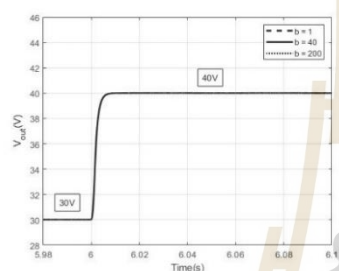
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ครั้งที่ 16

16th ECTI-CARD 2024, Surin, Thailand

• การออกแบบค่าพารามิเตอร์ b

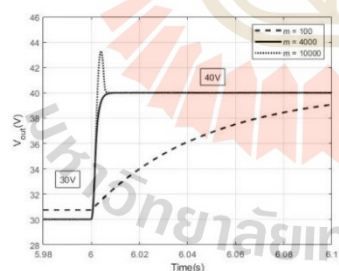
เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ b เป็น 1, 40 และ 200 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 5$, $m = 4000$ และ $K = 2000$ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ b ไม่มีผลต่อการตอบสนองเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 3 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ b

• การออกแบบค่าพารามิเตอร์ m

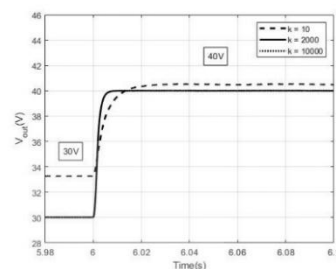
เมื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ m เป็น 100, 4000 และ 10000 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 5$, $b = 40$ และ $K = 2000$ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ m ที่มากจะทำให้การพุ่งเกินมีค่าลดลง ในขณะที่ช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ จะมันวามเพิ่มขึ้น แต่ค่าพารามิเตอร์ m ที่น้อยเกินไปจะส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว



รูปที่ 4 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ m

• การออกแบบค่าพารามิเตอร์ K

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ K เป็น 10, 2000 และ 10000 โดยคงค่าพารามิเตอร์ $a = 5$, $b = 40$ และ $m = 4000$ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า พารามิเตอร์ K ที่มีค่าน้อยจะส่งผลให้เกิดค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเพิ่มมากขึ้น

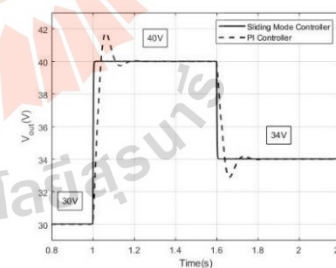


รูปที่ 5 ผลการออกแบบค่าพารามิเตอร์ K

จากการออกแบบและตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุม ดังรายละเอียดที่ได้นำเสนอไปข้างต้น ดังนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมใหม่สำหรับการเคลื่อนสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา คือ $a = 5$, $b = 40$, $m = 4000$ และ $K = 2000$

• การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม

ในบทความนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของการควบคุมเมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการควบคุมด้วยตัวควบคุมใหม่และการเคลื่อนที่นำเสนอกับตัวควบคุมพีไอ โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ คือ $K_{pv} = 0.0257$, $K_{iv} = 3.9478$, $K_{pi} = 4.0824$, และ $K_{ii} = 2565$ ซึ่งสามารถออกแบบได้ดังรายละเอียดที่นำเสนอไว้ในภาคผนวก ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5 ดังนี้



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม

จากรูปที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมโดยได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงจาก 30 V ไปเป็น 40 V และจาก 40 V มาเป็น 34 V ที่เวลา 1 วินาทีและ 1.6 วินาที ตามลำดับ ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่า ผลการตอบสนองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมี

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ครั้งที่ 16

16th ECTI-CARD 2024, Surin, Thailand

ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะมีเวลาขึ้นเท่ากับ 0.00222 วินาที เวลาเข้าที่ 0.01788 วินาที และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 0% ในขณะที่ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีตัวควบคุมฟีด จะมีความถี่ขึ้น 0.0204 วินาที เวลาเข้าที่ 0.2 วินาที และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 4.57% จึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ได้นำเสนอให้ผลการตอบสนองของระบบที่ดีกว่าตัวควบคุมฟีดทั้งในแง่ของเวลาขึ้น เวลาเข้าที่ และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัสที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบกริด โดยการออกแบบได้อาศัยวิธีการสุ่มค่า พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมและได้เปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟีดผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะมีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ดีและรวดเร็วกว่าตัวควบคุมฟีด ทั้งในแง่ของช่วงเวลารับ ช่วงเวลาเข้าที่ และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน แต่อย่างไรก็ตาม การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่นำเสนอ ยังใช้วิธีการสุ่มค่า รวมถึงไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตจะเป็นการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) มาประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าว เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบที่ดีที่สุด

ภาคผนวก

การออกแบบตัวควบคุมฟีดในบทความนี้อาศัยวิธีการแบบดั้งเดิมเนื่องจากมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่าย โดยการออกแบบตัวควบคุมฟีดของวงจรแปลงผันแบบบัส ซึ่งมีการควบคุม 2 ลูป คือ ลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าเพื่อเป็นอุปควบคุมภายใน และลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นอุปควบคุมภายนอก ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟีดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6) และสมการที่ (7) [6-7] ซึ่งเมื่อกำหนดให้อัตราส่วนการหน่วงของลูปแรงดันไฟฟ้า (ζ_v) มีค่าเท่ากับ 1 อัตราส่วนการหน่วงของลูปกระแสไฟฟ้า (ζ_i) มีค่าเท่ากับ 0.7 ความถี่ธรรมชาติของลูปแรงดันไฟฟ้า (ω_{nv}) มีค่าเท่ากับ 20π rad/s และความถี่ธรรมชาติของลูปกระแสไฟฟ้า (ω_{ni}) มีค่าเท่ากับ 400π rad/s จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟีดดังที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4

$$K_{pv} = \frac{2\zeta_v \omega_{nv} RC - 1}{R}, \quad K_{iv} = \omega_{nv}^2 C \quad (6)$$

$$K_{pi} = \frac{2\zeta_i \omega_{ni} A_r L}{V_{dc}}, \quad K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 A_r L}{V_{dc}} \quad (7)$$

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Mohanty, A. Choudhury, S. Pati, S. K. Kar and S. Khatua, "A comparative analysis between a single loop PI, double loop PI and Sliding Mode Control structure for a buck converter", 2021 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODICON), Bhubaneswar, India, pp. 1-6., 2021.
- [2] P. Joshi and S. Seshagiri, "Comparative Analysis of Sliding Mode Designs for DC-DC Converters," 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Chicago, IL, USA, pp. 538-543., 2020.
- [3] Aseem, K & Selva, Kumar, "Sliding Mode Controller for DC to DC converters and Performance Comparison with Conventional PID and FOPID Controllers", Journal of Engineering Science and Technology Review. vol. 13, no. 4, pp. 162-172, 2022.
- [4] Y. Wang, W. Xiong, W. Zhang and J. Ning, "Sliding Mode Control of Parallel DC/DC Converters", IECN 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, Singapore, pp. 1-6., 2023
- [5] สจิด ชลสิทธิ์จำเริญ (2556), แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัสที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [6] อธิสา อนอมมิ่ง (2565), การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอชเป็นดีซี ที่มีโหมดการแปลงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวางโพส, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [7] K. Areerak, T. Sopapim, S. Bozhko, C. I. Hill, A. Suyapan and K. Areerak, "Adaptive Stabilization of Uncontrolled Rectifier Based AC-DC Power Systems Feeding Constant Power Loads", in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 10, pp. 8927-8935, Oct. 2018.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ครั้งที่ 16

16th ECTI-CARD 2024, Surin, Thailand

ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะมีเวลาขึ้นเท่ากับ 0.00222 วินาที เวลาเข้าที่ 0.01788 วินาที และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 0% ในขณะที่ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีตัวควบคุมฟีด จะมีความชัน 0.0204 วินาที เวลาเข้าที่ 0.2 วินาที และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน 4.57% จึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ได้นำเสนอให้ผลการตอบสนองของระบบที่ดีกว่าตัวควบคุมฟีดทั้งในแง่ของเวลาขึ้น เวลาเข้าที่ และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัสที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบกริด โดยการออกแบบได้อาศัยวิธีการสุ่มค่า พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบสมรรถนะของการควบคุมและได้เปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟีดผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะมีผลตอบสนองเชิงพลวัตที่ดีและรวดเร็วกว่าตัวควบคุมฟีด ทั้งในแง่ของช่วงเวลารับ ช่วงเวลาเข้าที่ และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน แต่อย่างไรก็ตาม การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่นำเสนอ ยังใช้วิธีการสุ่มค่า รวมถึงไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตจะเป็นการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) มาประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าว เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของระบบที่ดีที่สุด

ภาคผนวก

การออกแบบตัวควบคุมฟีดในบทความนี้อาศัยวิธีการแบบดั้งเดิม เนื่องจากมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่าย โดยการออกแบบตัวควบคุมฟีดของวงจรแปลงผันแบบบัส ซึ่งมีการควบคุม 2 ลูป คือ ลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าเพื่อเป็นอุปควบคุมภายใน และลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นอุปควบคุมภายนอก ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟีดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6) และสมการที่ (7) [6-7] ซึ่งเมื่อกำหนดให้อัตราส่วนการหน่วงของลูปแรงดันไฟฟ้า (ζ_v) มีค่าเท่ากับ 1 อัตราส่วนการหน่วงของลูปกระแสไฟฟ้า (ζ_i) มีค่าเท่ากับ 0.7 ความถี่ธรรมชาติของลูปแรงดันไฟฟ้า (ω_{nv}) มีค่าเท่ากับ 20π rad/s และความถี่ธรรมชาติของลูปกระแสไฟฟ้า (ω_{ni}) มีค่าเท่ากับ 400π rad/s จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟีดดังที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4

$$K_{pv} = \frac{2\zeta_v \omega_{nv} RC - 1}{R}, \quad K_{iv} = \omega_{nv}^2 C \quad (6)$$

$$K_{pi} = \frac{2\zeta_i \omega_{ni} A_r L}{V_{dc}}, \quad K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 A_r L}{V_{dc}} \quad (7)$$

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Mohanty, A. Choudhury, S. Pati, S. K. Kar and S. Khatua, "A comparative analysis between a single loop PI, double loop PI and Sliding Mode Control structure for a buck converter", 2021 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODICON), Bhubaneswar, India, pp. 1-6., 2021.
- [2] P. Joshi and S. Seshagiri, "Comparative Analysis of Sliding Mode Designs for DC-DC Converters," 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Chicago, IL, USA, pp. 538-543., 2020.
- [3] Aseem, K & Selva, Kumar, "Sliding Mode Controller for DC to DC converters and Performance Comparison with Conventional PID and FOPID Controllers", Journal of Engineering Science and Technology Review. vol. 13, no. 4, pp. 162-172, 2022.
- [4] Y. Wang, W. Xiong, W. Zhang and J. Ning, "Sliding Mode Control of Parallel DC/DC Converters", IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, Singapore, pp. 1-6., 2023
- [5] สจิด ชลสิทธิ์จำเริญ (2556), แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัสที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [6] อธิสา อนอมมิ่ง (2565), การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้เทคนิคที่มีโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการวางโพลา, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [7] K. Areerak, T. Sopapim, S. Bozhko, C. I. Hill, A. Suyapan and K. Areerak, "Adaptive Stabilization of Uncontrolled Rectifier Based AC-DC Power Systems Feeding Constant Power Loads", in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 10, pp. 8927-8935, Oct. 2018.

ภาคผนวก ข

โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณ
มุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



```

*****
                                โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและ
                                การคำนวณมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
*****

%กำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบ
Vs=40;
f=50;
Req=0.0956;
Leq=142.45e-6;
rL=0.2;
ru=(3*Leq*2*pi*f)/pi;
R=10;
Pload=(Vo^2)/R;
Ptotal=Pload;
Z=sqrt(Req^2+(2*pi*f*Leq)^2);
Gamma=atand((2*pi*f*Leq)/Req);
Vbus(1)=40;
Lambda(1)=0;
es=1e-10;
k=1;
vo = (3*sqrt(3)*Vs*sqrt(2)/pi)*d
P_Total = (vo^2)/R;
Q_Total = 0;
eaVbus = 1000;
ealambda = 1000;
es = 1e-10;
k=0;
eaVbus = 100;ealambda = 100;
es = 1e-10;
k=0;
while eaVbus>=es & ealambda>=es
    if k~=0
        du = Vs*cosd(r-lambda(k))/Z - 2*Vbus(k)*cosd(r)/Z;
        DU = Vbus(k)*Vs*sind(r-lambda(k))/Z;
        dv = Vs*sind(r-lambda(k))/Z - 2*Vbus(k)*sind(r)/Z;
        DV = -Vbus(k)*Vs*cosd(r-lambda(k))/Z;
    end
    % Update bus voltage and angle
    Vbus(k+1) = Vbus(k) + du;
    lambda(k+1) = lambda(k) + dv;
    k = k + 1;
end

```

```

Vbus(k+1) = Vbus(k)-(U*DV-V*DU)/(du*DV-DU*dv);
lambda(k+1) = lambda(k)-(V*du-U*dv)/(du*DV-DU*dv);
eaVbus = abs((Vbus(k+1)-Vbus(k))/Vbus(k+1))*100;
ealambda = abs((lambda(k+1)-lambda(k))/lambda(k+1))*100;
V_bus = Vbus(k+1);
L_degree = lambda(k+1);
A = Vs-V_bus*(cosd(L_degree)-i*sind(L_degree));
B = Z*(cosd(r)+i*sind(r));

%ค่าในสภาวะคงตัวที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน
Idc = (pi/(sqrt(6)))*abs(A/B);
Vdc = (3*sqrt(6)*V_bus/pi) - 3*Leq*w*Idc/pi - rL*Idc;
Vout = vo;
else
Vbus(k+1) = Vs*pi/(3*sqrt(3));
lambda(k+1) = 0.0001;
end
k=k+1;
end

%ค่า λ ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน
lambda = L_degree;

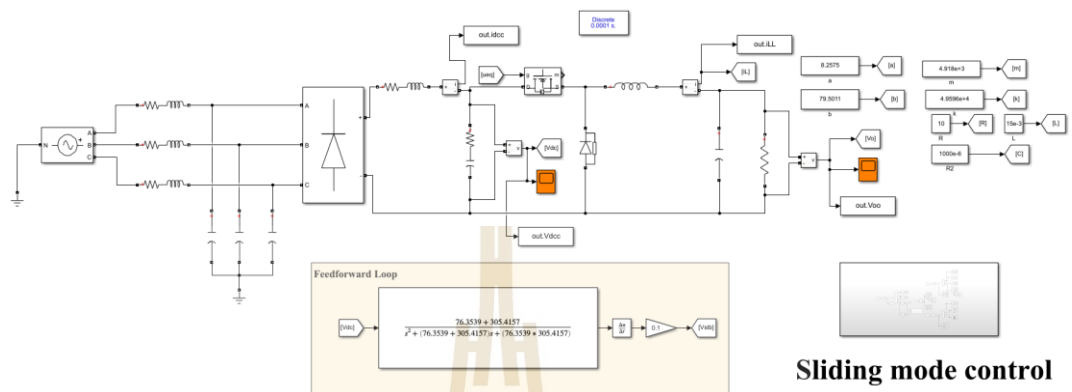
```



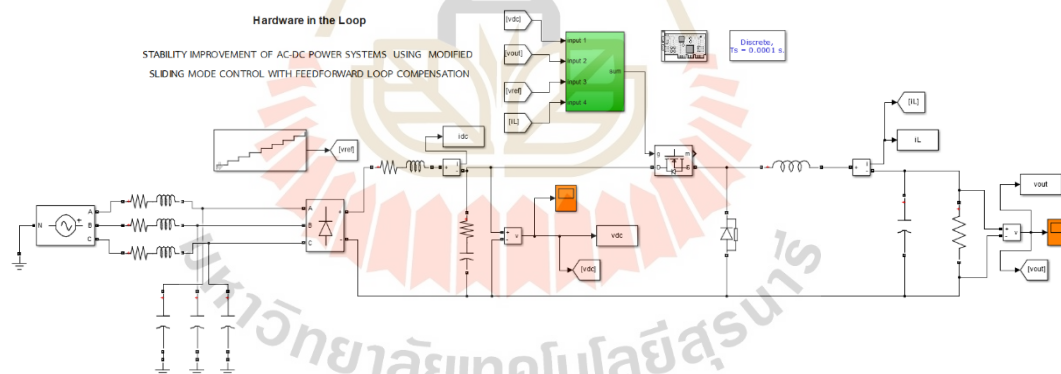
ภาคผนวก ค

ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.1 ชุดบล็อกไฟฟ้าร่วมกับโปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์



รูปที่ ข.2 ชุดบล็อกไฟฟ้าร่วมกับโปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a golden-yellow structure resembling a traditional Thai roof or a stylized 'A' shape, with a grey silhouette of a person standing in the center. Below this is a circular emblem with a red and white sunburst or gear-like border. The university's name is written in Thai script around the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ง

โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป
ของระบบกรณีพิจารณาการสร้างเสถียรภาพ

```

*****
โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป
ของระบบกรณีพิจารณาการสร้างเสถียรภาพ
*****

%เรียกใช้ไลบรารีของโปรแกรม
#include <stdio.h>
#include "SumDiff.h"
#include <rtdx.h>
#include "target.h"
#include <math.h>

%กำหนดตัวแปร และค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่าง ๆ
double Vdc, Vo, Vref, iL, ueq, VL_Present, VL_Old, VH_Present, VH_Old, VBP, X1, X2, X3;
float a =8.2575,b=79.5011,m=4918,K=49596; %ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน
float R=10,L=0.015,C=0.001; %ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบัก
float wH=305.416, wL=76.354; %ค่าความถี่ตัดสูงและค่าความถี่ตัดต่ำ
float Kf = 0.2; %ค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า
float Ts = 0.0001; //ค่า Sampling time สำหรับใช้คำนวณร่วมกับตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า
%กำหนดช่องรับสัญญาณขาเข้าจากโปรแกรม MATLAB
RTDX_CreateInputChannel (input1);
RTDX_CreateInputChannel (input2);
RTDX_CreateInputChannel (input3);
RTDX_CreateInputChannel (input4);
%กำหนดช่องส่งสัญญาณขาออกไปยังโปรแกรม MATLAB
RTDX_CreateOutputChannel(output1);
void main(){
%เปิดการใช้งานช่องรับสัญญาณขาเข้า
TARGET_INITIALIZE();
RTDX_enableInput (&input1);
RTDX_enableInput (&input 2);
RTDX_enableInput (&input 3);
RTDX_enableInput (&input 4);

%เปิดการใช้งานช่องส่งสัญญาณขาออก
RTDX_enableOutput (&output1);

```

```

%เปิดใช้ปฏิบัติการคำนวณสัญญาณการควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน
while (1) {
%กำหนดตัวแปรสำหรับจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากช่องสัญญาณขาเข้าจากโปรแกรม MATLAB
    RTDX_read( &input1, &Vdc, 1 * sizeof(long) );
    RTDX_read( &input2, &Vo, 1 * sizeof(long) );
    RTDX_read( &input3, &Vref, 1 * sizeof(long) );
    RTDX_read( &input4, &iL, 1 * sizeof(long) );

%คำนวณตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า
    VL_Present = (Vdc*wH*Ts+VL_Old)/(1+wH*Ts)
    VH_Present = (VH_Old+VL_Present-VL_Old)/(1+wL*Ts);
    VBP = ((wH+wL)/wH)*VH_Present;
    VL_Present = VL_Old;
    VH_Present = VH_Old;

%คำนวณสัญญาณการควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน
    X1=(a*R*C+b*L+a*L*K+m*R*L*C*(-K-1))/(a*R*C);
    X2=(b*L*R+a*L*K*R+m*R*L*C)/(a*R*C);
    X3=(m*R*L*C*(K+1))/(a*R*C);
    ueq =(Vo/Vdc)*X1 - (iL/Vdc)*X2 + (Vref + (KF*VBP)/Vdc)*X3;

%เงื่อนไขของปฏิบัติการคำนวณสัญญาณการควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน
    while ( RTDX_writing != NULL )
    { #if RTDX_POLLING_IMPLEMENTATION
        RTDX_Poll();
    } #endif}

%กำหนดตัวแปรสำหรับจัดเก็บข้อมูลไว้ในช่องส่งสัญญาณขาออกไปยังโปรแกรม MATLAB
    RTDX_write( &output1, &ueq, 1 * sizeof(long) );}}

```

ภาคผนวก จ

โปรแกรมสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้า-
กำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อนในบอร์ด DSP

รุ่น TMS320F335

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

 โปรแกรมสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่มีการดัดแปลง
 ร่วมกับตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าในบอร์ด DSP รุ่น TMS320F335

//เรียกใช้ไลบรารีของโปรแกรม

#include "DSP28x_Project.h"

#include "DSP2833x_Examples.h"

#include "DSP2833x_Device.h" //"DSP2802x_Device.h"

#include <stdio.h>

#include <stdlib.h>

#include "IQmathLib.h"

#include "math.h"

#if (CPU_FRQ_150MHZ) // Default - 150 MHz SYSCLKOUT

#define ADC_MODCLK 0x3 // HSPCLK = SYSCLKOUT/2*ADC_MODCLK2 = 150/(2*3) = 25.0 MHz

#endif

#define ADC_CKPS 0x0 // ADC module clock = HSPCLK/1 = 25.5MHz/(1) = 25.0 MHz

#define ADC_SHCLK 0x1 // S/H width in ADC module periods = 2 ADC cycle

#define AVG 1000 // Average sample limit*/

#define ZOFFSET 0x00 // Average Zero offset

#define BUF_SIZE 1024 // Sample buffer size

//กำหนดฟังก์ชันสำหรับการเรียกใช้โปรแกรม

void InitePWM(void);

interrupt void cpu_timer0_isr(void);

void Gpio_select(void);

Uint32 EPwm1TimerIntCount;

Uint16 EPwm1_DB_Direction;

//กำหนดตัวแปรสำหรับเก็บค่าที่ได้รับจากเซนเซอร์วัดสัญญาณไฟฟ้า

float Voltage_VR3,IL;

float Voltage_VR4,V0;

float Voltage_VR5,Vdc;

//กำหนดตัวแปร และค่าเริ่มต้นของตัวแปรพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ

float set[]={10,20,30,33,36,39,42,45,48,51,54,57,60}; //แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

```

float X1, X2, X3, ueq=0, VL_Present, VL_Old, VH_Present, VH_Old, VBP;
float a =8.2575,b=79.5011,m=4918,K=49596; //ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน
float R=10,L=0.015,C=0.001; //ค่าพารามิเตอร์ของวงจรแปลงผันแบบบัค
float wH=305.416, wL=76.354; //ค่าความถี่ตัดสูงและค่าความถี่ตัดต่ำ
float Kf = 0.2; //ค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า
int i=0;
float Ts = 0.0001; //ค่า Sampling time สำหรับใช้คำนวณร่วมกับตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า

void main(void)
{
    //เรียกใช้ฟังก์ชัน GPIO
    Gpio_select();
    IER = 0x0000;
    IFR = 0x0000;

    //เปิดใช้พิน ADC
    EALLOW;
    SysCtrlRegs.HISPCP.all = ADC_MODCLK;
    EDIS;
    InitAdc();
    AdcRegs.ADCTRL1.bit.ACQ_PS = ADC_SHCLK;
    AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_CASC = 1; // 1 Cascaded mode
    AdcRegs.ADCTRL1.bit.CONT_RUN = 1; // Setup continuous run
    AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_OVRD = 1; // Enable Sequencer override feature
    AdcRegs.ADCTRL2.all = 0x2000;
    AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCCLKPS = ADC_CKPS;
    AdcRegs.ADCMAXCONV.bit.MAX_CONV1=0xf;
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0; //A0
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x1; //A1
    AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV02 = 0x2; //A2
    AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1;

    //เรียกใช้ฟังก์ชันสำหรับสร้าง ePWM
    InitePWM();
    DINT;
}

```

```

//ปรับแต่งความถี่ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
#if (CPU_FRQ_150MHZ)
ConfigCpuTimer(&CpuTimer0, 10, 150);
#endif
CpuTimer0Regs.TCR.all = 0x4001;
EINT;
ERTM;

//กำหนดรอบการคำนวณสำหรับแรงดันอ้างอิงใด ๆ
for(i=0;i<=12;i++){

//ส่งสัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับจากเซนเซอร์ตรวจวัดไปยังพิน ADC
GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIO12 = !GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIO12;
Voltage_VR3 = (AdcRegs.ADCRESULT2>>4);
Voltage_VR4 = (AdcRegs.ADCRESULT3>>4);
Voltage_VR5 = (AdcRegs.ADCRESULT4>>4);

//แปลงสัญญาณไฟฟ้าที่พิน ADC อ่านได้ ให้เป็นค่าสัญญาณไฟฟ้าจริง
IL=((Voltage_VR3*3/4095)*(9.902))+0.0118;
Vo=((Voltage_VR4*3/4095)*(135.32))+0.0739;
Vdc=((Voltage_VR5*3/4095)*(136.06))+1.1729;

//คำนวณตัวชดเชยอุป้อนไปหน้า
VL_Present = (Vdc*wH*Ts+VL_Old)/(1+wH*Ts)
VH_Present = (VH_Old+VL_Present-VL_Old)/(1+wL*Ts);
VBP = ((wH+wL)/wH)*VH_Present;
VL_Present = VL_Old;
VH_Present = VH_Old;

//คำนวณสัญญาณการควบคุมของตัวควบคุมโหมดการเลื่อน
Vref = set[i];
X1=(a*R*C+b*L+a*L*K+m*R*L*C*(-K-1))/(a*R*C);
X2=(b*L*R+a*L*K*R+m*R*L*C)/(a*R*C);
X3=(m*R*L*C*(K+1))/(a*R*C);
ueq =(Vo/Vdc)*X1 - (iL/Vdc)*X2 + (Vref + (Kf*VBP)/Vdc)*X3;
if(Ueq>=0.95){Ueq = 0.95;}

```

```

    if(Ueq<=0){Ueq = 0;}
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*Ueq;
  }}}

//ฟังก์ชันสำหรับกำหนดคุณลักษณะของ ePWM
void InitePWM()
{
    EPwm1Regs.TBPRD = 3750;
    EPwm1Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0; // Set Phase register to zero
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN; // Symmetrical mode
    EPwm1Regs.TBCTR = 0x0000;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // Master module
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCSEL = TB_CTR_ZERO; // Sync down-stream module
    EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADAMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
    EPwm1Regs.CMPCTL.bit.LOADBMODE = CC_CTR_ZERO; // load on CTR=Zero
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET; // set actions for EPWM1A
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET; // set actions for EPWM1A
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR;
    EPwm1Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE; // enable Dead-band module
    EPwm1Regs.DBCTL.bit.IN_MODE = DBA_ALL;
    EPwm1Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_HIC; // Active Hi complementary
    EPwm1Regs.DBFED = 20; // 10 = 1usec
}

//ฟังก์ชันสำหรับการขัดจังหวะ
interrupt void cpu_timer0_isr(void)
{
    CpuTimer0.InterruptCount++;
    GpioDataRegs.GPBTOGGLE.bit.GPIO32 = 1;
    EALLOW;
    SysCtrlRegs.WDKEY = 0xAA;
    EDIS;
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
}

```

```
//ฟังก์ชันสำหรับกำหนดคุณลักษณะของ GPIO
void Gpio_select(void)
{
    EALLOW;
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.all = 0x0000;
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO0 = 1; // ePWM1A active
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO1 = 0; // ePWM1B active
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO2 = 0; // ePWM2A active
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO3 = 0; // ePWM2B active
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO4 = 0; // ePWM2A active
    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO5 = 0; // ePWM2B active
    GpioCtrlRegs.GPBMUX1.all = 0x0000; // GPIO functionality GPIO32-GPIO47
    GpioCtrlRegs.GPCMUX1.all = 0x0000; // GPIO functionality GPIO64-GPIO79
    GpioCtrlRegs.GPADIR.all = 0xFFFF;
    GpioCtrlRegs.GPBDIR.all = 0xFFFF; // GPIO32-GPIO47 are output
    GpioCtrlRegs.GPCDIR.all = 0xFFFF; // GPIO64-GPIO79 are output
    EDIS;
}
```



ประวัติผู้เขียน

นายสุรบัณฑิต แดงดอน เกิดเมื่อวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2543 ที่จังหวัดพิษณุโลก เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านน้ำผาคน้อย ระดับชั้นมัธยมศึกษา 1-6 ที่โรงเรียนชาติตระการวิทยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ด้วยเกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2566 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ณ สถาบันเดิม โดยได้รับทุนกิตติบัตินิตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจำนวน 5 รายวิชา ดังนี้ ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบฝังตัว (Electrical Machines, Power Electronics and Embedded Systems Laboratory) ปฏิบัติการวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Engineering Electronics Laboratory) ปฏิบัติการอ่านแบบสำหรับงานไฟฟ้า (Electrical Schematic Print Reading Laboratory) ปฏิบัติการวงจรดิจิทัลและการออกแบบทางตรรกะ (Digital Circuit and Logic Design Laboratory) และปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electrical Machines Laboratory)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี