

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซี
ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้วิธีการวางโพล



นางสาวอลิสา ถนนมเมือง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

INSTABILITY MITIGATION OF AC-DC POWER SYSTEMS FEEDING
CONSTANT POWER LOAD USING POLE-PLACEMENT METHOD

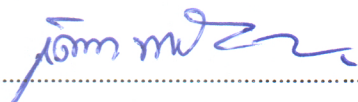


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี
ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้วิธีการวางโพล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....

(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ


.....

(รศ. ดร.ก้องพัน อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


.....

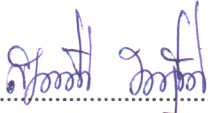
(ผศ. ดร.จักรกริช ภัคดีโต)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)


.....

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

กรรมการ


.....


(ผศ. ดร.สุดารัตน์ ขวัญอ่อน)

กรรมการ


.....

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ


.....

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อลิสสา ฅนอมเมือง : การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นติซีที่มี
โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้วิธีการวางโพล (INSTABILITY MITIGATION OF AC-DC
POWER SYSTEMS FEEDING CONSTANT POWER LOAD USING POLE-PLACEMENT
METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์, 213 หน้า.

คำสำคัญ: โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว/แบบจำลองทางคณิตศาสตร์/การวิเคราะห์เสถียรภาพ
การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ/วิธีการวางโพล

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
โหลดประเภทนี้สามารถส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ จากสาเหตุ
ดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่ต้องวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่ได้รับการพิสูจน์จากวิธีดีคิวิรวมกับ
วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งแบบจำลองดังกล่าว
มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทพื้นฐานของระบบควบคุม
อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เสถียรภาพเป็นเพียงการคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า
ซึ่งไม่สามารถทำให้ระบบไฟฟ้าที่เกิดการขาดเสถียรภาพสามารถกลับมาเสถียรภาพได้ ดังนั้นงานวิจัย
วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์
ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมโดยใช้วิธีการวางโพล วิธีการดังกล่าว
เป็นหนึ่งในแนวทางการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแบบแอคทีฟ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ
ด้วยวิธีการวางโพลจะดำเนินการสร้างสัญญาณชดเชยจากการนำสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน
ขดลวดเหนี่ยวนำและสัญญาณแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณดีซี
มาคูณด้วยอัตราขยายการวางโพล สัญญาณการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ได้จะถูกป้อนเข้าสู่
ตัวควบคุมพีไอของโหลดซึ่งเป็นการชดเชยผลกระทบที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ส่งผลให้ระบบ
ที่ขาดเสถียรภาพสามารถกลับมาเสถียรภาพอีกครั้ง นอกจากนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์ยังได้นำเสนอ
การออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลโดยอาศัยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและวิธีการ
ค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว รวมถึงได้ดำเนินการสร้างชุดทดสอบสำหรับใช้ในการยืนยันผลจากการ
วิเคราะห์ทางทฤษฎี ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการ
ออกแบบทั้งสองวิธีข้างต้นสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ โดยที่ค่าอัตราขยายการวางโพลจาก
วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวให้สมรรถนะผลการตอบสนองจากการควบคุมโหลดที่ดีกว่าเมื่อ

เทียบกับค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์ในทางทฤษฎีที่ได้นำเสนอไว้



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา.....**อุติสา ภิณฑมเมือง**.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....**พงษ์ อรรถ**.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม**[Signature]**.....

ALISA THANOMMUANG : INSTABILITY MITIGATION OF AC-DC POWER SYSTEMS
FEEDING CONSTANT POWER LOAD USING POLE-PLACEMENT METHOD.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D., 213 PP.

Keyword: Constant power load (CPL)/Mathematical model/

Stability analysis/Instability mitigation/Pole-placement method

The controlled power converters behave as the constant power loads. These loads can significantly affect the system stability. For this reason, the stability analysis of the power system feeding constant power loads based on a mathematical model is important. The dynamical model can be derived from the DQ method combined with the generalized state-space approach (GSSA) to obtain a time-invariant model. The proposed model is suitable for stability analysis via the basic theorem of control system. However, the stability analysis can only predict the unstable point of the power system. The power system operated in this point cannot be comeback to the stable operation. Therefore, this thesis presents a method to stabilize the instability of AC-DC power system feeding a controlled buck converter using the pole-placement method. This method is one of the active damping concepts. For the pole-placement mitigation technique, the instability mitigation signal can be calculated from the current signal through the inductor and the voltage across the capacitor of the DC filter multiplying with the pole-placement gains. This signal will be fed into the PI controller in which it is the compensation for the effect caused by the constant power loads, resulting in an unstable system being able to return stable operation. In addition, the pole-placement gain design using random value approach based on model and adaptive tabu search method is proposed. Moreover, the experiment is established to confirm the theory results. The experimental results show that the pole-placement gains from the proposed methods can mitigate the instability. Furthermore, the pole-placement gains from an adaptive tabu search method provide the better load performance than

the gains from random value approach based on model in which it is conformable with the theoretical results.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2022

Student's Signature อติศา กนอมเพ็ช

Advisor's Signature พงษ์ อธิกร

Co-Advisor's Signature [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกริช ภักดีโต อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางอันเป็นประโยชน์ อย่างดียิ่งต่องานวิจัย รวมทั้งยังได้สละเวลาเพื่อตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนกระทั่งมีความสมบูรณ์ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจและแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตและการทำงาน ให้กับผู้วิจัยเสมอมา

คณาจารย์ เลขานุการและผู้ช่วยสอนประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ การติดต่อประสานงาน และข้อคิด ในด้านต่าง ๆ อย่างดียิ่งมาโดยตลอด

บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน การใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษา ในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกลและการควบคุมทุกท่านที่ให้คำปรึกษา ด้านวิชาการ ด้านการดำเนินชีวิต และคอยเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้นายณัฐพล - นางขวัญฤทัย ถนอมเมือง บิดาและมารดาของผู้วิจัย รวมถึงครอบครัวของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

อลิสา ถนอมเมือง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	4
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	5
1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	6
1.7 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	6
2 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ.....	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	10
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า.....	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและงานวิจัยที่ได้รับ การพัฒนาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	16
2.6 สรุป.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง	
เอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบับค.....	21
3.1 บทนำ	21
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบับคที่ไม่มีการควบคุม	21
3.2.1 ระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบับคที่ไม่มีการควบคุม.....	21
3.2.2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีดีคิว	22
3.2.3 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป	25
3.2.4 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป	27
3.2.5 การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว	45
3.2.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	46
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบับคที่มีการควบคุม	49
3.3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบับคที่มีการควบคุม.....	49
3.3.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป.....	50
3.3.3 การทำให้เป็นเชิงเส้น.....	52
3.3.4 การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว	55
3.3.5 การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบับค.....	56
3.3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	61
3.4 สรุป	63

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม	64
4.1	บทนำ	64
4.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม	64
4.2.1	ทฤษฎีบทค่าเจาะจง	65
4.2.2	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา	66
4.3	ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา	69
4.4	สรุป	75
5	การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้วิธีการวางโพล.....	76
5.1	บทนำ	76
5.2	การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพล	76
5.2.1	ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเมื่อพิจารณา ลูปการวางโพล	76
5.2.2	ตัวประกอบการมีส่วนร่วม.....	79
5.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเมื่อพิจารณาลูปบรรเทาการขาดเสถียรภาพ	86
5.3.1	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้วิธีการวางโพล	86
5.3.2	การทำให้เป็นเชิงเส้น.....	89
5.3.3	การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว	92
5.3.4	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้น.....	92
5.4	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ	94

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5	การออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพล	96
5.5.1	วิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง.....	96
5.5.2	วิธีการค้นหาแบบตาปูเชิงปรับตัว.....	99
5.6	สรุป	110
6	การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีโหลด	
	เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม.....	112
6.1	บทนำ	112
6.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน	112
6.2.1	ภาพรวมของระบบ	113
6.2.2	ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดตัวต้านทาน.....	117
6.3	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัค	118
6.3.1	ภาพรวมของระบบ	118
6.3.2	วงจรแปลงผันแบบบัค	119
6.3.3	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์.....	123
6.3.4	วงจรรักษาระดับแรงดัน	125
6.3.5	ชุดวงจรขยายสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนสวิตช์ของวงจร แปลงผันแบบบัค.....	126
6.3.6	วงจรตรวจจับ.....	127
6.3.7	การเขียนโปรแกรมตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	128
6.3.8	ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด เป็นวงจรแปลงผันแบบบัค	130
6.4	การระบุเอกลักษณ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาปูเชิงปรับตัว.....	131

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.4.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ด้วยเครื่องมือวัด	132
6.4.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์	134
6.5 สรุป	144
7 ผลทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง เอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้วิธีการวางโพล	146
7.1 บทนำ	146
7.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบจริง	146
7.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจริง	146
7.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้พิสูจน์ขึ้น	151
7.2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริง	152
7.3 ผลทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ใช้อัตราขยายการวางโพล จากการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง	155
7.4 ผลทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ใช้อัตราขยายการวางโพล จากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว	157
7.5 สรุป	163
8 สรุปและข้อเสนอแนะ	164
8.1 สรุป	164
8.2 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์	167
8.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	168
รายการอ้างอิง	169

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.	โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณค่า λ ด้วยการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – رافสัน.....	173
ภาคผนวก ข.	แสดงชุดบล็อกกำลังไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB.....	177
ภาคผนวก ค.	ตารางผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของการค้นหา แบบตาชูเชิงปรับตัว	180
ภาคผนวก ง.	โปรแกรมตัวควบคุมพีไอที่มีลูบรเรทาการขาดเสถียรภาพ ด้วยวิธีการวางโพลในบอร์ด Arduino Mega2560	184
ภาคผนวก จ.	บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	192
ประวัติผู้เขียน.....		213

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ..... 9
2.2	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 10
2.3	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า 13
2.4	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ 16
3.1	พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 3.1..... 47
3.2	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 3.20..... 61
4.1	ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 4.1..... 66
5.1	เมทริกซ์ค่าเจาะจง 82
5.2	เมทริกซ์เวกเตอร์เจาะจงฝั่งขวา 83
5.3	เมทริกซ์เวกเตอร์เจาะจงฝั่งซ้าย 83
5.4	เมทริกซ์การมีส่วนร่วม..... 84
5.5	พารามิเตอร์ของการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว..... 104
5.6	ขอบเขตการค้นหาค่าอัตราขยายการวางโพล 105
5.7	ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว 108
5.8	ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว..... 108
6.1	ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ 133
6.2	ผลการวัดค่าความเหนี่ยวนำ 134
6.3	พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 6.21..... 138
6.4	พารามิเตอร์ของการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว..... 141
6.5	ขอบเขตหารค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน..... 141
6.6	ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน 142
7.1	พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง 151
7.2	พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมตาบู่เชิงปรับตัวสำหรับระบบจริง..... 158

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
7.3	ขอบเขตการค้นหาค่าอัตราขยายการวางโพลของระบบจริง 158
7.4	ค่าอัตราขยายการวางโพลที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ของระบบจริง 159
7.5	ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและวิธีการค้นหาแบบ ตามูเชิงปรับตัวของระบบจริง 161
ค.1	การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น 181
ค.2	การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง 182
ค.3	การทดสอบคาร์คมีการค้นหา 182
ค.4	การทดสอบค่าอัตราปรับลดคาร์คมี 183

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพสรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า 15
2.2	แผนภาพสรุปการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า 19
3.1	ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่ไม่มีการควบคุม 22
3.2	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน $\alpha\beta$ 23
3.3	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq 24
3.4	แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน dq 25
3.5	ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส 28
3.6	วงจรสมมูลดีคิวของตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า 29
3.7	ตัวเก็บประจุของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส 29
3.8	วงจรสมมูลดีคิวของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า 31
3.9	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีความต้านทานปรับค่าได้ 32
3.10	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ 32
3.11	วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์บนแกนหมุนดีคิว 34
3.12	แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว 35
3.13	วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว 36
3.14	วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว 37
3.15	สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก 37
3.16	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 38
3.17	สายส่งกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งเฟส 45
3.18	ผลการตอบสนอง เมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่ $d = 40\%$ 48
3.19	ผลการตอบสนอง เมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่ $d = 60\%$ 48
3.20	ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม 49
3.21	วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว เมื่อกำหนดให้ $\phi = \phi_1$ 50
3.22	แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัก 57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23	แผนภาพของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัก 59
3.24	ผลตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_o^* จาก 20 V ไปเป็น 25 V 62
3.25	ผลตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_o^* จาก 30 V ไปเป็น 35 V 62
4.1	ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม 65
4.2	ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา 67
4.3	ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา 67
4.4	ผลจําลองสถานการณ์ของการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 4.3 68
4.5	ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า L_{dc} ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา 69
4.6	ผลจําลองสถานการณ์เมื่อค่า L_{dc} ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลง 70
4.7	ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า C_{dc} ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา 71
4.8	ผลจําลองสถานการณ์เมื่อค่า C_{dc} ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลง 71
4.9	ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า L ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา 72
4.10	ผลจําลองสถานการณ์เมื่อค่า L ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลง 73
4.11	ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า C ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา 73
4.12	ผลจําลองสถานการณ์เมื่อค่า C ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลง 74
5.1	แผนภาพบล็อกแบบจําลองปริภูมิสถานะของระบบที่พิจารณาการวางโพล 77
5.2	ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม เมื่อใช้อัตราขยาย $K_{I_{dc}}$, $K_{V_{dc}}$, K_{I_L} และ K_{V_o} ในรูปการวางโพล 79
5.3	ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม เมื่อใช้อัตราขยาย $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ ในรูปการวางโพล 85
5.4	วงจรมุมมูลของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.3 เมื่อกำหนดให้ $\phi = \phi$ 86
5.5	ผลตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_o^* จาก 20 V ไปเป็น 25 V 93

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6	ผลตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_o^* จาก 30 V ไปเป็น 35 V 93
5.7	ค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ 94
5.8	ผลการจำลองสถานการณ์การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพล 95
5.9	ค่าเจาะจงเด่นของระบบที่จุดขาดเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยาย $K_{I_{dc}}$ 96
5.10	ค่าเจาะจงเด่นของระบบที่จุดขาดเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยาย $K_{V_{dc}}$ 97
5.11	ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ เมื่อใช้อัตราขยายการวางโพลที่ออกแบบ ด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง 98
5.12	สุ่มหาค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา 99
5.13	ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0 100
5.14	กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่ 100
5.15	กำหนดค่า S_0 ใหม่ 101
5.16	กลไกการเดินย้อนรอย 101
5.17	บล็อกไดอะแกรมสำหรับการออกแบบอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการค้นหา แบบตาบู่เชิงปรับตัว 102
5.18	การเข้าสู่ค่าตอบของวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ครั้งที่ 1 105
5.19	การเข้าสู่ค่าตอบของวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ครั้งที่ 2 106
5.20	การเข้าสู่ค่าตอบของวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ครั้งที่ 3 106
5.21	การเข้าสู่ค่าตอบของวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ครั้งที่ 4 107
5.22	การเข้าสู่ค่าตอบของวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ครั้งที่ 5 107
5.23	ค่าเจาะจงเด่นของระบบที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว เปรียบเทียบกับวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง 109
5.24	ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหา แบบตาบู่เชิงปรับตัวเปรียบเทียบกับวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง 110
6.1	ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาสำหรับสร้างชุดทดสอบ 113
6.2	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน 114

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.3 ชุด CHROMA Programmable AC source	114
6.4 มอดูลไดโอดสามเฟส รุ่น VS-36MT160.....	115
6.5 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรเรียงกระแส	116
6.6 ตัวเก็บประจุของวงจรเรียงกระแส.....	116
6.7 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน.....	117
6.8 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน	118
6.9 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัค.....	119
6.10 วงจรแปลงผันแบบบัค.....	119
6.11 อุปกรณ์สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัค.....	120
6.12 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัค.....	122
6.13 ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัค.....	122
6.14 ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบัค	123
6.15 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA2560.....	123
6.16 วงจรรักษาระดับแรงดัน	125
6.17 ชุดวงจรขยายสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัค.....	126
6.18 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า	127
6.19 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า.....	128
6.20 ผลการทดสอบการตอบสนองของ V_{dc} และ V_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_o^* จาก 34 V ไปเป็น 38 V.....	130
6.21 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน	131
6.22 วงจรทดสอบค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ.....	132
6.23 เครื่องมือวัด LCR Meter รุ่น 897 จากบริษัท BK PRECISION.....	133
6.24 วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนตีควของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดตัวต้านทาน.....	135
6.25 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....	138
6.26 ผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดทดสอบ.....	139

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.27	โครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว..... 140
6.28	ผลการลู่เข้าของค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดสำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน..... 142
6.29	ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซี 143
7.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ..... 147
7.2	ผลตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_o^* จาก 30 V ไปเป็น 35 V 152
7.3	ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 7.1..... 153
7.4	ค่าเจาะจงเด่นที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง..... 153
7.5	การยืนยันผลการขาดเสถียรภาพของระบบจริง 154
7.6	ค่าเจาะจงเด่นของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$ 155
7.7	ค่าเจาะจงเด่นของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{V_{dc}}$ 156
7.8	การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ค่าอัตราขยายการวางโพล..... 157
7.9	การลู่เข้าค่าตอบของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวของระบบจริง..... 159
7.10	การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลที่ออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว 160
7.11	ค่าเจาะจงเด่นของระบบ เมื่อพิจารณาการวางโพลที่ออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว..... 161
7.12	การเปรียบเทียบสมรรถนะการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ 162
ข.1	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณากรณีที่โหลดไม่มีการควบคุม..... 178
ข.2	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณากรณีที่โหลดมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต..... 178
ข.3	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพล..... 179

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยเฉพาะวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน ได้แก่ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเอซีเป็นดีซี เอซีเป็นเอซี ดีซีเป็นดีซี และเอซีเป็นดีซี ถูกนำมาใช้งานในระบบต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย อาทิเช่น ยานยนต์ไฟฟ้า อากาศยาน ระบบควบคุมในภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น เนื่องจากวงจรมีประสิทธิภาพสูง สามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย และการดูแลบำรุงรักษาต่ำ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power loads : CPL) ซึ่งโหลดดังกล่าวมีลักษณะเป็นค่าอิมพีแดนซ์เชิงลบ (negative impedance) เมื่อนำโหลดชนิดดังกล่าวมาต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบอย่างมีนัยสำคัญ และอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบหรือส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ (Emadi A., Khaligh A., Rivetta C.H. and Williamson G.A., 2006) จากสาเหตุดังกล่าวจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาและตรวจสอบเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อโหลดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุม โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง เพื่อคาดการณ์จุดที่ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพและหลีกเลี่ยงการทำงานของระบบที่สภาวะดังกล่าว โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจร ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนในการนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ด้วยสาเหตุดังกล่าวจึงต้องหาวิธีการพิสูจน์แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-invariant model) ซึ่งพบว่ามีอยู่ 3 วิธี ที่นิยมนำมาใช้ อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ วิธีที่ 1 คือ วิธีดีคิว (DQ method) (Han S.B., Choi N.S., Rim C.T. and Cho G.H., 1998; Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M. and Thomas D.W.P., 2008) เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟส มีความยืดหยุ่นสูง สามารถนำไปใช้ร่วมกับวิธีการอื่นได้ง่ายและนำไปใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนได้ เช่น วงจรเรียงกระแสสามเฟสที่มีแหล่งกำเนิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสสามเฟส เป็นต้น วิธีที่ 2 คือ วิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear average-value method) (Sudhoff S.D. and Wasynczuk O., 1993) วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและแบบจำลองที่ได้จะไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือแบบจำลองที่ได้มีความไม่ยืดหยุ่น

และต้องพิจารณาแยกเป็นแต่ละกรณี ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่าย วิธีที่ 3 คือ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method: GSSA) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับค่านิยมอย่างแพร่หลายสำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (Emadi A., 2004) อีกทั้งยังสามารถใช้กับวงจรเรียงกระแสที่มีการควบคุมเฟสและไม่มี การควบคุมเฟสในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสได้อีกด้วย แต่เมื่อนำวิธีนี้มาใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสจะทำให้แบบจำลองที่ได้มีความซับซ้อนและยากต่อการวิเคราะห์วงจร ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีการ คือ วิธีการที่ 1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นหรือวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal stability analysis) โดยมี 2 แนวทางการวิเคราะห์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ การวิเคราะห์เสถียรภาพบนระนาบเอส (s-plane) โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) (Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M., Lillo L.D. and Thomas D.W.P., 2009) และการวิเคราะห์เสถียรภาพบนโดเมนความถี่โดยใช้เกณฑ์ของมิตเดิลบรูค (Riccobono A. and Santi E., 2014; Lin Z., Liu Y., He X., Xie W., Dong M. and Wang F., 2020) สำหรับวิธีการที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เชิงเส้นหรือวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ (large-signal stability analysis) เป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยตรง ซึ่งมี 2 แนวทาง ได้แก่ การวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase plane analysis) (อภิชัย สุยะพันธ์, 2558) และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method) (Kabalan M., Singh P. and Niebur D., 2017) ทั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดการณ์แนวโน้มการขาดเสถียรภาพได้อย่างชัดเจนและมีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพเป็นเพียงกระบวนการวิเคราะห์เพื่อคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบเท่านั้น แต่ไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องบรรเทาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการนำเสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ โดยแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการ ได้แก่ วิธีที่ 1 วิธีแบบพาสซีฟ (passive method) และวิธีแบบแอคทีฟ (active method) วิธีแบบพาสซีฟจะอาศัยการปรับเปลี่ยนวงจรกรองด้วยการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุ หรือลดค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองสัญญาณดีซี รวมถึงการเพิ่มความต้านทานในระบบ (Cespedes M., Xing L. and Sun J., 2011) วิธีแบบพาสซีฟนี้เป็นวิธีการที่ง่าย

ต่อการออกแบบและการนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติ แต่มีข้อเสียคือ ทำให้ขนาด น้ำหนัก และราคาของระบบโดยรวมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นในระบบ วิธีที่ 2 วิธีแบบแอกทีฟ ซึ่งอาศัยการแก้ไขโครงสร้างของตัวควบคุม (control structures modifications) โดยการสร้างตัวชดเชยภายในตัวควบคุมเพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพ วิธีแบบแอกทีฟนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือมากกว่าวิธีแบบพาสซีฟ เนื่องจากไม่มีการปรับเปลี่ยนวงจรกรอง (รัฐพล โพธิ์สังข์, 2563) โดยวิธีการนี้สามารถแบ่งตามตำแหน่งการบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ 3 แนวทาง คือ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพทางด้านแหล่งจ่าย (source/feeder side mitigation) (จักรกริช ภัคดีโต, 2561) การบรรเทาการขาดเสถียรภาพในวงจรช่วย (auxiliary circuit) (เทพพนม โสภานเพิ่ม, 2560) และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพทางด้านโหลด (load/CPL side mitigation) (Rahimi A.M., Williamson G.A. and Emadi A., 2010; Fulwani D.K. and Singh S., 2017) สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้านแหล่งจ่ายมีหลักการคือสร้างสัญญาณชดเชย (compensation signal) หรือสร้างสัญญาณการบรรเทา (mitigation signal) ป้อนเข้าไปในโครงสร้างของระบบควบคุมทางด้านแหล่งจ่ายเพื่อสร้างผลการหน่วง (damping effect) ซึ่งจะทำให้การหน่วงของระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพในวงจรช่วยเป็นการเพิ่มอุปกรณ์สวิตช์แทรกเข้าไประหว่างด้านแหล่งจ่ายกับด้านโหลดของระบบ จากนั้นจะนำสัญญาณการบรรเทาที่สร้างขึ้นป้อนเข้าสู่สวิตช์ดังกล่าวเพื่อบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ในส่วนของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพทางด้านโหลดจะอาศัยการเพิ่มผลการหน่วงให้กับระบบเช่นเดียวกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้านแหล่งจ่าย แต่จะนำสัญญาณการบรรเทาที่สร้างขึ้นไปป้อนให้กับโครงสร้างของระบบควบคุมทางด้านโหลดแทน

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพทางด้านโหลดด้วยวิธีการวางโพล (pole-placement method) เนื่องจากไม่ต้องการทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นในระบบ อันเป็นผลมาจากการเพิ่มวงจรช่วยระหว่างด้านแหล่งจ่ายที่เป็นวงจรเรียงกระแสที่ไม่มีการควบคุมเฟส (full bridge diode rectifier) กับด้านโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม อีกทั้งวิธีการวางโพลยังเป็นวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ใช้การป้อนกลับของสัญญาณชดเชยหรือสัญญาณบรรเทาในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งไม่มีความซับซ้อน โดยลูบบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้อาศัยการวัดค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำและสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณดิซิมาคูณกับอัตราขยายการวางโพล เพื่อให้ได้สัญญาณชดเชยสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามการบรรเทาการขาดเสถียรภาพทางด้านโหลดอาจทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดลดลง ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการออกแบบหาค่าอัตราขยายการวางโพลของลูบบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ซึ่งวิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง สำหรับการ ยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะดำเนินการโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บน คอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม MATLAB และผลจากชุดทดสอบจริง เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่ได้ นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีสมรรถนะการควบคุมโหลดที่ดีและทำให้ระบบกลับมา มีเสถียรภาพ ได้จริง อย่างไรก็ตามจากปรีทัศน์วรรณกรรมยังไม่มียานวิจัยในอดีตดำเนินการประยุกต์ใช้วิธีการ ดังกล่าวกับระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม ซึ่งถือเป็น การประยุกต์วิธีการใหม่ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษา ค้นคว้า และสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.2.2 เพื่อศึกษา ค้นคว้า และสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก เพื่อให้ได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพและ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบได้

1.2.3 เพื่อศึกษา ค้นคว้า องค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการบรรเทา การขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก

1.2.4 เพื่อคิดค้น พัฒนา และสร้างองค์ความรู้ใหม่สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ทางด้านโหลด โดยการประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวในการออกแบบค่าอัตราขยายการ วางโพล

1.2.5 เพื่อศึกษาและดำเนินการสร้างชุดทดสอบสำหรับใช้ยืนยันผลการบรรเทาการขาด เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดยมีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมพีไอ

1.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พิสูจน์จากวิธีดีคิวผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ ทั่วไป

1.3.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอ 2 ลูปต่อกันแบบคาสเคดสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัก โดยอาศัยการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง

1.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

1.3.5 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์จะอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

1.3.6 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง อีกทั้งวิธีการดังกล่าวจะถูกนำไปใช้สำหรับประเมินการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเช่นกัน

1.3.7 การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักจะใช้วิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพทางด้านโหลดด้วยวิธีการวางโพลและประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวในการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพล

1.4 ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้านโหลดและการสร้างเสถียรภาพที่ไม่มีการปรับตัวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักเท่านั้น

1.4.2 การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าในระบบ จะพิจารณาในย่านโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง (continuous conduction mode: CCM) เท่านั้น

1.4.3 การทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) จะอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่ง

1.4.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง

1.4.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ในขณะที่การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการสร้างชุดทดสอบจริง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.5.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอ 2 ลูปต่อกันแบบคาสเคดสำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัก

1.5.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการผสมผสานระหว่างวิธีตีคิวกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม

1.5.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้วิธีการวางโพลของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก

1.5.5 ได้ชุดทดสอบของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม ใช้สำหรับยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพล

1.5.6 ได้บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ

1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.6.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการผสมผสานระหว่างวิธีตีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม

1.6.2 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ต่อยอดและพัฒนาให้กับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพทางด้านโหลดด้วยการใช้วิธีการวางโพล อีกทั้งยังได้ประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวในการค้นหาค่าอัตราขยายการวางโพลเพื่อให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดเหมาะสมที่สุดซึ่งพบว่าตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่และดำเนินการในลักษณะเช่นนี้กับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพทางด้านโหลด

1.6.3 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ยืนยันผลการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวสำหรับใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักด้วยชุดทดสอบจริง

1.7 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีส่วนประกอบจำนวน 8 บท โดยในแต่ละบทได้นำเสนอรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย และจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพ และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

บทที่ 3 นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคครณีที่ไม่มีการควบคุมและกรณีที่มีการควบคุม

บทที่ 4 นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

บทที่ 5 นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมโดยใช้วิธีการวางโพล

บทที่ 6 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม

บทที่ 7 นำเสนอผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม

บทที่ 8 นำเสนอสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีทั้งหมด 5 ส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณค่า λ ด้วยการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราฟสัน
- ภาคผนวก ข. แสดงชุดบล็อกกำลังไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB
- ภาคผนวก ค. แสดงรายละเอียดตารางผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาวิธีแบบตาบู่เชิงปรับตัว
- ภาคผนวก ง. แสดงรายละเอียดโปรแกรมตัวควบคุมพีไอที่มีลูบบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลในบอร์ด Arduino Mega2560
- ภาคผนวก จ. แสดงรายการบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

รายละเอียดเนื้อหาของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทนี้นำเสนอการศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัค โดยแบ่งรายละเอียดออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพรวมถึงงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยในแต่ละหัวข้อได้นำเสนองานวิจัยตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของงานวิจัยนั้น อีกทั้งยังได้สรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องในแต่ละงานไว้พอสังเขป ในส่วนท้ายของการศึกษางานวิจัยในอดีตนี้ได้นำเสนองานวิจัยที่ได้พัฒนาต่อยอดเพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ

ในปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน ซึ่งเมื่อนำวงจรดังกล่าวมาเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรรอง จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ และทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ซึ่งการขาดเสถียรภาพนั้นอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมหรืออาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบได้ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยจึงได้เริ่มศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยรายละเอียดดังกล่าวแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2005	Rivetta, C., Williamson, G.A., and Emadi, A.	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลังดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุมและวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีการควบคุมความเร็วรอบของระบบไฟฟ้าในเรือดำนํ้า ซึ่งวงจรดังกล่าวมีลักษณะเป็นอิมพีแดนซ์เชิงลบต่อระบบโดยรวม จึงส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพและนำมาซึ่งการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า
2006	Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีลักษณะเป็นอิมพีแดนซ์เชิงลบ ส่งผลให้เกิดการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า
2009	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Lillo, L.d., Asher, G.M., Thomas, D.W.P., Watson, A., and Wu, T.	บทความนี้เสนอโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินที่เพิ่มมากขึ้น โดยคำนึงถึงพลวัตที่เกิดขึ้นเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งโหลดดังกล่าวส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพ
2012	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., Lillo, L.D., and Thomas, D.W.P.	บทความนี้เสนอผลที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพ
2015	Lu, X., Sun, K., Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Huang, L., and Wang, J.	บทความนี้นำเสนอภาพรวมของเสถียรภาพบนระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยใช้เกณฑ์การแมทซิงอิมพีแดนซ์ในการระบุว่าโพลของระบบที่ขาดเสถียรภาพเกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในตารางที่ 2.1 พบว่าวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงานจะมีค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่งในสภาวะคงตัว

โดยค่ากำลังไฟฟ้านี้จะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบ จึงกล่าวได้ว่าโหลดในลักษณะดังกล่าว มีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดในลักษณะนี้จะมีค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ ต่อระบบโดยรวม หากนำโหลดดังกล่าวต่อเข้ากับวงจรกรองสัญญาณจะส่งผลให้ค่าความต้านทานของ วงจรกรองสัญญาณลดลง ซึ่งจะทำให้ความหน่วง (damping) ของวงจรกรองสัญญาณลดลงด้วย เมื่อความหน่วงของวงจรกรองสัญญาณลดลงจะส่งผลให้สัญญาณมีการกระเพื่อมสูงขึ้น ในกรณีที่ สัญญาณมีการกระเพื่อมของสัญญาณนั้นเพิ่มมากขึ้นจนเกิดการลู่ออกจากจุดการทำงานเดิมจะทำให้ ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมลดลงหรือ ทำให้อุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดความเสียหายได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้อง ศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องเพื่อให้สามารถคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพ ของระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแนวทางการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม โดยทั่วไประบบไฟฟ้าดังกล่าว จะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ ในวงจรแปลงผันกำลัง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนสำหรับ นำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการดำเนินงานวิจัยในส่วนนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษา แนวทางในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา โดยรายละเอียดของงานวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1997	Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี ด้วยวิธี ค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1998	Han, S.B., Choi, N.S., Rim, C.T., and Cho, G.H.	บทความนี้นำเสนอการแปลงวงจรถ่ายให้อยู่บนแกนดีคิวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสโดยใช้เทคนิคพีดับเบิลยูเอ็ม รวมถึงการพิสูจน์สมการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลบนแกนดีคิว
2004	Ali Emadi	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสซึ่งมีโหลดตัวต้านทานขนานกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยแบบจำลองของวงจรได้อาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปและวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง
2008	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมด้วยพีดับเบิลยูเอ็ม โดยใช้วิธีการแปลงดีคิว และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีค่าเจาะจง พร้อมทั้งแสดงผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์
2009	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., de Lillo, L., Asher, G.M., Thomas, D.W.P., Watson, A., and Wu, T.	บทความนี้เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินซึ่งมีแหล่งจ่ายเป็นแหล่งจ่ายเอซีสามเฟสโดยคำนึงถึงพลวัตที่เกิดขึ้นเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยวิธีการแปลงดีคิวโดยระบบที่พิจารณาประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรอง รวมถึงความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง และโหลดมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรที่มีการควบคุมความเร็ว การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Chaijarurnrdomrung, K., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	บทความนี้ นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้วิธีดีคิวในระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่ควบคุมเฟส ซึ่งมีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
2014	Chanpittayagit, R., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	บทความนี้ นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัค-บูสต์ ด้วยวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2015	Lin, W., and Jovicic, D.	บทความนี้ นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะร่วมกับวิธีดีคิว

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในตารางที่ 2.2 พบว่าวิธีการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาที่มีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้าสามเฟสคือวิธีดีคิว ส่วนวิธีการที่เหมาะสมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงคือวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีระบบที่พิจารณาเป็นระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม ซึ่งประกอบด้วยส่วนระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสและส่วนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งง่ายต่อการนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ สำหรับรายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้นำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือในการคาดการณ์จุดการทำงานที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวอาจทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ เพื่อให้ทราบถึงจุดที่ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพและ

หลีกเลี่ยงการทำงานในสภาวะดังกล่าว โดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

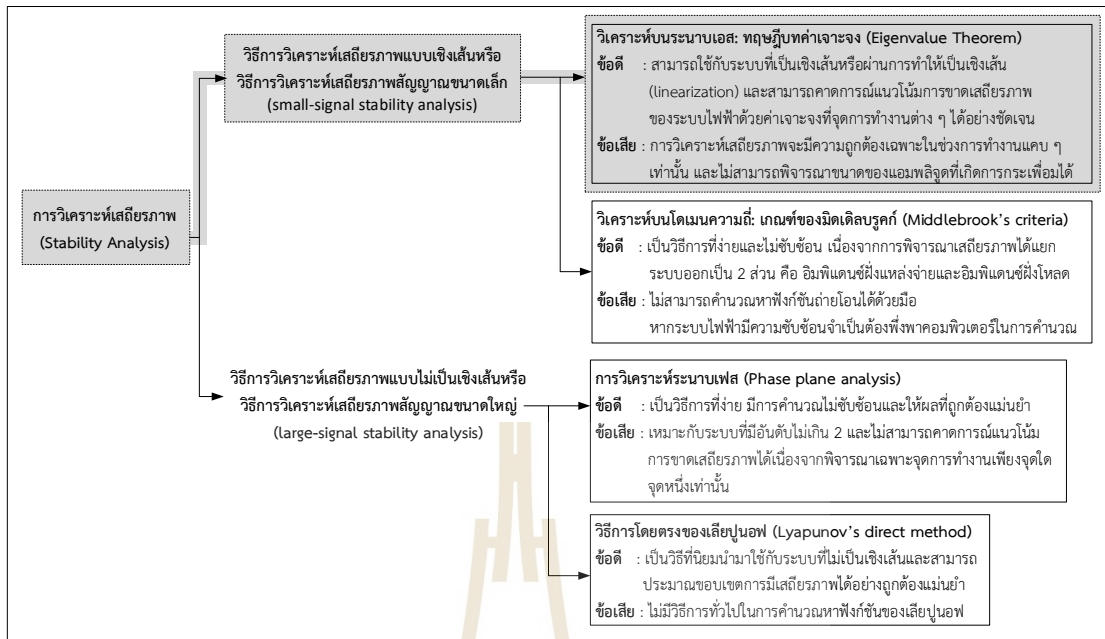
ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1989	Pai, M.A., and Sauer P.W.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการตรงของเลียปูนอฟ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าฟังก์ชันเลียปูนอฟเบื้องต้นและทำการประมาณขอบเขตการมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา
2000	Emadi, A., Johnson, J.P., and Ehsani, M.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าแบบโซลิตสเตท (solid-state) แบบกระแสตรงที่มีขนาดใหญ่สำหรับใช้กับระบบยานอวกาศ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอรายละเอียดของการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสัญญาณขนาดใหญ่และสัญญาณขนาดเล็ก
2000	Ohyama, K., and Shinohara, K.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ไม่ใช้ตัวตรวจวัดความเร็วแต่อาศัยการควบคุมกระแสซิงโครนัส ซึ่งใช้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กในการวิเคราะห์เสถียรภาพ
2001	Wong, P-L, Lee, F. C., and Xunwei, Z.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าสำหรับระบบคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งนำเสนอเป็นวงจรแปลงผันแบบบัต โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทความนี้ใช้วิธีการของมิตเดิลบรุคค์
2007	Coughlan, Y., Smith, P., Mullane, A., and Malley, M.O.	นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกังหันลมสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยแบบจำลองสัญญาณขนาดใหญ่ แบบจำลองดังกล่าวถูกนำไปใช้สำหรับระบบกริดของประเทศไอร์แลนด์

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Lillo, L.d., Asher, G.M., Thomas, D.W.P., Watson A., and Wu, T.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยสัญญาณขนาดเล็กของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีของพลวัตชุดขับเคลื่อนสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินรวมถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีดีคิวเพื่อนำไปคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ
2011	Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่นำเอาผลกระทบที่เกิดจากพลวัตของตัวควบคุมแรงดันและตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง
2012	Marx, D., Magne, P., Nahid-Mobarakeh, B., Pierfederici, S., and Davat, B.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของสัญญาณขนาดใหญ่ในระบบไฟฟ้ากำลังแบบกระแสตรงที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ทั้งนี้ยังได้นำเสนอผลจากชุดทดสอบเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์เส้นโคจรระนาบเฟส
2015	Wen, B., Boroyevich, D., Burgos, R., Mattavelli, P., and Shen, Z.	นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสผ่านแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก ระบบไฟฟ้างกล่าวว่ามีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่ออยู่ การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดำเนินการอยู่บนแกนดีคิว นอกจากนี้ยังมีการยืนยันผลการวิเคราะห์จากชุดทดสอบอีกด้วย

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในตารางที่ 2.3 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพสรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

จากแผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า วิธีการแรกเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น ประกอบด้วย 2 แนวทางที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ การวิเคราะห์เสถียรภาพบนระนาบเอสดีด้วยทฤษฎีบทค่าเฉพาะจริง และการวิเคราะห์เสถียรภาพบนโดเมนความถี่ด้วยเกณฑ์เสถียรภาพของมิดเดิลบรูค โดยทั้งสองแนวทางที่กล่าวมาเป็นแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือการวิเคราะห์เสถียรภาพจะมีความถูกต้องในช่วงการทำงานที่แคบเท่านั้น (small range operation) เนื่องจากการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก ในขณะที่วิธีการที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพขนาดใหญ่ (large signal) ทำให้สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพในช่วงการทำงานที่กว้าง (large range operation) ซึ่งประกอบด้วย 2 แนวทางคือ การวิเคราะห์ระนาบเฟสและวิธีการตรงของเลียปูนอฟ โดยแนวทางแรกเป็นวิธีการทางกราฟฟิก ซึ่งจะสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ 2 ตัว การวิเคราะห์ระนาบเฟสนี้เป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และได้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำ แต่มีข้อเสียคือ สามารถใช้กับระบบที่มีอันดับไม่เกิน 2 หากระบบมีอันดับเกิน 2 จะต้องทำการแปลงรูปแบบให้เป็นระบบอันดับ 2 ซึ่งมีความยุ่งยากและอาจทำให้ผลการวิเคราะห์เกิดความผิดพลาดได้ สำหรับวิธีการตรงของเลียปูนอฟเป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามแนวทางนี้

จำเป็นต้องคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณาหลังจากนั้นจึงนำฟังก์ชันที่ได้ไปตรวจสอบเสถียรภาพตามทฤษฎีการมีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ซึ่งข้อเสียของแนวทางนี้คือไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟและในทางปฏิบัติการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการที่ง่ายและสามารถคาดการณ์แนวโน้มการขาดเสถียรภาพได้อย่างชัดเจนนั่นคือวิธีการวิเคราะห์บนระนาบเฟสด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพดังกล่าวเป็นเพียงการคาดการณ์จุดที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเพียงเท่านั้น ไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเพื่อทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพ ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ในหัวข้อที่ผ่านมากล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเป็นเพียงการคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบเพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานในสภาวะดังกล่าว แต่ไม่สามารถทำให้ระบบที่เกิดการขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงดำเนินการศึกษาแนวทางการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2001	Logue, D.L., and Krein, P.T.	บทความนี้แนะนำเสนอแนวคิดวิธีการป้องกันการขาดเสถียรภาพของระบบโดยใช้วงจรบัฟเฟอร์กำลัง
2008	Iftikhar, M.U., Godoy, E., Lefranc, P., Sadarnac, D., and Karimi, C.	บทความนี้แนะนำเสนอการแก้ปัญหาการขาดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมป้อนกลับสัญญาณร่วมกับตัวควบคุมพีไอ วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์พาสซีฟเข้ามาในวงจร ทำให้ไม่มีกำลังงานสูญเสียเกิดขึ้นในระบบ

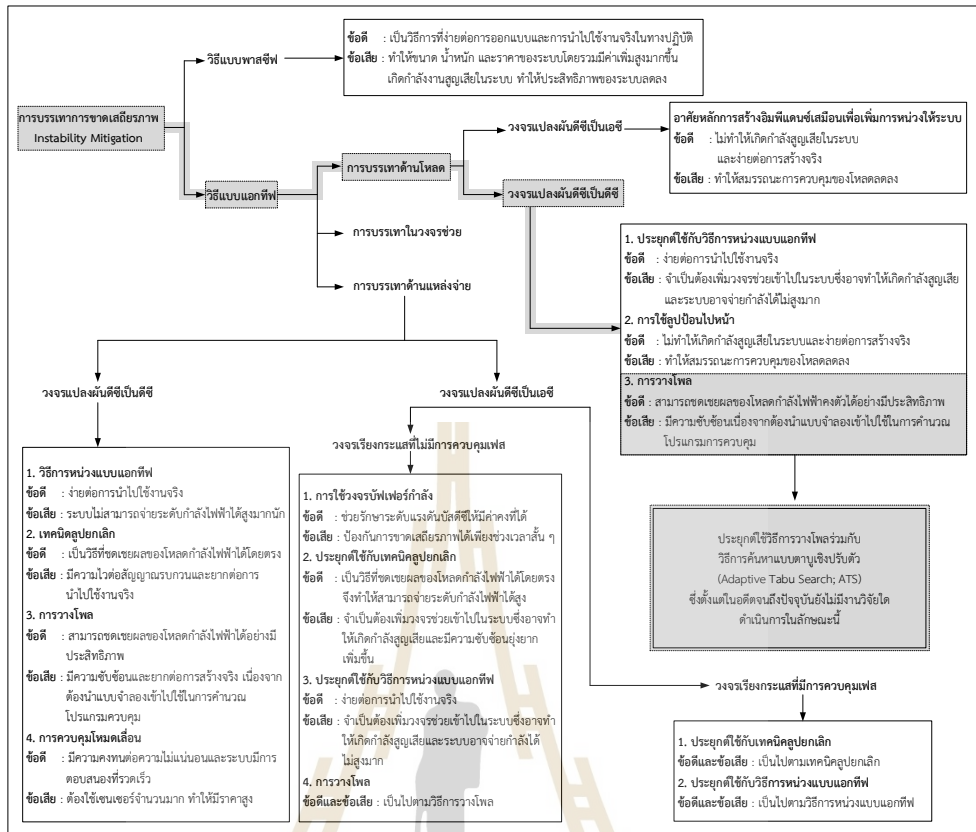
ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2009	Weaver, W.W., and Krein, P.T.	บทความนี้แนะนำเสนอวิธีการควบคุมวงจรบัฟเฟอร์กำลังให้เหมาะสมที่สุดสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
2009	Rahimi, A.M., and Emadi, A.	บทความนี้ได้แนะนำเสนอวิธีการห่วงแบบแยกทีฟในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย
2010	Rahimi, AM., Williamson, G.A., and Emadi, A.	บทความนี้ได้แนะนำเสนอวิธีลูบยกเล็กในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่ ซึ่งเป็นวิธีการที่มีสมรรถนะในการกำจัดค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ
2011	Cespedes, M., Xing, L., and Sun, J.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการแบบพาสซีฟสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าตีสี่เป็นตีสี่
2011	Kim, S., and Williamson, S.S.	บทความนี้แนะนำเสนอการวางโพลเด่นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายเพื่อทำการชดเชยค่าอิมพีแดนซ์ติดลบสำหรับระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน
2012	Kim, S., and Williamson, S.S.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างเสถียรภาพในวงจรแปลงผันกำลังแบบบักที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยวิธีการวางโพล ซึ่งมีหลักการคือการย้ายตำแหน่งโพลที่ขาดเสถียรภาพของระบบให้ไปอยู่ในบริเวณที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ
2012	Radwan, A.A.A., and Mohamed, Y.A.R.I.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการห่วงแบบแยกทีฟสำหรับระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก การเปรียบเทียบการชดเชยด้วยวิธีการห่วงแบบแยกทีฟที่ลูบตัวควบคุม
2014	Kazemlou, S., and Mehraeen, S.	บทความนี้แนะนำเสนอใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการปรับตัวมาใช้สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับวงจรแปลงผันตีสี่เป็นตีสี่

ตารางที่ 2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2015	Wu, M., and Lu, D.D.C.	บทความนี้แนะนำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการชดเชยค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองที่บัสไฟฟ้า กระแสตรงของระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การชดเชยดังกล่าวทำการควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ทางฝั่งแหล่งจ่ายของระบบโครงข่ายดังกล่าว
2018	Areerak, K-N, Sopapim, T., Bozhko, S., Hill, C.I., Suyapan, A., and Areerak, K-L.	บทความนี้แนะนำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีลูบยกเล็กที่มีการปรับตัวได้สำหรับระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้าไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่ไม่มีการควบคุม นอกจากนี้ยังได้มีการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบดังกล่าวด้วยชุดทดสอบจากห้องปฏิบัติการ
2022	Phosung, R., Areerak, K-N., Sopapim, T., and Areerak, K-L.	บทความนี้แนะนำเสนอแนวทางการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีทางฝั่งโหลดที่ประยุกต์ใช้ลูบป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เพื่อปรับปรุงข้อเสียของการบรรเทาเสถียรภาพทางฝั่งโหลดที่ทำให้สมรรถนะการจ่ายโหลดลดลง นอกจากนี้ยังมีการระบุตัวแปรสถานะที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยใช้เมทริกซ์การมีส่วนร่วม (participation matrix)

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบดังตารางที่ 2.4 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ารวมถึงแนวทางที่นำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้กับระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพสรุปการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

จากแผนภาพในรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีการ โดยวิธีการแรกคือวิธีแบบพาสซีฟ ซึ่งอาศัยการปรับเปลี่ยนวงจรกรองด้วยการเพิ่มความจุไฟฟ้าหรือลดค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองสัญญาณดีซี รวมถึงการเพิ่มอุปกรณ์พาสซีฟ ได้แก่ ตัวต้านทาน หรือตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า หรือตัวต้านทานต่ออนุกรมกับขดลวดเหนี่ยวนำเข้าไปในระบบ เพื่อเพิ่มการหน่วงให้กับระบบ ซึ่งส่งผลให้ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดได้เพิ่มมากขึ้น ระบบไฟฟ้าจึงมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น วิธีแบบพาสซีฟนี้มีข้อดีคือ เป็นวิธีที่ง่ายต่อการออกแบบและการนำไปใช้จริงในทางปฏิบัติ แต่มีข้อเสียคือ ทำให้ขนาด น้ำหนัก ราคารวมถึงกำลังงานสูญเสียของระบบโดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่วิธีการที่สอง คือ วิธีแบบแอคทีฟเป็นวิธีการที่อาศัยการสร้างตัวชดเชยขึ้นภายในโครงสร้างการควบคุมเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูงกว่าวิธีแบบพาสซีฟ เนื่องจากไม่มีการปรับเปลี่ยนวงจรกรอง โดยวิธีการนี้แบ่งออกเป็น 3 แนวทาง ได้แก่ การหน่วงแบบแอคทีฟทางด้านแหล่งจ่าย การหน่วงแบบแอคทีฟในวงจรช่วย และการหน่วงแบบแอคทีฟทางด้านโหลด สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แนวทางการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบแอคทีฟทางด้านโหลดด้วยการวางไฟล เนื่องจากไม่ต้องการให้เกิด

กำลังงานสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น อันเนื่องจากการเพิ่มวงจรช่วยระหว่างตำแหน่งจ่ายที่เป็นวงจรเรียงกระแสที่ไม่มีการควบคุมกับด้านโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม อย่างไรก็ตามวิธีการห้วงแบบแอกทีฟทางด้านโหลดมีข้อเสียคือทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดลดลง ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยวิธีการวางโพลที่เป็นการบรรเทาการขาดเสถียรภาพทางด้านโหลดของระบบ นอกจากนี้การออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลจะอาศัยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่าวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวซึ่งคาดการณ์ว่าจะทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโหลดดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงาน จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่าจะไม่มีงานวิจัยใด ๆ ดำเนินการในลักษณะเช่นนี้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยรายละเอียดเกี่ยวกับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพ และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาได้นำเสนอไว้ในลำดับถัดไป

2.6 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม องค์ความรู้ที่ได้นั้นทำให้เกิดความเข้าใจถึงความเป็นมาของผลกระทบที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้า นำมาซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้เห็นถึงจุดการขาดเสถียรภาพของระบบและเป็นข้อมูลสำหรับนำไปใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ อีกทั้งพื้นฐานองค์ความรู้ที่ได้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวิธีการวางโพลสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซึ่งยังไม่มีงานวิจัยในอดีตประยุกต์ใช้วิธีดังกล่าวกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 3

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง เอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัค

3.1 บทนำ

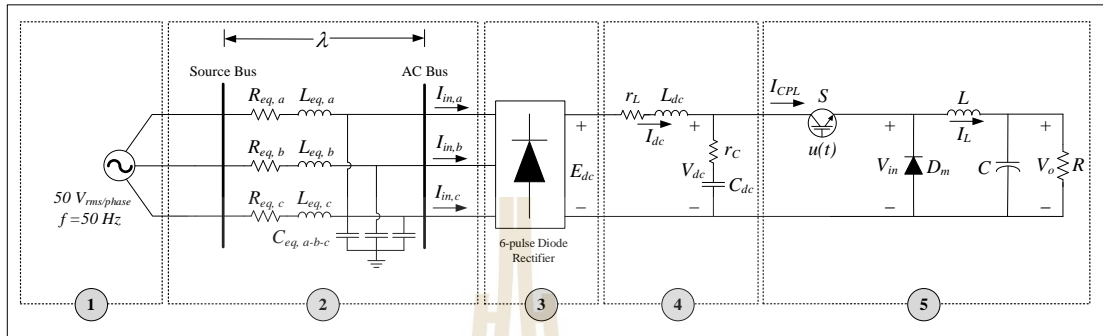
การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากแบบจำลองคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมและความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบภายในระบบซึ่งสามารถนำไปต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพต่อไป โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจร ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนในการนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ด้วยสาเหตุดังกล่าวงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอแนวทางการพิสูจน์หาแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยอาศัยทฤษฎีการแปลงแกนตีความด้วยวิธีการแปลงของพาร์คผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นทั้งในกรณีที่ระบบมีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่ไม่มีการควบคุมและมีการควบคุม สำหรับเนื้อหาในบทที่ 3 นี้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์เสถียรภาพรวมถึงการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ซึ่งจะนำเสนอในบทที่ 4 และในบทที่ 5 เป็นลำดับถัดไป

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่ไม่มีการควบคุม

3.2.1 ระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคที่ไม่มีการควบคุม

ระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคที่ไม่มีการควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสสมดุล ทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้ากระแสสลับ ส่วนที่ 2 ซึ่งเป็นสายส่งกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่ 4 วงจรกรองสัญญาณดีซี ทำหน้าที่ลดกระแสพัลส์และแรงดันพัลส์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรเรียงกระแส

สามเฟสแบบบริดจ์ตามลำดับ และส่วนที่ 5 วงจรแปลงผันแบบบัคที่มีโพลด์เป็นตัวต้านทาน ทำหน้าที่ในการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0 V จนถึงแรงดันเอาต์พุตของวงจรกรองสัญญาณดีซี



รูปที่ 3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโพลด์เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่ไม่มีการควบคุม

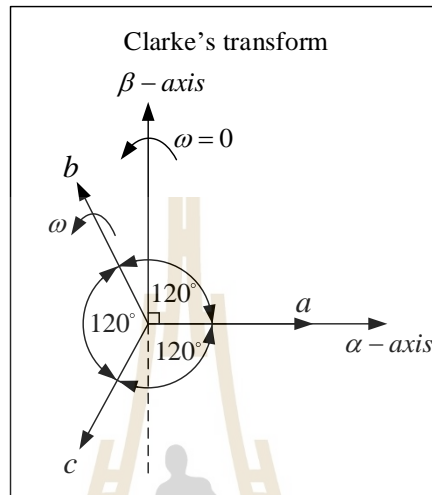
พิจารณาระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 หากทำการวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะทำให้ได้แบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เนื่องจากผลการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์และวงจรแปลงผันแบบบัค ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพรวมถึงการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงนำเสนอวิธีการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้การผสมผสานระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในส่วนแรกจะใช้วิธีดีคิวในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรทางฝั่งเอซี ซึ่งได้แก่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสสมดุล, สายส่งกำลังฝั่งเอซี และวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ สำหรับส่วนที่สองจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการกำจัดสัญญาณการสวิตซ์ของวงจรแปลงผันแบบบัค จากการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการผสมผสานดังกล่าวจะได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้สะดวกมากยิ่งขึ้น

3.2.2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีดีคิว

- การแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transform)

การแปลงของคลาร์กเป็นการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ โดยวิธีการแปลงของคลาร์กแสดงได้ด้วยแผนภาพเวกเตอร์ ดังรูปที่ 3.2 ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสที่มีส่วนประกอบลำดับเฟสบวก (positive sequence) ซึ่งมีมุมห่างกัน 120 องศา หรือ $2\pi/3$ เรเดียน และแกน $\alpha\beta$

จะต้องทำมุมตั้งฉากกันโดยกำหนดให้แกน α วางตัวในแนวเดียวกับเฟส a สำหรับสมการการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ พิจารณาได้ดังสมการที่ (3-1) เมื่อ \mathbf{f}_{abc} คือ ปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสใด ๆ ซึ่งอาจแทนด้วยแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า เป็นต้น



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

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

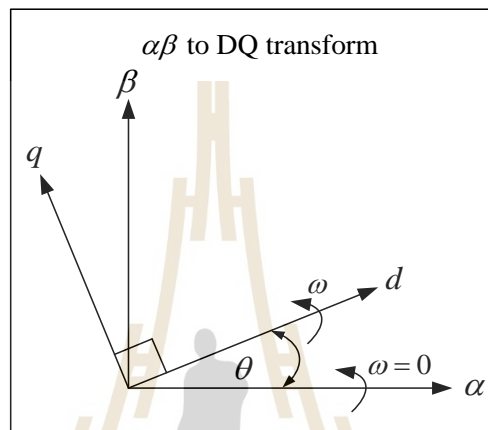
เมื่อ k คือ ตัวปรับคูณการแปลง โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวปรับคูณสำหรับการแปลงอนุรักษ์กำลังไฟฟ้า (power conservation convention) ซึ่งมีค่า $k = \sqrt{2/3}$ (Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M., and Thomas D.W.P., 2008)

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

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

- การแปลงปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน $\alpha\beta$ มายังแกน dq

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



รูปที่ 3.3 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกน $\alpha\beta$ เป็นแกน dq

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

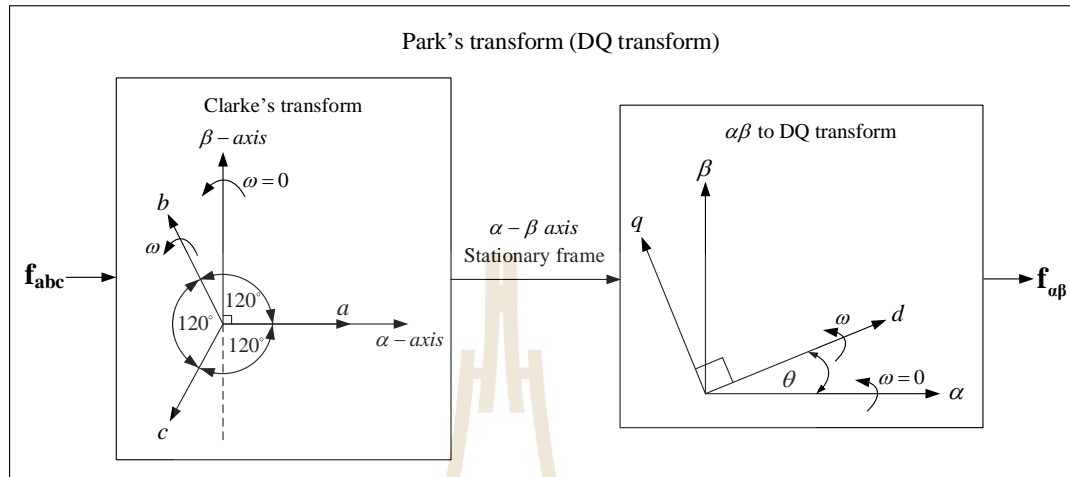
สมการอินเวอร์สการแปลงปริมาณใด ๆ จากแกน $\alpha\beta$ มายังแกน dq แสดงได้ดังสมการที่ (3-4)

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

- วิธีการแปลงของปาร์ค (Park's Transform)

วิธีการแปลงของปาร์คเป็นวิธีการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน dq โดยการแปลงของปาร์คแสดงได้ด้วยแผนภาพเวกเตอร์ดังรูปที่ 3.4 จากรูปสามารถอธิบายได้ว่าแกน d จะตั้งฉากกับแกน q เป็นมุม 90 องศา หรือ $\pi/2$ เรเดียน

สมการการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส (abc) เป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน dq แสดงดังสมการที่ (3-5) และอินเวอร์สการแปลงของปาร์คแสดงดังสมการที่ (3-6)



รูปที่ 3.4 แผนภาพเวกเตอร์การแปลงแกนสามเฟส (abc) เป็นแกน dq

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

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

เมื่อ θ คือ มุมการหมุนสำหรับการแปลงดีคิว ซึ่งมีค่าเท่ากับ ωt

3.2.3 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

จากงานวิจัยในอดีตพบว่าวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี พิจารณาในรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่ามีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัส ซึ่งผลของอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรดังกล่าวจะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็น

แบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นจึงนำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาใช้ในการกำจัดสัญญาณการสวิตช์ ทำให้ได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา สำหรับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier series) ของตัวแปรสถานะของวงจรไปเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ซึ่งอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

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

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

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

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

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

คุณสมบัติที่จำเป็นของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน $\langle x \rangle_k(t)$ โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มีรายละเอียดดังนี้ (กองพัน อารีรักษ์, 2564)

- คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (3-9)

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

- คุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณ แสดงได้ดังสมการที่ (3-10)

$$\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle y \rangle_i \quad (3-10)$$

- ถ้า $f(t)$ คือ ค่าจริง สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนที่ค่า k ดัดลบ แสดงได้ดังสมการที่ (3-11)

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

- คุณสมบัติเวลาเลื่อน แสดงได้ดังสมการที่ (3-12)

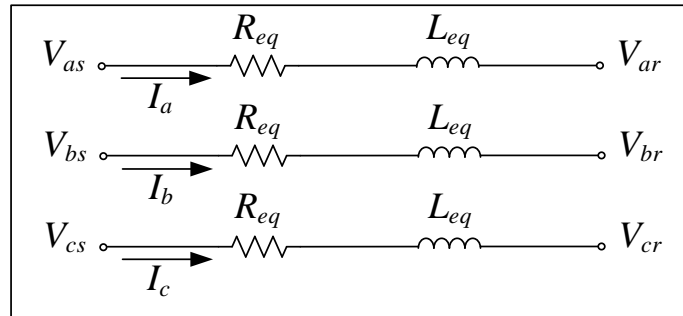
$$\text{ถ้า } f(t) \rightarrow f(t-\tau) \text{ จะได้ } \langle x \rangle_k \rightarrow \langle x \rangle_k e^{-\left(j\frac{2\pi k\tau}{T}\right)} \quad (3-12)$$

การพิจารณาแบบจำลองของวงจรแปลงผันแบบบัตในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะไม่พิจารณาผลของฮาร์มอนิกในอันดับที่มากกว่าศูนย์ เนื่องจากไม่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงใช้การประมาณอันดับศูนย์ (zero-order approximation) ของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน (Mahdavi J., Emadi A., Bellar M.D. and Ehsani M., 1997) เพื่อหาเพียงสัมประสิทธิ์ที่ความถี่มูลฐาน โดยการกำหนดค่า k ของอนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อนให้มีค่าเท่ากับศูนย์

3.2.4 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีตีควรร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นตีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัตที่ไม่มีการควบคุมจะอาศัยทฤษฎีการแปลงตีควของปาร์คผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตซ์ในวงจรไปเป็นแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยสามารถพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนทางด้านแหล่งจ่ายจะใช้วิธีตีควและส่วนทางด้านโหลดจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

จากรูปที่ 3.1 พิจารณาวงจรทางด้านแหล่งจ่าย ประกอบไปด้วย วงจรสมมูลสายส่ง ที่มีตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ รวมถึงวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ในขั้นแรกพิจารณาวงจรสมมูลสายส่งที่มีตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์ดังกล่าวได้ดังสมการที่ (3-13) (เทพพนม โสภาเพิ่ม, 2554; จักรกริช ภัคดีโต, 2557; รัฐพล โพธิ์สังข์, 2563)



รูปที่ 3.5 ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส

$$\Delta \mathbf{V}_{\text{drop,abc}} = R_{eq} \mathbf{I}_{abc} + L_{eq} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{abc} \quad (3-13)$$

จากสมการที่ (3-13) สามารถแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสายส่งกำลังไฟฟ้า ($\Delta \mathbf{V}_{\text{drop,abc}}$) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้า (\mathbf{I}_{abc}) จากปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟส ไปเป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน dq โดยอาศัยสมการการแปลงของปาร์คและอินเวอร์สการแปลงของปาร์ค ในสมการที่ (3-5) และ (3-6) ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดแสดงดังสมการที่ (3-14) ถึง (3-17)

$$\mathbf{K}^{-1} \Delta \mathbf{V}_{dq} = R_{eq} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq}) + L_{eq} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq}) \quad (3-14)$$

$$\mathbf{K} \mathbf{K}^{-1} \Delta \mathbf{V}_{dq} = R_{eq} (\mathbf{K} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq}) + L_{eq} \mathbf{K} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq}) \quad (3-15)$$

$$\Delta \mathbf{V}_{dq} = R_{eq} \mathbf{I}_{dq} + L_{eq} \mathbf{K} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{dq}) \quad (3-16)$$

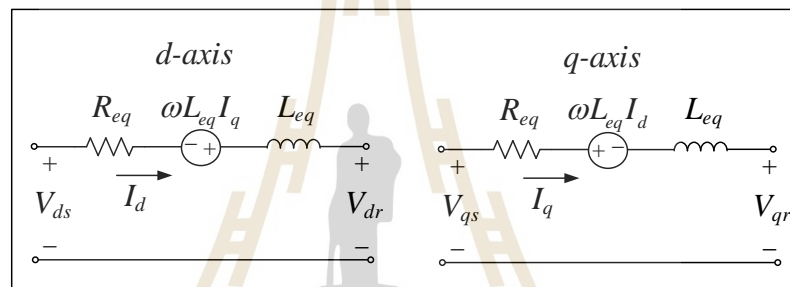
$$\Delta \mathbf{V}_{dq} = R_{eq} \mathbf{I}_{dq} + L_{eq} \mathbf{K} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{K}^{-1} \right) \mathbf{I}_{dq} + L_{eq} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{I}_{dq} \right) \quad (3-17)$$

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

ดังนั้นสามารถเขียนสมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกน dq ได้ดังสมการที่ (3-18)

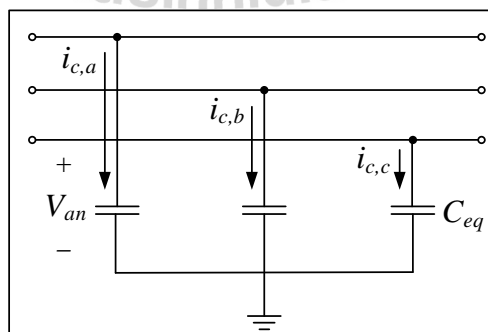
$$\begin{cases} \Delta V_d = R_{eq} I_d - \omega L_{eq} I_q + L_{eq} \frac{d}{dt} I_d \\ \Delta V_q = R_{eq} I_q + \omega L_{eq} I_d + L_{eq} \frac{d}{dt} I_q \end{cases} \quad (3-18)$$

จากสมการที่ (3-18) สามารถนำมาเขียนวงจรสมมูลของตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 ให้อยู่บนแกน dq ได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลตีควของตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า

ในลักษณะเดียวกันสามารถพิจารณาเฉพาะส่วนของตัวเก็บประจุของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งสามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3-19)



รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟส

$$\mathbf{I}_{c,abc} = C_{eq} \frac{d}{dt} \mathbf{V}_{abc} \quad (3-19)$$

จากสมการที่ (3-19) สามารถแปลงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ ($\mathbf{I}_{c,abc}$) และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ (\mathbf{V}_{abc}) จากปริมาณทางไฟฟ้าสามเฟสไปเป็นปริมาณทางไฟฟ้าบนแกน dq โดยอาศัยสมการการแปลงของพาร์คและอินเวอร์สการแปลงของพาร์คในสมการที่ (3-5) และ (3-6) ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังสมการที่ (3-20) ถึง (3-22)

$$\mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{c,abc} = C_{eq} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}_{abc}) \quad (3-20)$$

$$\mathbf{K} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{I}_{c,dq} = C_{eq} \mathbf{K} \frac{d}{dt} (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{V}_{dq}) \quad (3-21)$$

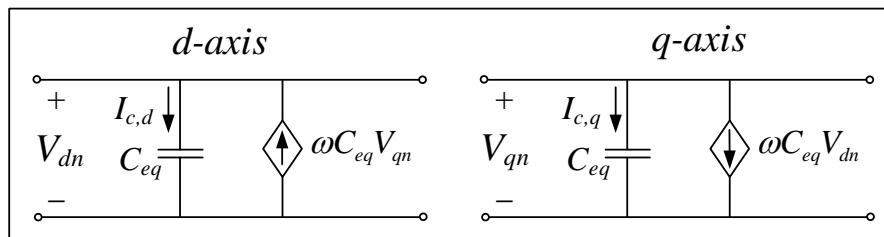
$$\mathbf{I}_{c,dq} = C_{eq} \mathbf{K} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{K}^{-1} \right) \mathbf{V}_{dq} + C_{eq} \frac{d}{dt} (\mathbf{V}_{dq}) \quad (3-22)$$

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

ดังนั้น สามารถเขียนสมการของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งกำลังไฟฟ้าบนแกน dq ได้ดังสมการที่ (3-23)

$$\begin{cases} I_{c,d} = -\omega C_{eq} V_q + C_{eq} \frac{d}{dt} V_d \\ I_{c,q} = \omega C_{eq} V_d + C_{eq} \frac{d}{dt} V_q \end{cases} \quad (3-23)$$

จากสมการที่ (3-23) สามารถนำไปใช้ในการสร้างวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุที่ขนานกันในของวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าสามเฟสที่อยู่บนแกนดีควแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลคิวกของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า

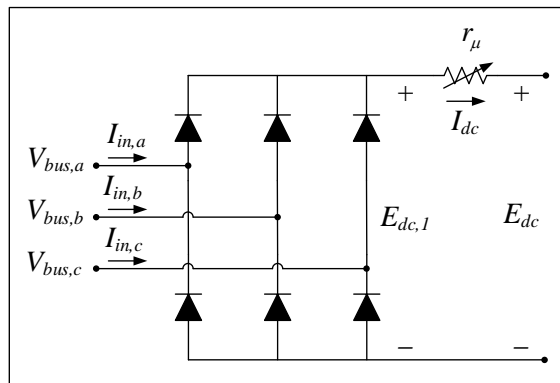
ในลำดับต่อมาจะเป็นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีไดโอดเป็นอุปกรณ์สวิตช์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำหลักการแปลงของปาร์คมาใช้ในการกำจัดสัญญาณการสวิตช์ของไดโอดในวงจรเรียงกระแส ซึ่งทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เป็นแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยการพิสูจน์หาแบบจำลองดังกล่าวจะต้องอยู่ภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้

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

อย่างไรก็ตามผลจาก L_{eq} ในสายส่งกำลังไฟฟ้าส่งผลกระทบทำให้เกิดมุมเหลื่อมและทำให้แรงดันเอาต์พุตต่ำลง ผลกระทบเหล่านี้สามารถแทนได้ด้วยการใส่ตัวต้านทานเสมือนที่ปรับค่าได้ r_μ เข้าไปในวงจรทางด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 โดยที่ค่า r_μ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-24)

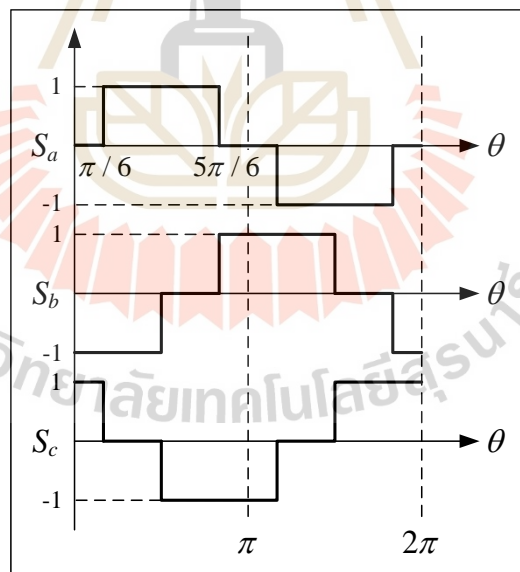
$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (3-24)$$

เมื่อ ω คือ ความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่ายไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีความต้านทานปรับค่าได้

จากรูปที่ 3.9 กำหนดให้ $E_{dc,1}$ แทนแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโดยไม่พิจารณามุมเหลื่อม ในขณะที่ E_{dc} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่พิจารณาผลของมุมเหลื่อมแล้ว การวิเคราะห์สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบจากมุมเหลื่อมสามารถแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์

จากสัญญาณการสวิตช์ S_{abc} ในรูปที่ 3.10 พบว่าเป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งสามารถใช้อนุกรมฟูรีเยร์ โดยพิจารณาเฉพาะความถี่มูลฐานมาดำเนินการวิเคราะห์ เนื่องจากฮาร์มอนิกไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นจะได้สัญญาณการสวิตช์ของวงจรเรียงกระแส แสดงได้ดังสมการที่ (3-25)

$$\mathbf{S}_{abc} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\sin(\omega t + \phi) \quad \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \phi) \quad \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \phi) \right] \quad (3-25)$$

เมื่อ ϕ คือ มุมเฟสที่บัสไฟฟ้ากระแสสลับ

จากสัญญาณการสวิตช์ในสมการที่ (3-25) สามารถทำการแปลงสัญญาณการสวิตช์ดังกล่าวให้อยู่บนแกนดีควิโดยใช้สมการที่ (3-5) และ (3-6) จะได้ดังนี้

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

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

เมื่อกำหนดให้ $\theta = \omega t - \frac{\pi}{2} + \phi_1$ จะได้สัญญาณการสวิตช์ที่อยู่บนแกนดีควิดังสมการที่ (3-26)

$$\mathbf{S}_{dq} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \begin{bmatrix} \cos(\phi - \phi_1) \\ \sin(\phi - \phi_1) \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

เมื่อ ϕ_1 คือ มุมเฟสที่ใช้ในการหมุนแกน dq

พิจารณาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าระหว่างด้านอินพุตและด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์แสดงดังสมการที่ (3-27) และ (3-28) ดังนี้

$$\mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{S}_{abc} \mathbf{I}_{dc} \quad (3-27)$$

$$\mathbf{E}_{dc,1} = \mathbf{S}_{abc}^T \mathbf{V}_{bus,abc} \quad (3-28)$$

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

จากนั้นทำการแปลงสมการที่ (3-27) ให้อยู่บนแกนดีควิ โดยใช้สมการที่ (3-5) จะได้สมการความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่อยู่บนแกนดีควิดังสมการที่ (3-29)

$$\mathbf{K} \mathbf{I}_{in,abc} = \mathbf{K} \mathbf{S}_{abc} I_{dc}$$

$$\begin{cases} I_{in,d} = S_d I_{dc} \\ I_{in,q} = S_q I_{dc} \end{cases} \quad (3-29)$$

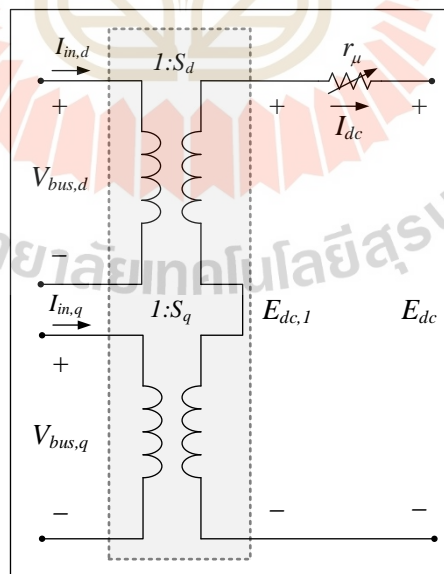
ทำการแปลงสมการที่ (3-28) ให้อยู่บนแกนดีคว โดยใช้สมการที่ (3-5) จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่อยู่บนแกนดีควดังสมการที่ (3-30) ดังนี้

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

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

$$E_{dc,1} = S_d V_{bus,d} + S_q V_{bus,q} \quad (3-30)$$

จากสมการที่ (3-29) และ (3-30) สามารถเขียนวงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสสามเฟสบนแกนดีควที่อยู่ในรูปของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบอุดมคติได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์บนแกนหมุนดีคว

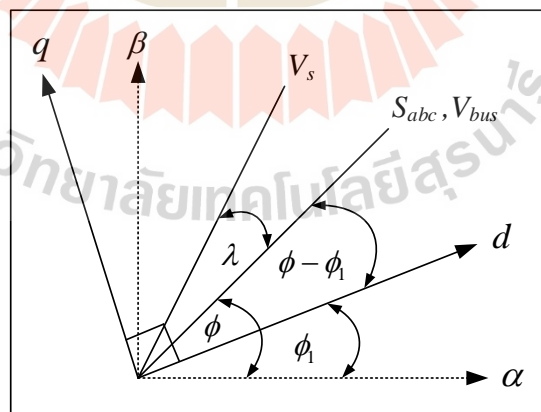
ในลำดับถัดไปจะเป็นการแปลงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงบนแกนดีคิวโดยพิจารณาจากสมการของแหล่งจ่าย แสดงดังสมการที่ (3-31)

$$\begin{bmatrix} V_{s,a} \\ V_{s,b} \\ V_{s,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \sin(\omega t) \\ V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3-31)$$

ทำการแปลงสมการที่ (3-31) ให้อยู่บนแกนดีคิว โดยใช้สมการที่ (3-5) จะได้สมการแหล่งจ่ายบนแกนดีคิว ดังสมการที่ (3-32)

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} V_m \cos(\lambda + \phi - \phi_1) \\ V_m \sin(\lambda + \phi - \phi_1) \end{bmatrix} \quad (3-32)$$

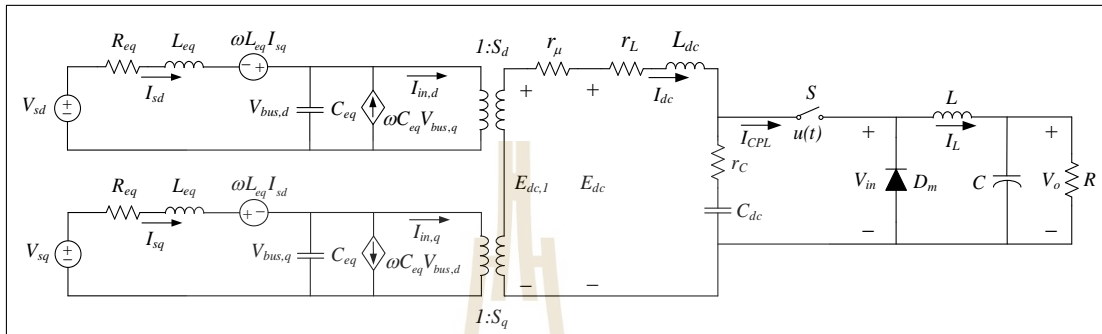
จากสมการที่ (3-26) และ (3-32) เป็นสมการการแปลงสัญญาณการสวิตช์ของไดโอดและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้อยู่บนแกนหมุนดีคิว ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพเวกเตอร์ของสมการดังกล่าวได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนภาพเวกเตอร์สำหรับการแปลงดีคิว

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 พบว่าเมื่อทำการแปลงวงจรทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้อยู่บนแกนหมุนดีคิวโดยอาศัยสมการการแปลงของพาร์คและอินเวอร์ส

การแปลงของพาร์คในสมการที่ (3-5) และ (3-6) จะทำให้ได้วงจรสมมูลบนแกนดีควที่เป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งเป็นวงจรที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยทฤษฎีวงจไฟฟ้าพื้นฐาน อีกทั้งยังสามารถกำจัดสัญญาณการสวิตช์ของไดโอดในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา



รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคว

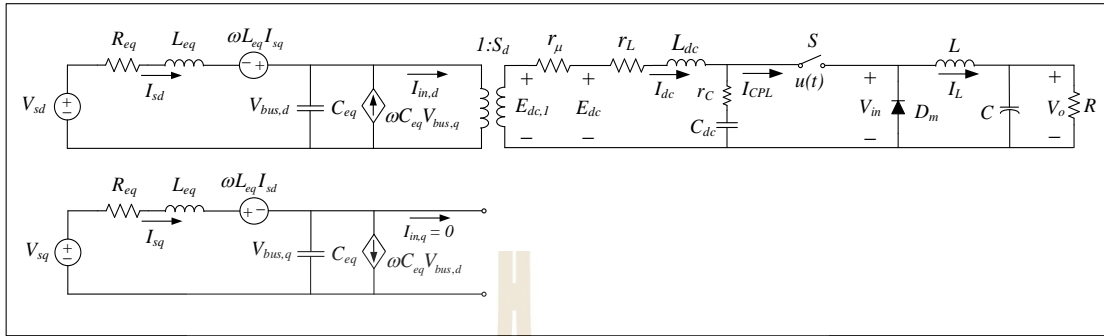
จากสมการที่ (3-26) และสมการที่ (3-32) สามารถทำให้วงจรสมมูลบนแกนดีควที่แสดงในรูปที่ 3.13 อยู่ในรูปของวงจอย่างง่ายได้ ด้วยการกำหนดให้ $\phi_1 = \phi$ และจากการกำหนดค่าตัวแปรดังกล่าวสามารถเขียนสมการอัตราส่วนหม้อแปลงและแรงดันไฟฟ้าบนแกนดีควได้ดังสมการที่ (3-33) และ (3-34) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-33)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} V_m \cos(\lambda) \\ V_m \sin(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3-34)$$

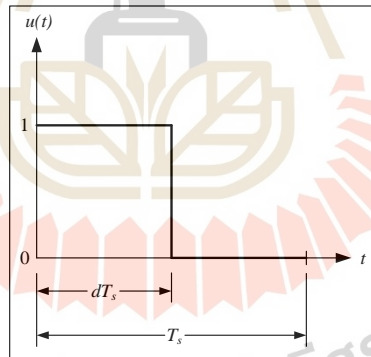
จากสมการที่ (3-33) และ (3-34) จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนหม้อแปลงบนแกนดีคว (S_q) มีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้มุมของฟังก์ชันการแปลงแหล่งจ่ายบนแกนดีและแกนควจะเหลือเพียง λ เป็นผลให้วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าบนแกนดีควที่ได้จากสมการดังกล่าวเป็นวงจรสมมูลอย่างง่าย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.14 อย่างไรก็ตามในรูปที่ 3.14 พบว่าทางด้านโหลดยังคงปรากฏสวิตช์ที่อยู่ในวงจรแปลงผันแบบบัท หากทำการพิสูจน์แบบจำลองจากรูปดังกล่าวจะทำให้ได้แบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอันเนื่องมาจากผลของการสวิตช์ S ดังนั้นจึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการ

กำจัดสัญญาณการสวิตช์เพื่อให้ได้แบบจำลองของทั้งระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.3 ที่ผ่านมา



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนดีคิว

ในลำดับถัดมาจะพิจารณาสัญญาณการสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัก ซึ่งมีลักษณะการทำงานในโหมดการนำกระแสและหยุดนำกระแสในหนึ่งคาบการสวิตช์ (T_s) แสดงได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก

จากรูปที่ 3.15 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก แสดงดังสมการที่ (3-35)

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (3-35)$$

โดยที่ d คือ วัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของอุปกรณ์สวิตช์ S

จากรูปที่ 3.14 พิจารณาวงจรแปลงผันแบบบัพพบว่าเมื่อสวิตช์ S ปิด จะทำให้ $I_{CPL} = I_L$ และ $V_{in} = V_{dc}$ และเมื่อสวิตช์ S เปิด จะทำให้ $I_{CPL} = 0$ และ $V_{in} = 0$ (สมมติให้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด D_m มีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ เมื่อไดโอดนำกระแส) จากความสัมพันธ์ของ I_{CPL} กับ I_L สามารถเขียนสมการที่อยู่ในรูป $u(t)$ แสดงดังสมการที่ (3-36)

$$I_{CPL} = u(t)I_L \quad (3-36)$$

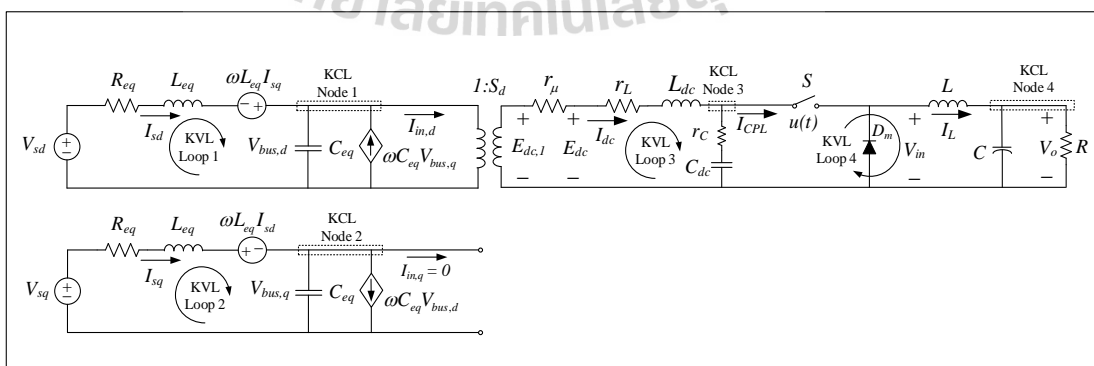
พิจารณาความสัมพันธ์ของ V_{in} กับ V_{dc} สามารถเขียนสมการที่อยู่ในรูป $u(t)$ แสดงดังสมการที่ (3-37)

$$V_{in} = u(t)V_{dc} \quad (3-37)$$

จากสมการที่ (3-36) และ (3-37) พบว่ามีสัญญาณการสวิตช์ปรากฏอยู่ โดยสัมพันธ์กับพัลส์เชิงซ้อนของ $u(t)$ ซึ่งจะพิจารณาเพียงการประมาณอันดับศูนย์เท่านั้น แสดงดังสมการที่ (3-38)

$$\langle u \rangle_0(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} u(t) e^{j\omega t} dt = d \quad (3-38)$$

สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าจะอาศัยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law: KVL) และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law: KCL) ในการวิเคราะห์วงจรสมมูลอย่างง่ายในรูปที่ 3.16 แสดงได้ดังสมการที่ (3-39) ถึง (3-46)



รูปที่ 3.16 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- พิจารณา Loop 1 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

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

$$\dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \quad (3-39)$$

- พิจารณา Loop 2 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

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

$$\dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \quad (3-40)$$

- พิจารณา Node 1 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$I_{sd} - C_{eq} \dot{V}_{bus,d} + \omega C_{eq} V_{bus,q} - I_{in,d} = 0$$

เมื่อ $I_{in,d} = S_d I_{dc}$ และ $S_d = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi}$

$$\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{dc} \quad (3-41)$$

- พิจารณา Node 2 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$I_{sq} - C_{eq} \dot{V}_{bus,q} - \omega C_{eq} V_{bus,d} - I_{in,q} = 0$$

$$\dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \quad (3-42)$$

- พิจารณา Loop 3 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

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

แยกพิจารณาระหว่างโหมตการนำกระแสและโหมตหยุดนำกระแสของสวิตช์ในวงจร
แปลงผันแบบบักจะได้ว่า

$$V_{r_c} = r_c(I_{dc} - I_L u(t))$$

$$\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_c}{L_{dc}} I_L u(t) \quad (3-43)$$

- พิจารณา Node 3 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$I_{dc} - C_{dc} \dot{V}_{dc} - I_L u(t) = 0$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{u(t)}{C_{dc}} I_L \quad (3-44)$$

- พิจารณา Loop 4 โดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์

$$-V_{dc} u(t) + L \dot{I}_L + V_o = 0$$

$$\dot{I}_L = \frac{u(t)}{L} V_{dc} - \frac{1}{L} V_o \quad (3-45)$$

- พิจารณา Node 4 โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์

$$I_L - C \dot{V}_o - \frac{V_o}{R} = 0$$

$$\dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \quad (3-46)$$

จากการพิสูจน์สมการที่ (3-39) ถึง (3-46) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร
สมมูลบนแกนดีควิในรูปแบบที่ 3.16 แสดงได้ดังสมการที่ (3-47)

$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\ \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_{\mu} + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_C u(t)}{L_{dc}} I_L \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{u(t)}{C_{dc}} I_L \\ \dot{I}_L = \frac{u(t)}{L} V_{dc} - \frac{1}{L} V_o \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \end{cases} \quad (3-47)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-47) ยังคงเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา
เนื่องจากผลของสัญญาณสวิตช์ $u(t)$ ที่เกิดจากวงจรแปลงผันแบบบัก เพื่อกำจัดพจน์ตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา
ดังกล่าวจึงได้นำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาประยุกต์ใช้ โดยสามารถกำหนดตัวแปรสถานะ
ของแบบจำลองในสมการที่ (3-47) ให้เป็นตัวแปรสถานะในรูปของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน
ที่เลือกใช้การประมาณค่าอันดับศูนย์ แสดงได้ดังสมการที่ (3-48)

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle I_{sd} \rangle_0 = I_{sd} \\ \langle I_{sq} \rangle_0 = I_{sq} \\ \langle V_{bus,d} \rangle_0 = V_{bus,d} \\ \langle V_{bus,q} \rangle_0 = V_{bus,q} \\ \langle I_{dc} \rangle_0 = I_{dc} \\ \langle V_{dc} \rangle_0 = V_{dc} \\ \langle I_L \rangle_0 = I_L \\ \langle V_o \rangle_0 = V_o \end{array} \right. \quad (3-48)$$

จากสมการที่ (3-48) สามารถนำวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปมาใช้ร่วมกับแบบจำลองในสมการที่ (3-47) ได้โดยอาศัยคุณสมบัติของสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนในสมการที่ (3-9) ทำให้ได้สมการอนุพันธ์ของแบบจำลองแสดงดังสมการที่ (3-49)

$$\begin{aligned} \langle \dot{I}_{sd} \rangle_0 &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} \langle I_{sd} \rangle_0 + \omega \langle I_{sq} \rangle_0 - \frac{1}{L_{eq}} \langle V_{bus,d} \rangle_0 + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\ \langle \dot{I}_{sq} \rangle_0 &= -\omega \langle I_{sd} \rangle_0 - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} \langle I_{sq} \rangle_0 - \frac{1}{L_{eq}} \langle V_{bus,q} \rangle_0 + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\ \langle \dot{V}_{bus,d} \rangle_0 &= \frac{1}{C_{eq}} \langle I_{sd} \rangle_0 + \omega \langle V_{bus,q} \rangle_0 - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} \langle I_{dc} \rangle_0 \\ \langle \dot{V}_{bus,q} \rangle_0 &= \frac{1}{C_{eq}} \langle I_{sq} \rangle_0 - \omega \langle V_{bus,d} \rangle_0 \\ \langle \dot{I}_{dc} \rangle_0 &= \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} \langle V_{bus,d} \rangle_0 - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} \langle I_{dc} \rangle_0 - \frac{1}{L_{dc}} \langle V_{dc} \rangle_0 \\ &\quad + \frac{r_C}{L_{dc}} \langle u(t) \rangle_0 \langle I_L \rangle_0 \\ \langle \dot{V}_{dc} \rangle_0 &= \frac{1}{C_{dc}} \langle I_{dc} \rangle_0 - \frac{1}{C_{dc}} \langle u(t) \rangle_0 \langle I_L \rangle_0 \\ \langle \dot{I}_L \rangle_0 &= \frac{1}{L} \langle u(t) \rangle_0 \langle V_{dc} \rangle_0 - \frac{1}{L} \langle V_o \rangle_0 \\ \langle \dot{V}_o \rangle_0 &= \frac{1}{C} \langle I_L \rangle_0 - \frac{1}{RC} \langle V_o \rangle_0 \end{aligned} \quad (3-49)$$

ลำดับถัดมาจะทำการแทนค่า V_{sd} และ V_{sq} ด้วยสมการที่ (3-34) แทนค่า $\langle u(t) \rangle_0$ ด้วยสมการที่ (3-38) และแทนค่าสมการที่ (3-48) ลงในสมการที่ (3-49) จะได้ผลลัพธ์แสดงดังสมการที่ (3-50)

$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_C d}{L_{dc}} I_L \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{d}{C_{dc}} I_L \\ \dot{I}_L = \frac{d}{L} V_{dc} - \frac{1}{L} V_o \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \end{cases} \quad (3-50)$$

จากสมการที่ (3-50) สามารถเขียนสมการเป็นแบบจำลองสถานะได้ดังสมการที่ (3-51)

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u} \end{cases} \quad (3-51)$$

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

ตัวแปรอินพุต คือ $\mathbf{u} = [V_m]$

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

รายละเอียดของ $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ ในสมการที่ (3-51) แสดงได้ดังนี้

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

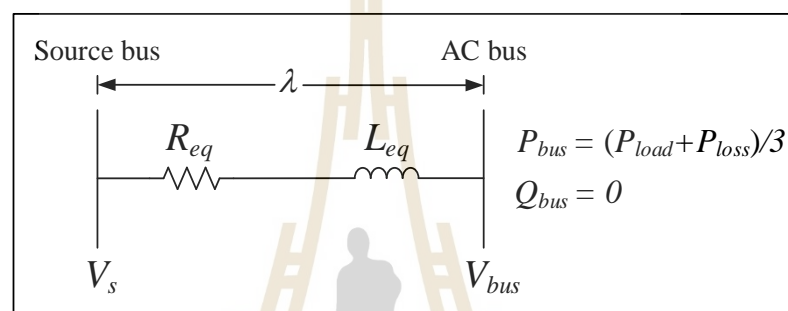
$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(\lambda) \\ \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\lambda) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{8 \times 1}$$

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

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

3.2.5 การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว

การคำนวณค่าในสภาวะคงตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-51) มีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากในเมทริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix) ยังมีพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าอยู่ นั่นคือ λ หรือค่าความต่างเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสเอซี ซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว โดยพิจารณาระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้เป็นแบบต่อหนึ่งเฟสเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และไม่พิจารณาความจุไฟฟ้าของวงจรสมมูลสายส่ง เนื่องจากมีค่าน้อยมาก แสดงระบบต่อหนึ่งเฟสได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 สายส่งกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 3.17 สามารถเขียนขั้นตอนการพิสูจน์หาสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังนี้

จาก $S = VI^* = P_{bus} + jQ_{bus}$

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

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

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

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

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

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

ดังนั้นสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (3-52)

$$\begin{cases} \frac{V_{bus}V_s \cos(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \cos \angle(\gamma)}{Z} = P_{bus} \\ \frac{V_{bus}V_s \sin(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \sin \angle(\gamma)}{Z} = Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-52)$$

เมื่อ V_{bus} คือ แรงดันเฟสที่บัสเอช λ คือ มุมต่างเฟสระหว่าง V_s และ V_{bus} และ Z คือ ขนาดอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยที่กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่พิจารณาที่บัสเอช แสดงดังสมการที่ (3-53)

$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{1}{3} \left(\frac{V_o^2}{R} + P_{loss} \right) \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-53)$$

จากสมการที่ (3-53) สามารถคำนวณหาผลเฉลยได้โดยใช้วิธีการเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน-ราฟสัน ดูได้จากภาคผนวก ก ซึ่งทำให้ได้ค่า λ เพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

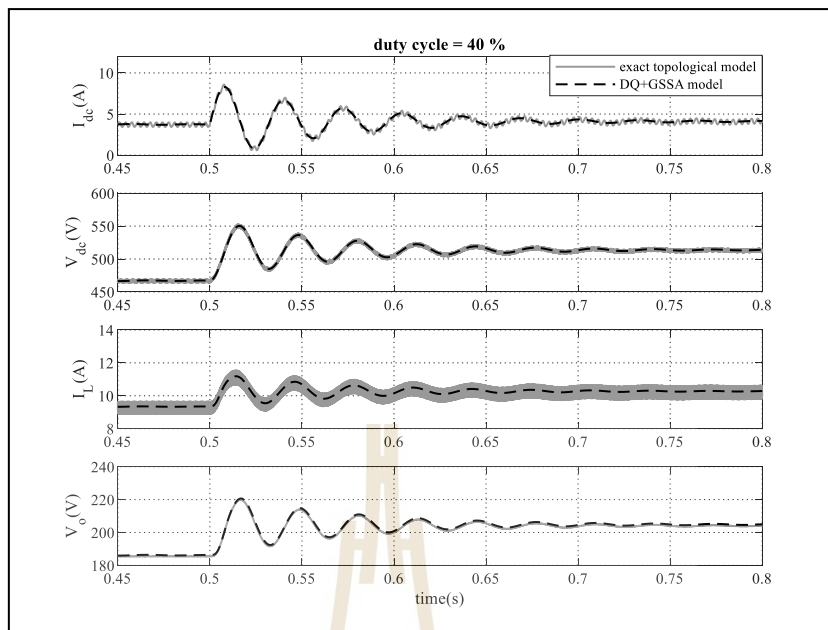
3.2.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต้องอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-48) กับการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปแบบที่ 3.1 ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB แสดงไว้ในภาคผนวก ข.1 เพื่อพิจารณาพฤติกรรมทางพลวัตของระบบที่เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ของระบบ โดยกำหนดให้พารามิเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบ แสดงดังตารางที่ 3.1

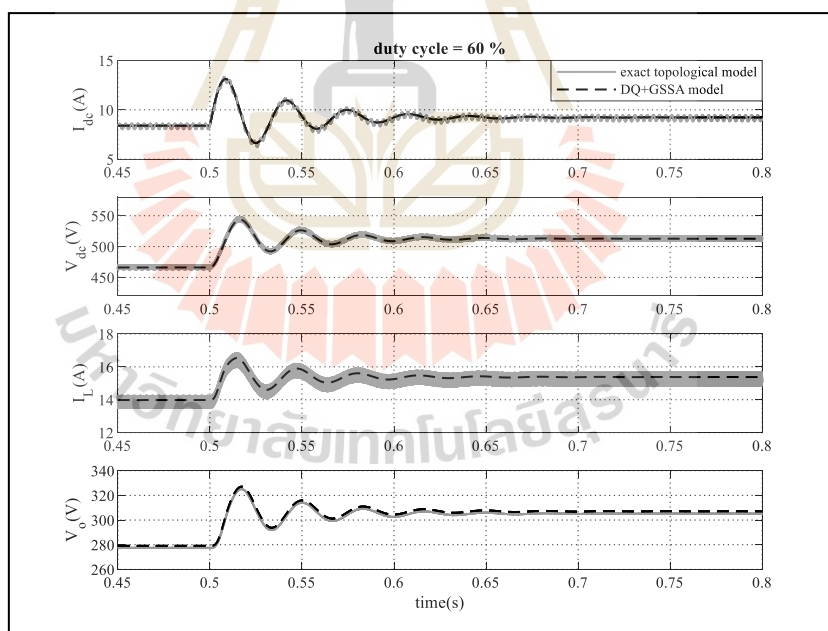
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	50 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของวงจรสมมูลสายส่ง
L_{eq}	24 μ H	ความเหนี่ยวนำของวงจรสมมูลสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของวงจรสมมูลสายส่ง
r_L	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_{dc}	30 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_C	0.4 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_{dc}	500 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
L ($\Delta I_L \leq 0.1$ A)	15 mH	ความเหนี่ยวนำของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก
C ($\Delta V_C \leq 10$ mV)	125 μ F	ความจุไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก
R	20 Ω	ความต้านทานของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก

ผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำในวงจรกรองสัญญาณดีซี (I_{dc}) และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุในวงจรกรองสัญญาณดีซี (V_{dc}) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำในวงจรแปลงผันแบบบัก (I_L) และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_o) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ด้วยวิธีตีความผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันอินพุตจาก 200 V_{rms} ไปเป็น 250 V_{rms} ที่เวลา 0.5 วินาที โดยในรูปที่ 3.18 ได้ทำการปรับค่า $d = 40\%$ และรูปที่ 3.19 ทำการปรับค่า $d = 60\%$ โดยที่ d คือค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัก



รูปที่ 3.18 ผลการตอบสนอง เมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่ $d = 40\%$



รูปที่ 3.19 ผลการตอบสนอง เมื่อค่าวัฏจักรหน้าที่ $d = 60\%$

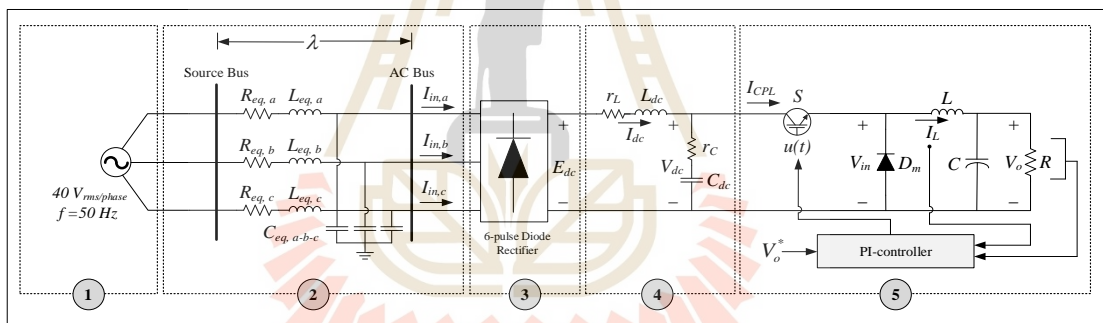
จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามรูปที่ 3.18 และ 3.19 พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถให้ผลตอบสนองที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB ทั้งในส่วนของการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะคงตัว

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีการผสมผสานระหว่างวิธีดีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปที่ได้อธิบายไว้ในบทนี้มีความถูกต้อง สามารถนำไปใช้ได้จริง และยังสามารถพัฒนาเพื่อต่อยอดเป็นแบบจำลองของระบบที่มีตัวควบคุม เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม

3.3.1 ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม

ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.20 แบ่งออกเป็น 5 ส่วน โดยส่วนที่ 1 ถึงส่วนที่ 4 เป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกับวงจรในรูปที่ 3.1 สำหรับส่วนที่ 5 คือ วงจรแปลงผันแบบบักที่มีการเพิ่มตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมพีไอ

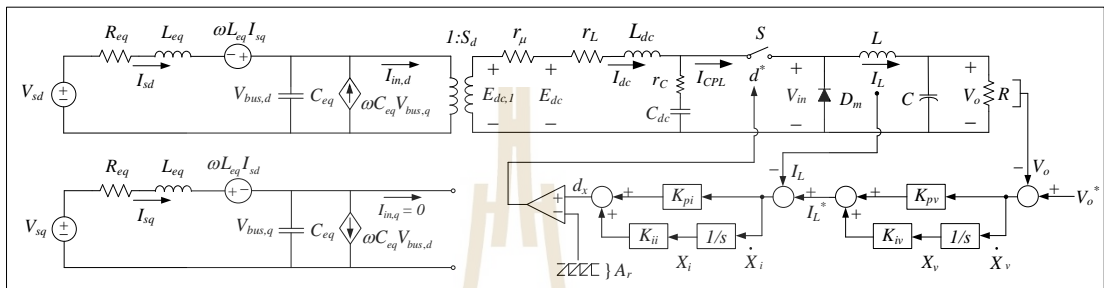


รูปที่ 3.20 ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม

จากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.20 เมื่อพิจารณาวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์สามารถนำองค์ความรู้ในการแปลงดีคิควด้วยวิธีการแปลงของพาร์คในหัวข้อที่ 3.2.2 มาใช้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ให้อยู่บนแกนดีคิคว ซึ่งรายละเอียดของการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีนี้ที่วงจรแปลงผันแบบบักมีตัวควบคุมจะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.3.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีตีควรร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 3.20 ให้อยู่บนแกนตีคว เมื่อกำหนดมุมเฟสการหมุนของสัญญาณการสวิตช์ ($\phi = \phi_1$) จะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานบนแกนตีคว เมื่อกำหนดให้ $\phi = \phi_1$

เมื่อพิจารณาในส่วนของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม จะเห็นได้ว่าทางฝั่งโหลดมีการใช้ตัวควบคุมพีโอที่มีโครงสร้างภายในแบ่งออกเป็น 2 ลูป ได้แก่ ลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตซึ่งเป็นลูปนอก (outer loop) และลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเป็นลูปใน (inner loop) สำหรับสัญญาณการควบคุม (control signal) จากตัวควบคุมพีโอที่กำหนดให้เป็น d_x สัญญาณนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (sawtooth signal) เพื่อสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM signal) และป้อนเข้าสู่สวิตช์ S ค่าวัฏจักรการทำงาน (d^*) ของสวิตช์ S สามารถหาได้จากสมการที่ (3-54)

$$d^* = \frac{1}{A_r} [K_{pv} K_{pi} V_o^* - K_{pv} K_{pi} V_o + K_{pi} K_{iv} X_v - K_{pi} I_L + K_{ii} X_i] \quad (3-54)$$

เมื่อ K_{pv} , K_{iv} , K_{pi} และ K_{ii} คือ พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีโอ

A_r คือ ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยมของตัวควบคุมพีโอ

พิจารณาในส่วนของตัวควบคุมพีโอจะเห็นได้ว่า X_v ของลูปแรงดันและ X_i ของลูปกระแสจะถูกกำหนดเป็นตัวแปรสถานะเพิ่มเข้าไปในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมสามารถดำเนินการได้โดยการ

แทนค่า d ในสมการที่ (3-50) ในหัวข้อที่ 3.2.4 ด้วย d^* ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3-54) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.20 ที่ได้รับการพิสูจน์แบบจำลองด้วยวิธีตีความผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปแสดงดังสมการที่ (3-55)

$$\begin{cases}
 \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\
 \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\
 \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{eq}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_C K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} V_o^* I_L \\
 \quad - \frac{r_C K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} V_o I_L + \frac{r_C K_{pi} K_{iv}}{A_r L_{dc}} X_v I_L + \frac{r_C K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L^2 + \frac{r_C K_{ii}}{A_r L_{dc}} X_i I_L \\
 \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{K_{pv} K_{pi}}{C_{dc}} V_o^* I_L + \frac{K_{pv} K_{pi}}{C_{dc}} V_o I_L - \frac{K_{pi} K_{iv}}{C_{dc}} X_v I_L \\
 \quad + \frac{K_{pi}}{C_{dc}} I_L^2 - \frac{K_{ii}}{C_{dc}} X_i I_L \\
 \dot{I}_L = \frac{K_{pv} K_{pi}}{L} V_o^* V_{dc} - \frac{K_{pv} K_{pi}}{L} V_o V_{dc} + \frac{K_{pi} K_{iv}}{L} X_v V_{dc} - \frac{K_{pi}}{L} I_L V_{dc} \\
 \quad + \frac{K_{ii}}{L} X_i V_{dc} - \frac{V_o}{L} \\
 \dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\
 \dot{X}_v = V_o^* - V_o \\
 \dot{X}_i = -I_L - K_{pv} V_o + K_{pv} V_o^* + K_{iv} X_v
 \end{cases} \quad (3-55)$$

จากสมการที่ (3-55) จะสังเกตได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากมีพจน์ตัวแปรสถานะที่มีเลขชี้กำลังมากกว่าหนึ่งและมีพจน์ของ

ผลคูณระหว่างตัวแปรสถานะปรากฏอยู่ โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบผ่านทฤษฎีบทค่าเจาะจงซึ่งเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ข้างต้นจึงต้องทำให้เป็นเชิงเส้น โดยสามารถใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่ง ซึ่งรายละเอียดการทำให้เป็นเชิงเส้นจะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3.3.3 การทำให้เป็นเชิงเส้น

จากหัวข้อที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-55) เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการทำให้เป็นเชิงเส้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้ได้แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่ง ผลการทำให้เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบตัวแปรสถานะของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กได้ดังสมการที่ (3-56)

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (3-56)$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ:

$$\delta \mathbf{x} = [\delta I_{sd} \quad \delta I_{sq} \quad \delta V_{bus,d} \quad \delta V_{bus,q} \quad \delta I_{dc} \quad \delta V_{dc} \quad \delta I_L \quad \delta V_o \quad \delta X_v \quad \delta X_i]^T$$

$$\text{ตัวแปรอินพุต: } \delta \mathbf{u} = [\delta V_m \quad \delta V_o^*]^T$$

$$\text{ตัวแปรเอาต์พุต: } \delta \mathbf{y} = [\delta I_{dc} \quad \delta V_{dc} \quad \delta I_L \quad \delta V_o]^T$$

รายละเอียดของ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ในสมการที่ (3-56) แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix}
-\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{S_d}{C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \frac{S_d}{L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} & a(5,7) & -\frac{r_C K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} & \frac{r_C K_{pi} K_{iv} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} & \frac{r_C K_{ii} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} \\
0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & a(6,7) & \frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} & \frac{K_{pi} K_{iv} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} & \frac{K_{ii} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & -\frac{K_{pi} V_{dc,0}}{A_r L} & \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc,0}}{A_r L} & \frac{1}{L} & \frac{K_{pi} K_{iv} V_{dc,0}}{A_r L} & \frac{K_{ii} V_{dc,0}}{A_r L} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{RC} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}_{10 \times 10}$$

$$a(5,7) = \frac{r_C K_{pv} K_{pi} V_o^*}{A_r L_{dc}} - \frac{r_C K_{pv} K_{pi} V_o}{A_r L_{dc}} + \frac{r_C K_{pi} K_{iv} X_v}{A_r L_{dc}} - \frac{2r_C K_{pi} I_L}{A_r L_{dc}} + \frac{r_C K_{ii} X_i}{A_r L_{dc}}$$

$$a(6,7) = -\frac{K_{pv}K_{pi}V_o^*}{A_r C_{dc}} + \frac{K_{pv}K_{pi}V_o}{A_r C_{dc}} - \frac{K_{pi}K_{iv}X_v}{A_r C_{dc}} + \frac{2K_{pi}I_L}{A_r C_{dc}} - \frac{K_{ii}X_i}{A_r C_{dc}}$$

$$a(7,6) = \frac{K_{pv}K_{pi}V_o^*}{A_r L} - \frac{K_{pv}K_{pi}V_o}{A_r L} + \frac{K_{pi}K_{iv}X_v}{A_r L} - \frac{K_{pi}I_L}{A_r L} + \frac{K_{ii}X_i}{A_r L}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\cos(\lambda_0)}{L_{eq}} & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sin(\lambda_0)}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_C K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{L_{dc}} \\ 0 & -\frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{C_{dc}} \\ 0 & \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc,0}}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & K_{pv} \end{bmatrix}_{10 \times 2}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 10}$$

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

3.3.4 การคำนวณค่าในสถานะคงตัว

จากสมการที่ (3-56) จะสังเกตได้ว่าองค์ประกอบของเมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นจะปรากฏพจน์ตัวแปรได้แก่ $V_{dc,0}$, λ_0 , $V_{o,0}$, $I_{L,0}$, $X_{v,0}$ และ $X_{i,0}$ ซึ่งเป็นค่าในสถานะคงตัวที่จุดการทำงานต่าง ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนวณหาค่าในสถานะคงตัวของพจน์ตัวแปรดังกล่าวก่อนที่จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปประยุกต์ใช้ต่อไป สำหรับการคำนวณค่าในสถานะคงตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถดำเนินการได้โดยเริ่มต้นจากการพิจารณาค่าในสถานะคงตัวทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) และ λ ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับการพิสูจน์ไว้ในหัวข้อที่ 3.2.5 แสดงดังสมการที่ (3-57)

$$\begin{cases} \frac{V_{bus} V_s \cos(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \cos(\gamma)}{Z} = P_{bus} \\ \frac{V_{bus} V_s \sin(\gamma - \lambda)}{Z} - \frac{V_{bus}^2 \sin(\gamma)}{Z} = Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-57)$$

เมื่อ V_s คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสแหล่งจ่าย (Source bus), V_{bus} คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสเอซี (AC bus) λ คือ มุมต่างเฟสระหว่าง V_s และ V_{bus} และ Z คือ ขนาดอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยที่กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่บัสเอซี แสดงได้ดังสมการที่ (3-58)

$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{1}{3} \left(\frac{(V_o^*)^2}{R} + P_{loss} \right) \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-58)$$

เมื่อ V_o^* คือ แรงดันอ้างอิงที่ต้องการของวงจรแปลงผันแบบบักและ P_{loss} คือ กำลังงานสูญเสียเนื่องจาก r_μ และ r_L ทั้งนี้การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจะประมาณให้มีค่าเท่ากับศูนย์ (Mohan, N., Undeland, T.M. and Robbins, W.P., 1995)

จากสมการที่ (3-57) สามารถนำไปเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่า $V_{dc,0}$ และ λ_0 ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าในสถานะคงตัวของตัวแปรสถานะในแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นโดยอาศัยการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าพื้นฐาน ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3-59)

$$\begin{cases} V_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{bus,0}) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,0} - r_L I_{dc,0} \\ V_{o,0} = V_o^* \\ I_{L,0} = \frac{V_{o,0}}{R} \\ X_{v,0} = \frac{I_{L,0}}{K_{iv}} \\ X_{i,0} = \frac{1}{K_{ii}} \left(\frac{A_r V_{o,0}}{V_{dc,0}} + K_1 I_{L,0} + K_2 V_{o,0} \right) \end{cases} \quad (3-59)$$

โดยที่

$$I_{dc,0} = \frac{\sqrt{3} \left| \frac{V_s e^{j0} - V_{bus,0} e^{-j\lambda}}{Z e^{j\gamma}} \right|}{\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi}}$$

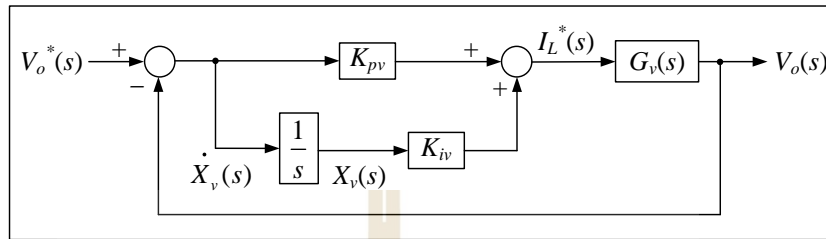
$$Z = \sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}, \quad \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \right)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3-56) และค่าในสภาวะคงตัวในสมการที่ (3-59) จะเห็นว่าสมการดังกล่าวมีค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอปรากฏอยู่ ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้การควบคุมมีสมรรถนะที่ดีและเป็นไปตามความต้องการของผู้ออกแบบ ซึ่งรายละเอียดการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าวได้ถูกนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.3.5 เป็นลำดับถัดไป

3.3.5 การออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัก

การออกแบบตัวควบคุมพีไอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะอาศัยวิธีการแบบดั้งเดิม (Chanpittayagit R., Areerak K-N. and Areerak K-L., 2014; Chonsatidjamroen S., Areerak K-N. and Areerak K-L., 2012) เนื่องจากเป็นวิธีการที่ให้ผลตอบแทนที่ดีและมีขั้นตอนการออกแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน ซึ่งสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการมาตรฐานของระบบอันดับสองเมื่อพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังแบบบักจะเห็นได้ว่าตัวควบคุมพีไอแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งรายละเอียดของการออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 ส่วนมีดังนี้

- การออกแบบตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุต
แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุตสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักในรูปที่ 3.21 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุตสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัก

จากรูปที่ 3.22 จะเห็นว่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอคือ $I_L^*(s)$ และมีสัญญาณป้อนกลับ คือ $V_o(s)$ ดังนั้นจึงต้องหาความสัมพันธ์ระหว่าง $I_L(s)$ กับ $V_o(s)$ เพื่อให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_v(s)$ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการตัวแปรสถานะของแรงดันเอาต์พุต แสดงดังสมการที่ (3-60)

$$\dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L(t) - \frac{1}{RC} V_o(t) \quad (3-60)$$

ทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (3-60) จะได้ผลลัพธ์การแปลงลาปลาซแสดงดังสมการที่ (3-61)

$$sV_o(s) = \frac{1}{C} I_L(s) - \frac{1}{RC} V_o(s) \quad (3-61)$$

จากสมการที่ (3-61) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_v(s)$ แสดงดังสมการที่ (3-62)

$$G_v(s) = \frac{V_o(s)}{I_L(s)} = \frac{R}{sRC + 1} \quad (3-62)$$

ดังนั้นจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของลู่วควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้ดังสมการที่ (3-63) และทำการจัดรูปสมการได้ดังสมการที่ (3-64)

$$T_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_o^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{pv}s + K_{pi}}{s}\right) \cdot G_v(s)}{1 + \left(\frac{K_{pv}s + K_{pi}}{s}\right) \cdot G_v(s)} \quad (3-63)$$

$$T_v(s) = \frac{\left(\frac{K_{pv}s + K_{pi}}{C}\right)}{s^2 + \left(\frac{K_{pv}R + 1}{RC}\right)s + \left(\frac{K_{iv}}{C}\right)} \quad (3-64)$$

จากนั้นทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวส่วนของ $T_v(s)$ กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสองในสมการที่ (3-65) จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแบบพีไอแสดงดังสมการที่ (3-66) และ (3-67)

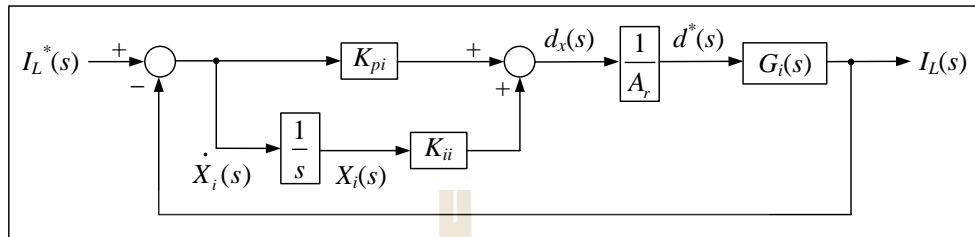
$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3-65)$$

$$K_{pv} = \frac{2\zeta_v \omega_{nv} RC - 1}{R} \quad (3-66)$$

$$K_{iv} = \omega_{nv}^2 C \quad (3-67)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- การออกแบบตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ
แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด
เหนี่ยวนำสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักในรูปที่ 3.21 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แผนภาพของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ
สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัก

จากรูปที่ 3.23 จะเห็นว่าเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ คือ $d_x(s)$ ซึ่งจะถูกปรับ
คูณด้วยค่า $1/A_r$ ได้เป็นค่าวัฏจักรการทำงาน $d^*(s)$ และมีสัญญาณป้อนกลับ คือ $I_L(s)$ ดังนั้น
จึงต้องหาความสัมพันธ์ระหว่าง $I_L(s)$ กับ $d(s)$ เพื่อให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_i(s)$ ซึ่งสามารถหาได้
จากสมการตัวแปรสถานะของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ แสดงดังสมการที่ (3-68)

$$\dot{I}_L(t) = \frac{d(t)}{L} V_{dc} - \frac{1}{L} V_o(t) \quad (3-68)$$

ทำการแปลงลาปลาซสมการที่ (3-68) จะได้ผลลัพธ์การแปลงลาปลาซแสดงดัง
สมการที่ (3-69)

$$sI_L(s) = \frac{d(s)}{L} V_{dc} - \frac{1}{L} V_o(s) \quad (3-69)$$

จากสมการที่ (3-69) สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน $G_i(s)$ โดยพิจารณาให้
 $V_o(s)$ เท่ากับศูนย์ แสดงดังสมการที่ (3-70)

$$G_i(s) = \frac{I_L(s)}{d(s)} = \frac{V_{dc}}{sL} \quad (3-70)$$

ดังนั้นจะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (3-71) และทำการจัดรูปสมการได้ดังสมการที่ (3-72)

$$T_i(s) = \frac{I_L(s)}{I_L^*(s)} = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{s}\right) \cdot \left(\frac{G_i(s)}{A_r}\right)}{1 + \left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{s}\right) \cdot \left(\frac{G_i(s)}{A_r}\right)} \quad (3-71)$$

$$T_i(s) = \frac{\left(\frac{K_{pi}s + K_{ii}}{A_r L}\right) V_{dc}}{s^2 + \left(\frac{K_{pi} V_{dc}}{A_r L}\right) s + \left(\frac{K_{ii} V_{dc}}{A_r L}\right)} \quad (3-72)$$

จากนั้นทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของตัวหารของ $T_i(s)$ กับสมการมาตรฐานของระบบอันดับสองในสมการที่ (3-65) จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำฟิโอสแตงดังสมการที่ (3-73) และ (3-74)

$$K_{pi} = \frac{2\zeta_i \omega_{ni} A_r L}{V_{dc}} \quad (3-73)$$

$$K_{ii} = \frac{\omega_{ni}^2 A_r L}{V_{dc}} \quad (3-74)$$

สำหรับการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟิโอสแตงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า สามารถออกแบบได้จากสมการที่ (3-66), (3-67), (3-73) และ (3-74) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสมการดังกล่าว เห็นได้ว่าการออกแบบตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบ คือ อัตราส่วนการหน่วงของลูบแรงดันไฟฟ้า (ζ_v) และลูบกระแสไฟฟ้า (ζ_i), ความถี่ธรรมชาติของลูบแรงดันไฟฟ้า (ω_{nv}) และลูบกระแสไฟฟ้า (ω_{ni}) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ออกแบบตัวควบคุมฟิโอสแตงโดยกำหนด $\zeta_v = 1$, $\zeta_i = 0.7$, $\omega_{nv} = 2\pi \times 10$ rad/s และ $\omega_{ni} = 2\pi \times 200$ rad/s สำหรับรายละเอียดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัก แสดงดังตารางที่ 3.2 ในหัวข้อที่ 3.3.6

3.3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

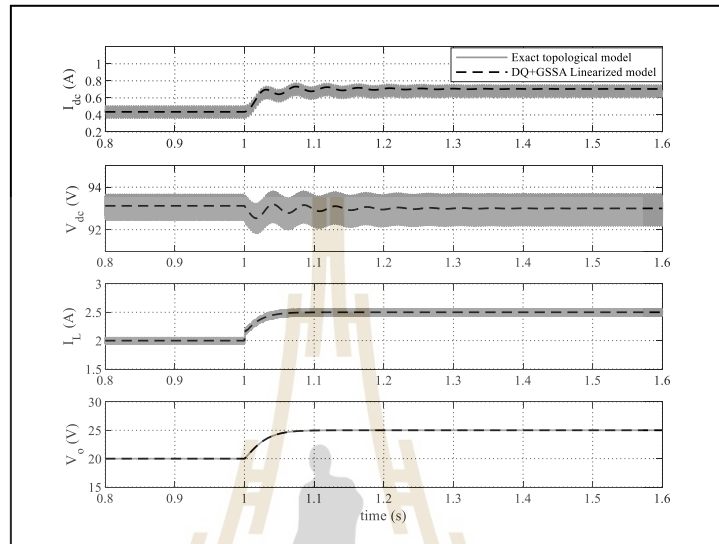
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3-56) กับการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.20 ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ข.2 โดยกำหนดพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.20

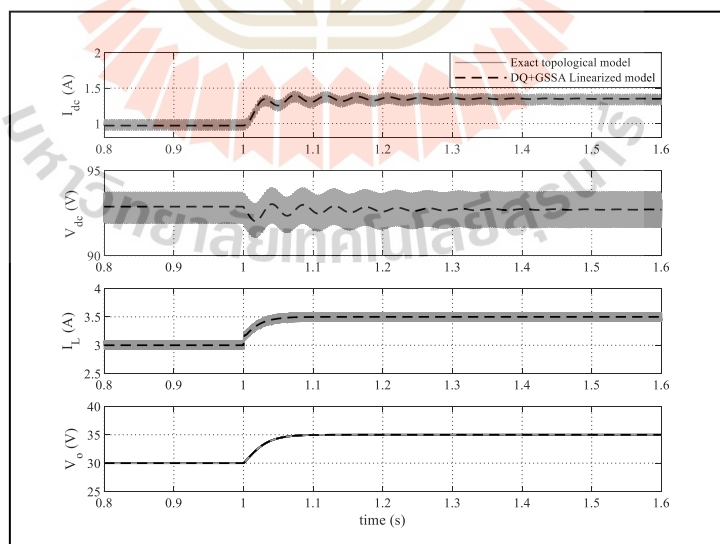
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	40 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
R_{eq}	0.079 Ω	ความต้านทานของวงจรสมมูลสายส่ง
L_{eq}	0.1005 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรสมมูลสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของวงจรสมมูลสายส่ง
r_L	0.2756 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_{dc}	39.0002 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_C	0.5312 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_{dc}	1300 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
L ($\Delta I_L \leq 0.2$ A)	15 mH	ความเหนี่ยวนำของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก
C ($\Delta V_C \leq 2.8$ mV)	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก
R	10 Ω	ความต้านทานของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก
A_r	10	ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยมสำหรับตัวควบคุมพีไอ
K_{pv}	0.0257	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{iv}	3.9478	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมไอสำหรับลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{pi}	2.8205	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอสำหรับลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า
K_{ii}	2531.7	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมไอสำหรับลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นจะดำเนินการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงของวงจรแปลงผันแบบบักที่ต้องการ (V_o^*) จาก 20 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 1 วินาที สามารถแสดงผล การตอบสนองของกระแสเอาต์พุตดีซี (I_{dc}), แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซี (V_{dc})

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (I_L) และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_o) ได้ดังรูปที่ 2.5 ในส่วนของรูปที่ 3.25 จะแสดงผลการตอบสนองในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 3.24 โดยมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงของวงจรแปลงผันแบบบuckที่ต้องการจาก 30 V ไปเป็น 35 V ที่เวลา 1 วินาที



รูปที่ 3.24 ผลตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_o^* จาก 20 V ไปเป็น 25 V



รูปที่ 3.25 ผลตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_o^* จาก 30 V ไปเป็น 35 V

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ในรูปที่ 3.24 และ 3.25 พบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตที่สอดคล้องกับ ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งในสถานะชั่วคราวและในสถานะคงตัว ทำให้ยืนยัน ได้ว่าแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีการผสมผสานระหว่างวิธีตีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในบทนี้มีความถูกต้อง แม่นยำ และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบท ค่าเจาะจง ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในบทที่ 4 เป็นลำดับถัดไป

3.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 ได้นำเสนอพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีตีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อนำไปใช้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผัน แบบบัก โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ทฤษฎีพื้นฐานการแปลงตีควด้วยวิธีการแปลงของปาร์ค ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้าสามเฟสร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ ทั่วไปที่มีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี สำหรับการพิสูจน์ หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีตัวควบคุม จะได้แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อนสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ เสถียรภาพ จึงได้นำแบบจำลองดังกล่าวมาทำให้เป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่ง ทำให้ได้แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นที่เหมาะสมต่อการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการหาค่าในสถานะคงตัวและวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจร แปลงผันแบบบัก พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์ บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งพบว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองมีลักษณะของรูปสัญญาณ สอดคล้องกับการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB ทั้งสถานะชั่วคราว และสถานะคงตัว ดังนั้นแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นในบทที่ 3 นี้จึงเป็นแบบจำลองที่เชื่อถือได้ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพหรือออกแบบตัวควบคุมได้ในอนาคต

บทที่ 4

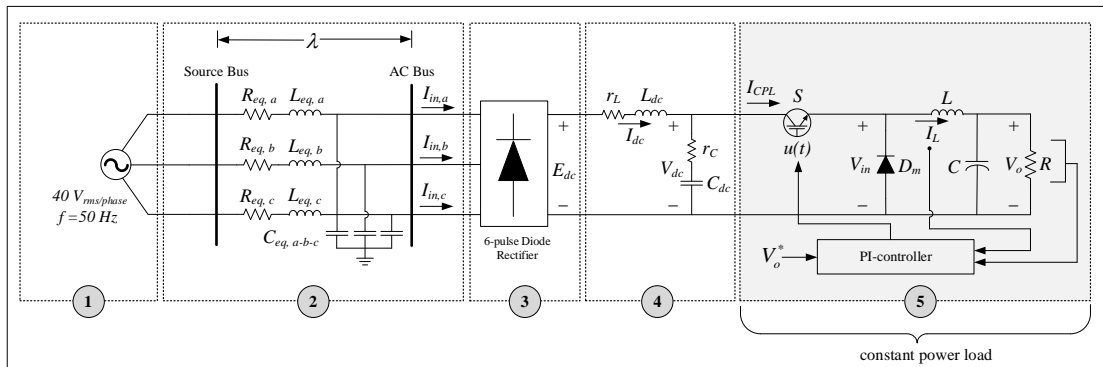
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลด เป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม

4.1 บทนำ

การศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่าเมื่อระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีมีการเชื่อมต่อกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะส่งผลให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าลดลง จนอาจเกิดการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งการใช้งานในสภาวะดังกล่าวสามารถทำให้อุปกรณ์ที่ใช้งานเกิดความเสียหาย อีกทั้งยังทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบลดลง โดยระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม ซึ่งโหลดดังกล่าวมีลักษณะเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทนี้จะใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทนี้จะถูกตรวจสอบความถูกต้องด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB ข้อมูลการวิเคราะห์ในบทนี้จะป็นข้อมูลสำคัญสำหรับนำไปใช้บรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเป็นลำดับถัดไป

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม

ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม โดยโหลดดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสามารถแสดงดังรูปที่ 4.1 เมื่อวงจรแปลงผันแบบบักมีการดึงกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหน่วงของระบบไฟฟ้าลดลง เป็นผลให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรกรองสัญญาณดีซีเกิดการสั่นไหว (oscillation) มากขึ้น จนไม่สามารถเข้าสู่ค่าในสภาวะคงตัวได้ในสภาวะดังกล่าวหมายถึงระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบจึงมีความจำเป็นอย่างมาก



รูปที่ 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม

สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถดำเนินการได้โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3-53) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแล้วในบทที่ 3 มาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งทฤษฎีบทดังกล่าวจะถูกอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1

4.2.1 ทฤษฎีบทค่าเจาะจง

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงสามารถดำเนินการได้โดยเริ่มต้นจากการนำเมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix) หรือเมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ (Areerak K-N., Bozhko S. V., Asher G. M., De Lillo L. and Thomas D. W. P., 2012) ที่ได้มาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-53) มาคำนวณหาค่าเจาะจงทั้งหมดในระบบไฟฟ้าตามสมการที่ (4-1)

$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (4-1)$$

เมื่อแทนค่าเมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ลงในสมการที่ (4-1) จะสามารถคำนวณค่าเจาะจงหรือโพลทั้งหมดของระบบไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบของจำนวนเชิงซ้อน โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพจะพิจารณาตามเงื่อนไขการมีเสถียรภาพให้เป็นไปตามสมการที่ (4-2)

$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (4-2)$$

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

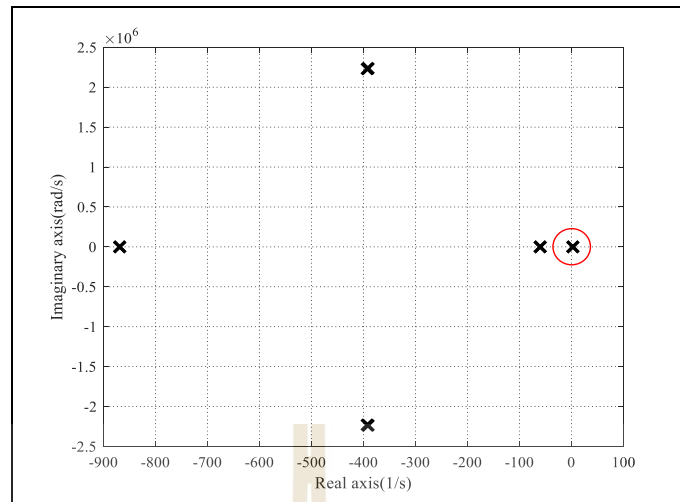
จากสมการที่ (4-2) จะเห็นว่าระบบไฟฟ้าจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อส่วนจริงของค่าเจาะจงทั้งหมดในระบบมีค่าน้อยกว่าศูนย์ หรือกล่าวได้ว่าโพลทั้งหมดของระบบไฟฟ้าอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอส โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถพิจารณาเฉพาะคูโพลเด่น (dominant poles) ซึ่งเป็นคูโพลที่อยู่ใกล้แกนจินตภาพมากที่สุด เนื่องจากคูโพลดังกล่าวมีนัยสำคัญต่อผลการตอบสนองของระบบไฟฟ้ามากที่สุด สำหรับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทนี้ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

4.2.2 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

การคำนวณหาค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงในหัวข้อที่ผ่านมาจะใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.1 ซึ่งจะทำให้ได้ค่าเจาะจงของระบบทั้งหมด 10 ค่า ประกอบด้วย λ_1 ถึง λ_{10} แสดงดังรูปที่ 4.2

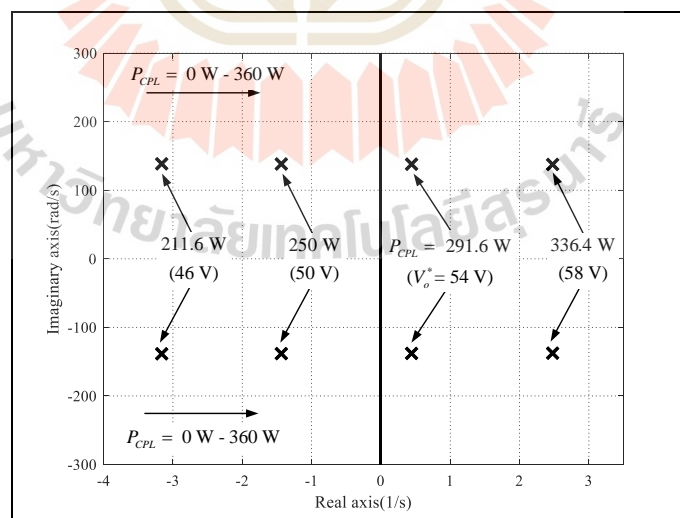
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	40 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
R_{eq}	0.079 Ω	ความต้านทานของวงจรสมมูลสายส่ง
L_{eq}	0.1005 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรสมมูลสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของวงจรสมมูลสายส่ง
r_L	0.2756 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_{dc}	39.0002 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_C	0.5312 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_{dc}	1300 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
L ($\Delta I_L \leq 0.2$ A)	30 mH	ความเหนี่ยวนำของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก
C ($\Delta V_C \leq 2.8$ mV)	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก
R	10 Ω	ความต้านทานของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก
A_r	10	ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยมสำหรับตัวควบคุมพีโอ
K_{pv}	0.0257	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีโอสำหรับรูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{iv}	3.9478	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมไอโอสำหรับรูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{pi}	2.8205	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีโอสำหรับรูปควบคุมกระแสไฟฟ้า
K_{ii}	2531.7	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมไอโอสำหรับรูปควบคุมกระแสไฟฟ้า



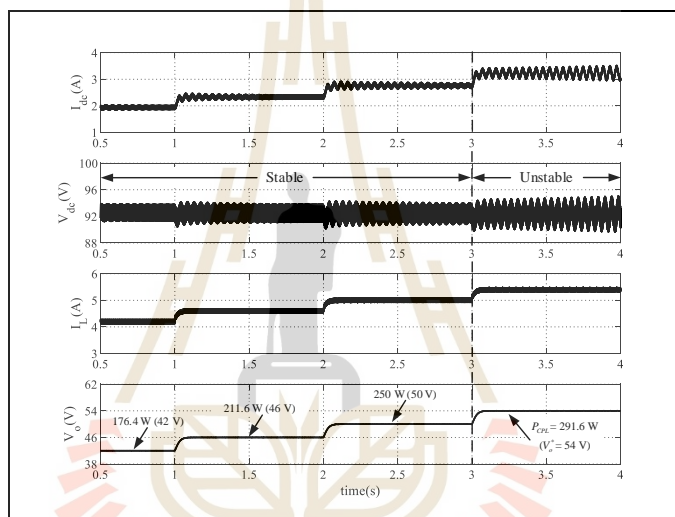
รูปที่ 4.2 ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

จากรูปที่ 4.2 เป็นค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา การวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะค่าเจาะจงเด่นหรือคูโพลเด่นของระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นคูโพลที่อยู่ใกล้แกนจินตภาพมากที่สุด (คูโพลในวงกลมสีแดง) กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงโหลดวงจรแปลงผันแบบบักตั้งแต่ 0 W (0 V) จนถึง 360 W (60 V) ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีการพิจารณาเฉพาะค่าเจาะจงเด่นแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจากค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

จากรูปที่ 4.3 จะสังเกตได้ว่าเมื่อโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคถูกเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับ 291.6 W (54 V) คูโพลเด่นของระบบไฟฟ้าจะย้ายจากขอบเขตการมีเสถียรภาพทางฝั่งซ้ายของระนาบเอสมาอยู่ในขอบเขตการขาดเสถียรภาพทางฝั่งขวาของระนาบเอส ทำให้สามารถคาดการณ์ได้ว่าที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้างกล่าวเป็นจุดการทำงานที่ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้ การตรวจสอบความถูกต้องในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถดำเนินการได้โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



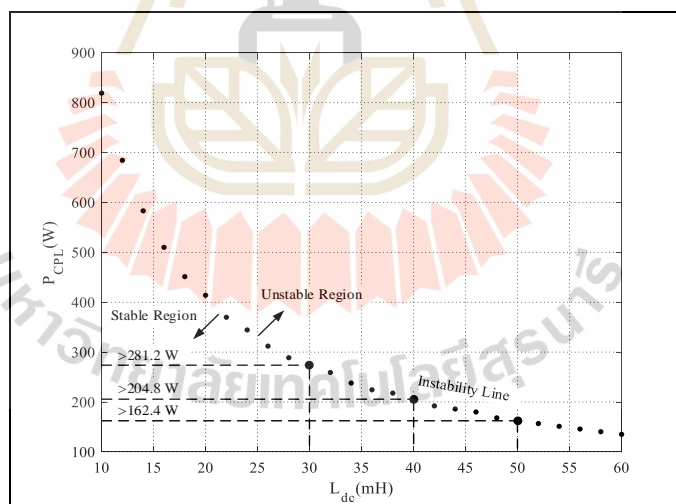
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองสถานการณ์ของการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 4.3

ผลการจำลองสถานการณ์ของการวิเคราะห์เสถียรภาพในรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคจาก 250 W (50 V) ไปเป็น 291.6 W (54 V) ที่เวลา 3 วินาที สัญญาณแรงดันไฟฟ้าดีซีของวงจรกรองสัญญาณดีซี (V_{dc}) มีการสั่นไหวเพิ่มมากขึ้น ผลการตอบสนองของสัญญาณดังกล่าวบ่งบอกถึงการขาดเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจงสามารถคาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดของการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3

4.3 ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นมาใช้ในการวิเคราะห์ผ่านทฤษฎีบทค่าเจาะจง ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้สามารถคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้อง ในหัวข้อนี้จึงได้นำทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาประยุกต์ใช้สำหรับวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสถียรภาพเมื่อค่าพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามความยาวของสายเคเบิลซึ่งเป็นค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองสัญญาณดีซี ได้แก่ L_{dc} และ C_{dc} และค่าพารามิเตอร์ในวงจรแปลงผันแบบบัก ได้แก่ L และ C เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับ การออกแบบของวิศวกร ดังนั้นการศึกษาผลกระทบทางด้านเสถียรภาพเมื่อค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลง จะพิจารณาเพียงค่าที่สามารถออกแบบได้ เพื่อให้ผู้ออกแบบได้ตระหนักถึงจุดการทำงานที่อาจเกิดการขาดเสถียรภาพของระบบ สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ L_{dc} , C_{dc} , L และ C มีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.12 ดังนี้

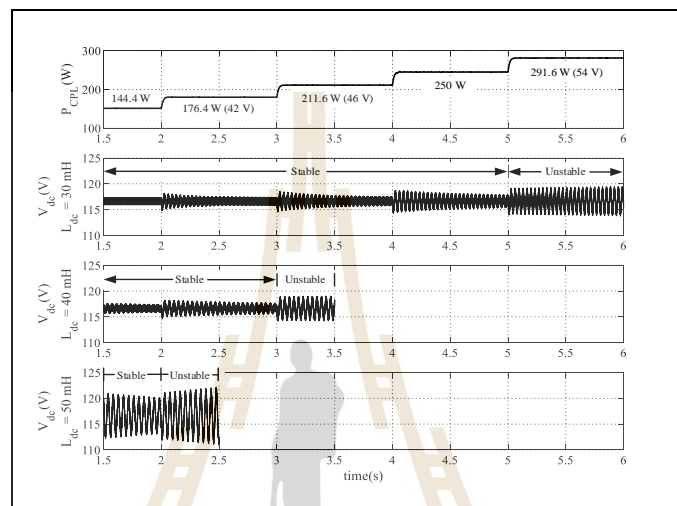
- การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ L_{dc}



รูปที่ 4.5 ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า L_{dc} ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า เมื่อค่า L_{dc} ของระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้นระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวน้อยลง หรือกล่าวได้ว่าการเพิ่มค่า L_{dc} ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพลดลง (less stable) โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ L_{dc} และค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวที่ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพถูกนำเสนอในรูปแบบของเส้นแนวโน้มการขาดเสถียรภาพ

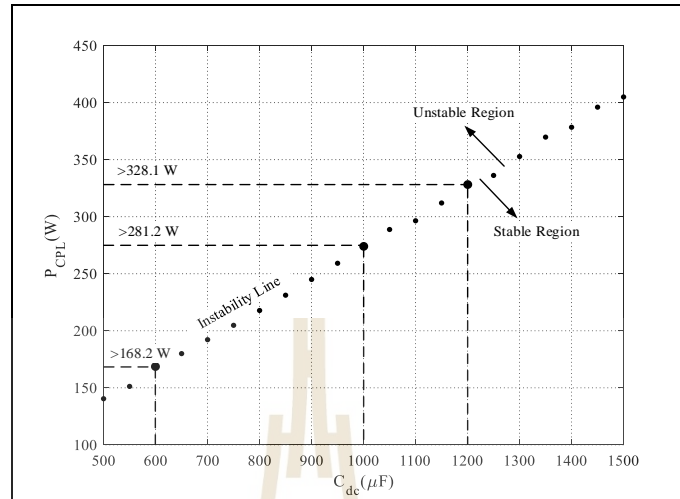
(instability line) ซึ่งเส้นนี้จะแบ่งแยกระหว่างขอบเขตการมีเสถียรภาพ (stable region) และขอบเขตการขาดเสถียรภาพ (unstable region) ของระบบไฟฟ้า การวิเคราะห์ผลกระทบของค่า L_{dc} สามารถยืนยันความถูกต้องได้โดยการเลือกค่าพารามิเตอร์ L_{dc} ไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB ซึ่งในที่นี้ได้เลือกค่าพารามิเตอร์ L_{dc} เท่ากับ 30 mH, 40 mH และ 50 mH ไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลจำลองสถานการณ์เมื่อค่า L_{dc} ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลง

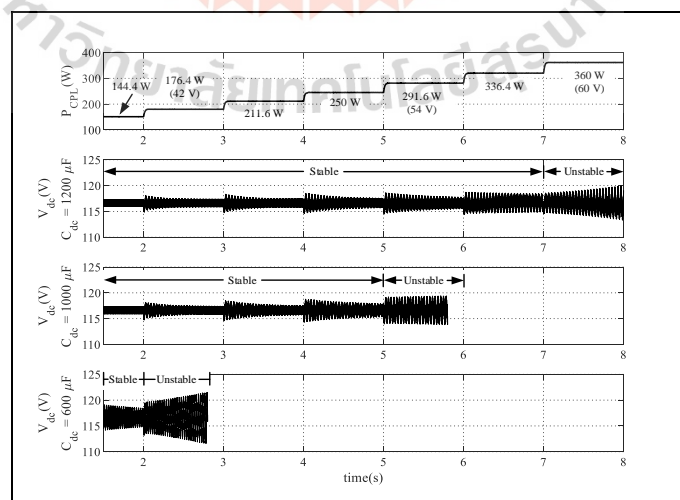
จากรูปที่ 4.6 พบว่าการกำหนดพารามิเตอร์ L_{dc} ให้มีค่าเท่ากับ 30 mH ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 291.6 W (54 V) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ L_{dc} ให้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 40 mH และ 50 mH จะส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวน้อยลง ซึ่งเท่ากับ 211.6 W (46 V) และ 176.4 W (42 V) ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า L_{dc} ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาให้มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าลดลง ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.6 มีความสอดคล้องกับแนวโน้มที่คาดการณ์ไว้จากทฤษฎีในรูปที่ 4.5 เช่นกัน

- การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ C_{dc}



รูปที่ 4.7 ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า C_{dc} ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

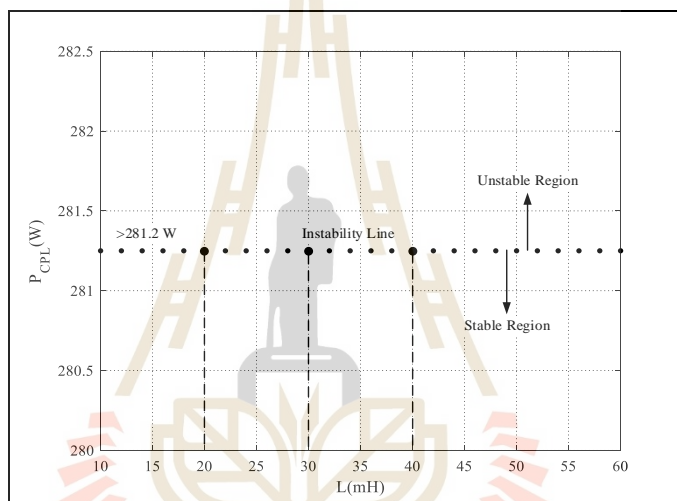
ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า C_{dc} ในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่า C_{dc} ของระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ระบบไฟฟ้าจะเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวมากขึ้น หรือกล่าวได้ว่าการเพิ่มค่า C_{dc} ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น (more stable) สำหรับการจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสถียรภาพที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า C_{dc} จะเลือกค่า C_{dc} เท่ากับ 600 μF , 1000 μF และ 1200 μF ไปใช้ในการจำลองสถานการณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลจำลองสถานการณ์เมื่อค่า C_{dc} ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลง

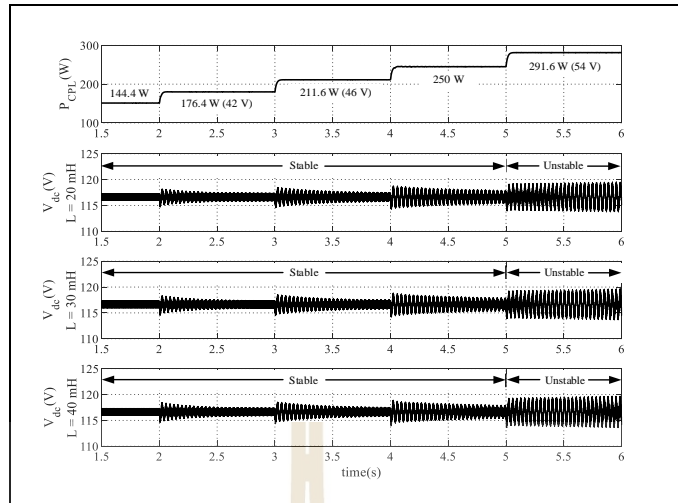
จากรูปที่ 4.8 พบว่าการกำหนดพารามิเตอร์ C_{dc} ให้มีค่าเท่ากับ $600 \mu\text{F}$ ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 176.4 W (42 V) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ C_{dc} ให้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $1000 \mu\text{F}$ และ $1200 \mu\text{F}$ จะส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวสูงขึ้น ซึ่งเท่ากับ 291.6 W (54 V) และ 360 W (60 V) ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า C_{dc} ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาให้มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.8 มีความสอดคล้องกับแนวโน้มที่คาดการณ์ไว้จากทฤษฎีในรูปที่ 4.7 เช่นกัน

- การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ L



รูปที่ 4.9 ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า L ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

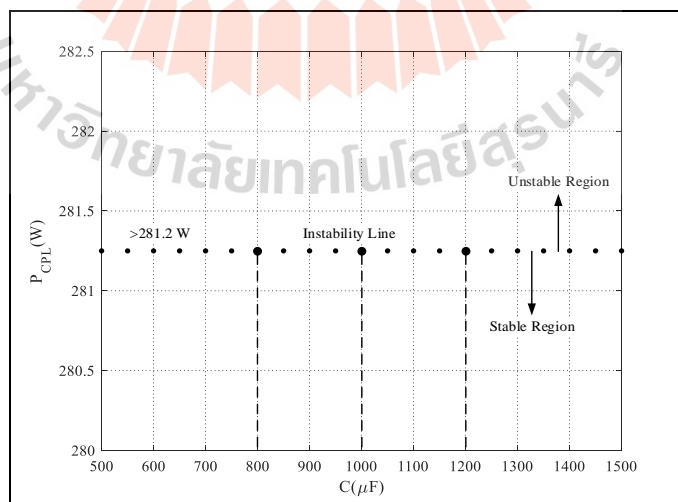
ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า L ในรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่า L ของระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ระบบไฟฟ้ายังคงเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวเท่าเดิม สำหรับการจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสถียรภาพที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า L จะเลือกค่า L เท่ากับ 20 mH , 30 mH และ 40 mH ไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลจำลองสถานการณ์เมื่อค่า L ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลง

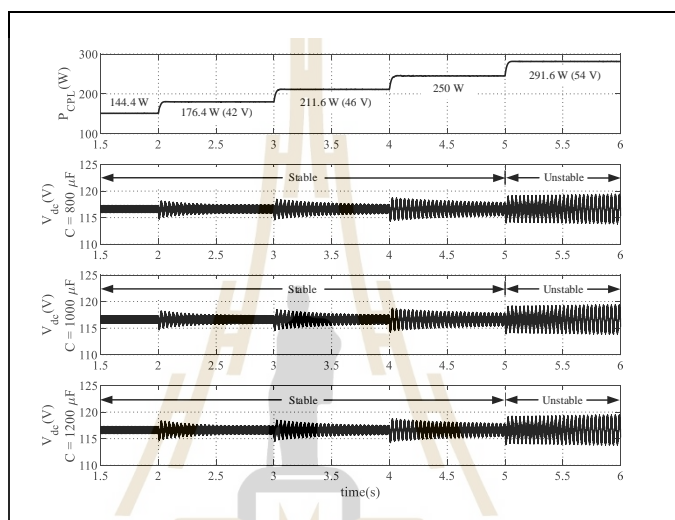
จากรูปที่ 4.10 พบว่าการกำหนดพารามิเตอร์ L ให้มีค่าเท่ากับ 20 mH, 30 mH และ 40 mH ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 291.6 W (54 V) เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า L ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.10 มีความสอดคล้องกับแนวโน้มที่คาดการณ์ไว้จากทฤษฎีในรูปที่ 4.9 เช่นกัน

- การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ C



รูปที่ 4.11 ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า C ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า C ในรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่า C ของระบบไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ระบบยังคงเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวเท่าเดิม เช่นเดียวกับผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า L สำหรับการจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสถียรภาพที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่า C จะเลือกค่า C เท่ากับ $800 \mu\text{F}$, $1000 \mu\text{F}$ และ $1200 \mu\text{F}$ ไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ผลจำลองสถานการณ์เมื่อค่า C ในระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.12 พบว่าการกำหนดพารามิเตอร์ C ให้มีค่าเท่ากับ $800 \mu\text{F}$, $1000 \mu\text{F}$ และ $1200 \mu\text{F}$ ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 291.6 W (54 V) เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า C ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 4.12 มีความสอดคล้องกับแนวโน้มที่คาดการณ์ไว้จากทฤษฎีในรูปที่ 4.11 เช่นกัน

จากการวิเคราะห์ผลกระทบทางด้านเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อค่าพารามิเตอร์ในระบบมีการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 4.5 ถึง 4.12 พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพได้แก่ L_{dc} และ C_{dc} ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองสัญญาณดีซี โดยทั่วไปค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมักจะถูกออกแบบให้มีค่าเพียงพอสำหรับการกรองสัญญาณ แต่เงื่อนไขการออกแบบไม่สามารถยืนยันได้ว่าระบบไฟฟ้าจะสามารถทำงานได้โดยไม่เกิดการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นแนวทางการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ทั้งสองค่าที่ได้นำเสนอไว้

ในหัวข้อนี้จึงเป็นประโยชน์ต่อวิศวกร ในการนำไปใช้ประกอบการออกแบบค่าพารามิเตอร์ให้สามารถกรองสัญญาณดีซีได้โดยที่ระบบไฟฟ้ายังคงมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน

4.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 ได้นำเสนอแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม ซึ่งเป็นเนื้อหาที่ต่อยอดจากการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา โดยแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทนี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นมาใช้ในการคำนวณหาค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบไฟฟ้า ทั้งนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการดังกล่าวจะพิจารณาเฉพาะค่าเจาะจงเด่นหรือคู่โพลเด่นของระบบภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพ กล่าวคือ ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นต้องมีค่าน้อยกว่าศูนย์หรือคู่โพลเด่นต้องอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอส นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบความถูกต้องเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB อีกทั้งยังได้นำทฤษฎีบทค่าเจาะจงไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพเป็นเพียงการคาดการณ์จุดการทำงานที่จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเท่านั้นไม่สามารถทำให้ระบบที่เกิดการขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้ ดังนั้นในบทที่ 5 จึงได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมเพื่อทำให้ระบบไฟฟ้าที่เกิดการขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพ

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทที่ 4 นี้ได้ตีพิมพ์บทความทางวิชาการในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ โดยจะแสดงบทความฉบับสมบูรณ์ไว้ในภาคผนวก จ. ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

Pakdeeto, J., Thanommuang, A., Chaicharoenudomrung, K., Areerak, K-N. and Areerak, K-L. (2021). The Effect of Parameter Variations of System Stability for AC-DC Power System Feeding Controlled Buck Converter. **2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)**. : 61-64.

บทที่ 5

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้วิธีการวางโพล

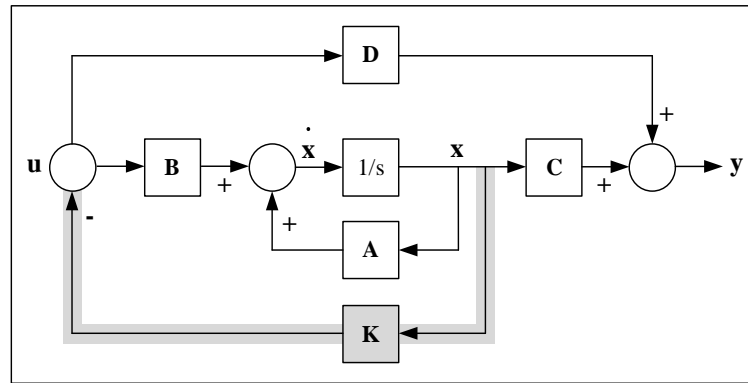
5.1 บทนำ

การวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ผ่านมาเป็นเพียงการคาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพ แต่ไม่สามารถทำให้ระบบไฟฟ้าที่ขาดเสถียรภาพกลับมาเสถียรภาพได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทนี้ จึงได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยวิธีการวางโพล วิธีการนี้จะอาศัยการเพิ่มลูปรการวางโพลเข้าไปในตัวควบคุมพีไอที่มีอยู่เดิมของวงจรแปลงผันแบบบับค โดยลูปรการวางโพลมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ อัตราขยายการวางโพล สำหรับวิธีการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลได้นำเสนอไว้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูปรการวางโพล การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงของแบบจำลองที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้น พร้อมทั้งยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เนื้อหาในบทที่ 5 นี้จะเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับนำไปใช้ในการสร้างชุดทดสอบเพื่อยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ซึ่งจะนำเสนอในบทที่ 6 ต่อไป

5.2 การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพล

5.2.1 ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเมื่อพิจารณาลูปรการวางโพล

เนื้อหาในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการของวิธีการวางโพล สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบับคที่มีการควบคุม โดยวิธีการวางโพลมีหลักการ คือ การนำสัญญาณตัวแปรสถานะทุกตัวของระบบไฟฟ้าไปคูณกับค่าอัตราขยายการวางโพล ทำให้ได้เป็นสัญญาณป้อนกลับเข้าสู่ระบบ เพื่อย้ายตำแหน่งโพลทุกตัวของระบบไปวางในตำแหน่งโพลใหม่ตามความต้องการของผู้ออกแบบ (Kim S. and Williamson S. S. , 2011, 2012) รายละเอียดเกี่ยวกับหลักการของวิธีการวางโพล สามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 5.1 แผนภาพบล็อกแบบจำลองปริภูมิสถานะของระบบที่พิจารณาลูปการวางโพล

จากรูปที่ 5.1 หากพิจารณาแผนภาพบล็อกในกรณีที่ยังไม่มีลูปการวางโพล จะสามารถเขียนสมการปริภูมิสถานะแสดงได้ดังสมการที่ (5-1)

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u} \end{cases} \quad (5-1)$$

เมื่อพิจารณาลูปการวางโพลจะเห็นได้ว่า ตัวแปรสถานะทุกตัวของระบบจะถูกนำไปคูณกับเมทริกซ์ อัตราขยายการวางโพล (\mathbf{K}) ทำให้ได้เป็นสัญญาณป้อนกลับเข้าสู่ระบบ โดยสัญญาณป้อนกลับสามารถเขียนแสดงได้ดังสมการที่ (5-2)

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x} \quad (5-2)$$

เมื่อนำสัญญาณป้อนกลับในสมการที่ (5-2) แทนลงในสมการที่ (5-1) จะได้แบบจำลองปริภูมิสถานะของระบบที่พิจารณาลูปการวางโพล แสดงได้ดังสมการที่ (5-3)

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) - \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{K})\mathbf{x} \\ \mathbf{y} = (\mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) - \mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{K})\mathbf{x} \end{cases} \quad (5-3)$$

พิจารณาสมการที่ (5-3) พบว่า มีเมทริกซ์ที่ยังไม่ทราบค่า คือ \mathbf{K} ซึ่งการคำนวณหาเมทริกซ์ดังกล่าว จะอาศัยสมการคุณลักษณะเฉพาะของค่าเงาจงและสมการพหุนามของโพลที่ได้รับการออกแบบไว้ แสดงได้ดังสมการที่ (5-4) และ (5-5) ตามลำดับ

$$\det(s\mathbf{I} - (\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) - \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{K})) = 0 \quad (5-4)$$

$$\prod_{i=1}^n (s - p_i) = 0 \quad (5-5)$$

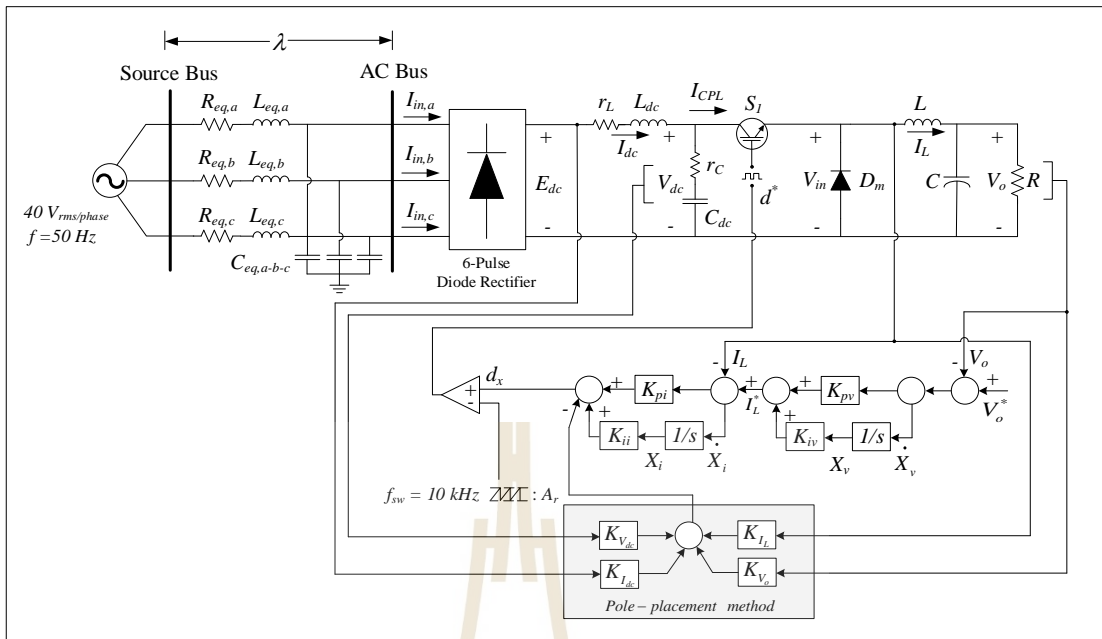
เมื่อ n คือ จำนวนตัวแปรสถานะทั้งหมดในระบบไฟฟ้า

$(s - p_i)$ คือ ตำแหน่งโพลใหม่ที่ได้ทำการออกแบบไว้

จากสมการที่ (5-5) ตำแหน่งโพลใหม่ที่ผู้ออกแบบได้ทำการออกแบบไว้จะถูกเขียนให้อยู่ในรูปของพหุนามดีกรี n ทำให้สามารถคำนวณหา \mathbf{K} ได้โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามดังกล่าวกับสัมประสิทธิ์ของโพลในสมการที่ (5-4) ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการสำหรับใช้ในการคำนวณหา \mathbf{K} ได้ดังสมการที่ (5-6)

$$\det(s\mathbf{I} - (\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) - \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{K})) = \prod_{i=1}^n (s - p_i) \quad (5-6)$$

อย่างไรก็ตามหลักการวางโพลที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้นมีความซับซ้อนเป็นอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้กับชุดทดสอบ เนื่องจากตัวแปรสถานะบางตัวของระบบไฟฟ้าไม่สามารถทำการวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกพิจารณาเฉพาะตัวแปรสถานะที่สามารถทำการวัดค่าได้โดยตรงมาคูณกับค่าอัตราขยายการวางโพล ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัสที่มีการควบคุมจากรูปที่ 3.20 ในบทที่ 3 พบว่าตัวแปรสถานะที่สามารถทำการวัดค่าสัญญาณได้ คือ I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o ซึ่งจะถูกนำไปคูณกับค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$, $K_{V_{dc}}$, K_{I_L} และ K_{V_o} ตามลำดับ เพื่อให้ได้เป็นสัญญาณสำหรับบรรเทาการขาดเสถียรภาพ แสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม เมื่อใช้อัตราขยาย $K_{I_{dc}}$, $K_{V_{dc}}$, K_{I_L} และ K_{V_o} ในลูปลการวางโพล

การนำวิธีการวางโพลไปประยุกต์ใช้กับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพในรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าต้องใช้ค่าสัญญาณจากระบบที่พิจารณาถึง 4 ตัว ซึ่งต้องทำการเพิ่มอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการวัด อีกทั้งยังอาจส่งผลทำให้การควบคุมระบบเกิดความคาดเคลื่อน อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้วิธีการดังกล่าวสามารถพิจารณาเฉพาะสัญญาณตัวแปรสถานะที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพก็เพียงพอต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ โดยรายละเอียดเกี่ยวกับการแนวทางการพิจารณาเพื่อระบุถึงตัวแปรสถานะที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพ จะถูกนำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2.2

5.2.2 ตัวประกอบการมีส่วนร่วม

สำหรับเนื้อหาในหัวข้อนี้ จะนำเสนอหลักการหาตัวประกอบการมีส่วนร่วม (participation factor) เพื่อระบุตัวแปรสถานะที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (Phosung R., Areerak K-N., Sopapirm T., and Areerak K-L., 2022, Hashlamoun W. A., Hassouneh M. A., and Abed, E. H., 2009) ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้ในการลดจำนวนสัญญาณของตัวแปรสถานะที่จะป้อนเข้าสู่ลูปลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพล การหาตัวประกอบการมีส่วนร่วมมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาเมทริกซ์ค่าเจาะจง (eigenvalue matrix) เมทริกซ์เวกเตอร์เจาะจงฝั่งขวา (right eigenvector matrix: \mathbf{v}) และเมทริกซ์เวกเตอร์เจาะจงฝั่งซ้าย (left eigenvector matrix: \mathbf{w}) จากสมการที่ (5-7), (5-8) และ (5-9) ตามลำดับ

$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (5-7)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v} \quad (5-8)$$

$$\mathbf{w}^T \mathbf{A} = \lambda \mathbf{w}^T \quad (5-9)$$

การคำนวณหาเมทริกซ์ในสมการที่ (5-7) ถึง (5-9) สามารถคำนวณได้โดยใช้ฟังก์ชันบนโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

```

*****
โปรแกรมการคำนวณหาเมทริกซ์ค่าเฉพาะจาง เมทริกซ์เวกเตอร์เฉพาะจางฝั่งขวาและเมทริกซ์เวกเตอร์
เฉพาะจางฝั่งซ้าย
*****
[v,D] = eig(A);    % v คือ เมทริกซ์เวกเตอร์เฉพาะจางฝั่งขวา, D คือ เมทริกซ์ค่าเฉพาะจาง
                  % A คือ เมทริกซ์จาโคเบียน
wT=inv(v);
w=wT';           % w คือ เมทริกซ์เวกเตอร์เฉพาะจางฝั่งซ้าย

```

สำหรับเมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ในโปรแกรมการคำนวณจะอาศัยเมทริกซ์จาโคเบียนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นจากสมการที่ (3-52) ในบทที่ 3 มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งเมทริกซ์จาโคเบียนดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5-10)

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix}
-\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{S_d}{C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \frac{S_d}{L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} & a(5,7) & -\frac{r_C K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} & \frac{r_C K_{pi} K_{iv} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} & \frac{r_C K_{ii} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} \\
0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & a(6,7) & \frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} & -\frac{K_{pi} K_{iv} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} & -\frac{K_{ii} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & -\frac{K_{pi} V_{dc,0}}{A_r L} & -\frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc,0}}{A_r L} & -\frac{1}{L} & \frac{K_{pi} K_{iv} V_{dc,0}}{A_r L} & \frac{K_{ii} V_{dc,0}}{A_r L} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 & 0
\end{bmatrix}_{10 \times 10} \quad (5-10)$$

โดยที่ $a(5,7)$, $a(6,7)$ และ $a(7,6)$ ในสมการที่ (5-8) มีรายละเอียดแสดงดังนี้

$$a(5,7) = \frac{r_c K_{pv} K_{pi} V_o^*}{A_r L_{dc}} - \frac{r_c K_{pv} K_{pi} V_o}{A_r L_{dc}} + \frac{r_c K_{pi} K_{iv} X_v}{A_r L_{dc}} - \frac{2r_c K_{pi} I_L}{A_r L_{dc}} + \frac{r_c K_{ii} X_i}{A_r L_{dc}}$$

$$a(6,7) = -\frac{K_{pv} K_{pi} V_o^*}{A_r C_{dc}} + \frac{K_{pv} K_{pi} V_o}{A_r C_{dc}} - \frac{K_{pi} K_{iv} X_v}{A_r C_{dc}} + \frac{2K_{pi} I_L}{A_r C_{dc}} - \frac{K_{ii} X_i}{A_r C_{dc}}$$

$$a(7,6) = \frac{K_{pv} K_{pi} V_o^*}{A_r L} - \frac{K_{pv} K_{pi} V_o}{A_r L} + \frac{K_{pi} K_{iv} X_v}{A_r L} - \frac{K_{pi} I_L}{A_r L} + \frac{K_{ii} X_i}{A_r L}$$

รายละเอียดของเมทริกซ์ค่าเจาะจง เมทริกซ์เวกเตอร์เจาะจงฝั่งขวา และเมทริกซ์เวกเตอร์เจาะจงฝั่งซ้าย สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 เมทริกซ์ค่าเจาะจง

	Eig. I	Eig. II	...	Eig. VII	Eig. VIII	Eig. IX	Eig. X
Row. I.	-3.9×10^2 $+2.2 \times 10^6 j$	0	...	0	0	0	0
Row. II.	0	-3.9×10^2 $-2.2 \times 10^6 j$	...	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Row. VII.	0	0	...	4.4×10^{-1} $+1.4 \times 10^2 j$	0	0	0
Row. VIII.	0	0	...	0	4.4×10^{-1} $-1.4 \times 10^2 j$	0	0
Row. IX.	0	0	...	0	0	-6.0×10^1 $+1.2 \times 10^1 j$	0
Row. X.	0	0	...	0	0	0	-6.0×10^1 $-1.2 \times 10^1 j$
				(Dominant mode)			

ตารางที่ 5.2 เมทริกซ์เวกเตอร์เจาะจงฝั่งขวา

	Col. I	Col. II	...	Col. VII	Col. VIII	Col. IX	Col. X
Row. I	-7.8×10^{-7}	-7.8×10^{-7}		-4.3×10^{-2}	-4.3×10^{-2}	8.6×10^{-2}	8.6×10^{-2}
	$+4.4 \times 10^{-3} j$	$-4.4 \times 10^{-3} j$	...	$+2.3 \times 10^{-1} j$	$-2.3 \times 10^{-1} j$	$+1.4 \times 10^{-2} j$	$-1.4 \times 10^{-2} j$
Row. II	-2.7×10^{-4}	-2.7×10^{-4}		6.2×10^{-9}	6.2×10^{-9}	-3.6×10^{-9}	-3.6×10^{-9}
	$-1.4 \times 10^{-7} j$	$+1.4 \times 10^{-7} j$	...	$-1.1 \times 10^{-8} j$	$+1.1 \times 10^{-8} j$	$-7.1 \times 10^{-10} j$	$+7.1 \times 10^{-10} j$
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
Row. V	-2.6×10^{-9}	-2.6×10^{-9}		-3.2×10^{-2}	-3.2×10^{-2}	6.4×10^{-2}	6.4×10^{-2}
	$-1.5 \times 10^{-5} j$	$+1.5 \times 10^{-5} j$	...	$+1.7 \times 10^{-1} j$	$-1.7 \times 10^{-1} j$	$+1.0 \times 10^{-2} j$	$-1.0 \times 10^{-2} j$
Row. VI	-5.3×10^{-9}	-5.3×10^{-9}		9.5×10^{-1}	9.5×10^{-1}	1.3×10^{-1}	1.3×10^{-1}
	$+1.8 \times 10^{-12} j$	$-1.8 \times 10^{-12} j$	...			$-1.2 \times 10^{-2} j$	$+1.2 \times 10^{-2} j$
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
Row. X	-4.2×10^{-20}	-4.2×10^{-20}		-2.3×10^{-5}	-2.3×10^{-5}	4.0×10^{-5}	4.0×10^{-5}
	$-3.0 \times 10^{-24} j$	$+3.0 \times 10^{-24} j$	...	$+4.0 \times 10^{-6} j$	$-4.0 \times 10^{-6} j$	$-4.2 \times 10^{-7} j$	$+4.2 \times 10^{-7} j$

ตารางที่ 5.3 เมทริกซ์เวกเตอร์เจาะจงฝั่งซ้าย

	Col. I	Col. II	...	Col. VII	Col. VIII	Col. IX	Col. X
Row. I	-9.1×10^{-5}	-9.1×10^{-5}		2.1×10^{-5}	2.1×10^{-5}	-1.6×10^{-4}	-1.6×10^{-4}
	$+1.1 \times 10^2 j$	$-1.1 \times 10^2 j$	...	$+1.0 \times 10^{-2} j$	$-1.0 \times 10^{-2} j$	$+4.4 \times 10^{-4} j$	$-4.4 \times 10^{-4} j$
Row. II	-6.7	-6.7		1.8×10^{-10}	1.8×10^{-10}	-6.0×10^{-12}	-6.0×10^{-12}
	$+2.3 \times 10^{-3} j$	$-2.3 \times 10^{-3} j$	...	$+5.0 \times 10^{-10} j$	$-5.0 \times 10^{-10} j$	$+1.9 \times 10^{-11} j$	$-1.9 \times 10^{-11} j$
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
Row. V	5.2×10^{-2}	5.2×10^{-2}		6.0×10^{-3}	6.0×10^{-3}	-4.6×10^{-2}	-4.6×10^{-2}
	$-1.5 \times 10^2 j$	$+1.5 \times 10^2 j$	...	$+2.9 j$	$-2.9 j$	$+1.3 \times 10^{-1} j$	$-1.3 \times 10^{-1} j$
Row. VI	-1.7×10^{-3}	-1.7×10^{-3}		5.2×10^{-1}	5.2×10^{-1}	4.1×10^{-3}	4.1×10^{-3}
	$-9.1 \times 10^{-7} j$	$+9.1 \times 10^{-7} j$	...	$+9.5 \times 10^{-2} j$	$-9.5 \times 10^{-2} j$	$-5.2 \times 10^{-3} j$	$+5.2 \times 10^{-3} j$
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
Row. X	1.3	1.3		-3.1×10^2	-3.1×10^2	5.5×10^2	5.5×10^2
	$+8.6 \times 10^{-4} j$	$-8.6 \times 10^{-4} j$	...	$-7.2 \times 10^1 j$	$+7.2 \times 10^1 j$	$-2.6 \times 10^3 j$	$+2.6 \times 10^3 j$

ขั้นตอนที่ 2 ทำการระบุโหมดคูโพลเด่น (dominant mode) ของเมทริกซ์ค่าเจาะจงในตารางที่ 5.1 โดยพิจารณาจากคูโพลหรือค่าเจาะจงที่อยู่ใกล้แกนจินตภาพมากที่สุด ดังนั้นจะสามารถระบุได้ว่าหลักที่ 7 และ 8 ของเมทริกซ์ค่าเจาะจง (ส่วนที่แรงๆ) เป็นโหมดคูโพลเด่น

ขั้นตอนที่ 3 นำเมทริกซ์เวกเตอร์เจาะจงฝั่งขวาและฝั่งซ้ายในตารางที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ มาใช้ในการคำนวณหาเมทริกซ์การมีส่วนร่วม (participation matrix) ตามสมการที่ (5-11)

$$\text{Participation Matrix} = |\mathbf{w} \cdot \mathbf{v}| \quad (5-11)$$

```

*****
โปรแกรมการคำนวณหาเมทริกซ์การมีส่วนร่วม
*****
j=1; while j<=10    % j คือ ตำแหน่งของหลักของเมทริกซ์
i=1; while i<=10    % i คือ ตำแหน่งของแถวของเมทริกซ์
pf(i,j)=w(i,j)*v(i,j);
i=i+1; end
j=j+1; end
pf_abs=abs(pf);     % pf_abs คือ เมทริกซ์การมีส่วนร่วม

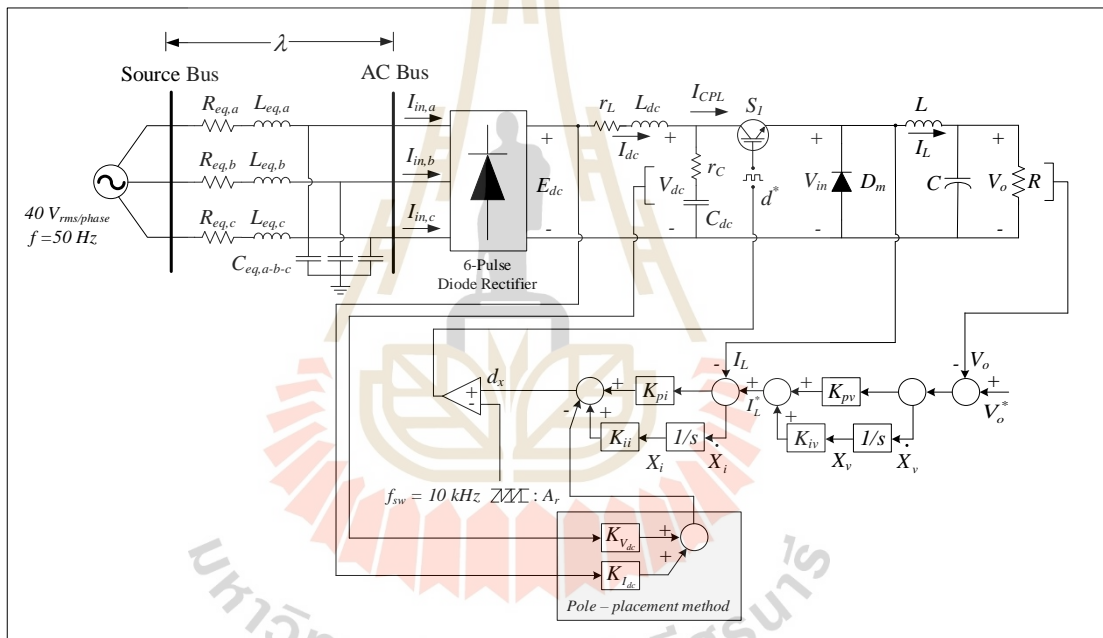
```

สำหรับการระบุตัวประกอบการมีส่วนร่วมจะพิจารณาจากสมาชิกที่มีค่าสูงสุดในโหมดคู่โพลเด่น ซึ่งแถวของสมาชิกดังกล่าวบ่งบอกถึงตัวแปรสถานะที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพในระบบมากที่สุด แสดงได้ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 เมทริกซ์การมีส่วนร่วม

	Col. I	Col. II	...	Col. VII	Col. VIII	Col. IX	Col. X
I_{sd}	0.4959	0.4959	...	0.0024	0.0024	0.0000	0.0000
I_{sd}	0.0013	0.0013	...	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
I_{dc}	0.0033	0.0033	...	0.5119	0.5119	0.0087	0.0087
V_{dc}	0.0000	0.0000	...	0.5050	0.5050	0.0009	0.0009
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
X_i	0.0000	0.0000	...	0.0103	0.0103	0.1045	0.1045
				(Dominant mode)			

จากการระบุตัวประกอบกรมีส่วนร่วมตามตารางที่ 5.4 พบว่าตัวแปรสถานะที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพมากที่สุด ได้แก่ I_{dc} และ V_{dc} เนื่องจากสมาชิกที่มีค่าสูงสุดในโหมดคู่โพลเด่นอยู่ในตำแหน่งแถวที่ 5 และ 6 ซึ่งบ่งชี้ถึงตัวแปรสถานะ I_{dc} และ V_{dc} ตามลำดับ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ดำเนินการลดจำนวนสัญญาณของตัวแปรสถานะที่จะนำมาใช้ในลูการวางโพล การขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลจากเดิมที่มีอยู่ 4 ตัวแปรสถานะ ให้เหลือเพียง 2 ตัวแปรสถานะ ได้แก่ I_{dc} และ V_{dc} โดยสัญญาณดังกล่าวจะถูกนำมาคูณกับค่าอัตราขยายลูการวางโพล คือ $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ ตามลำดับ เพื่อให้ได้เป็นสัญญาณสำหรับบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว แสดงได้ดังรูปที่ 5.3 สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.3 จะนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

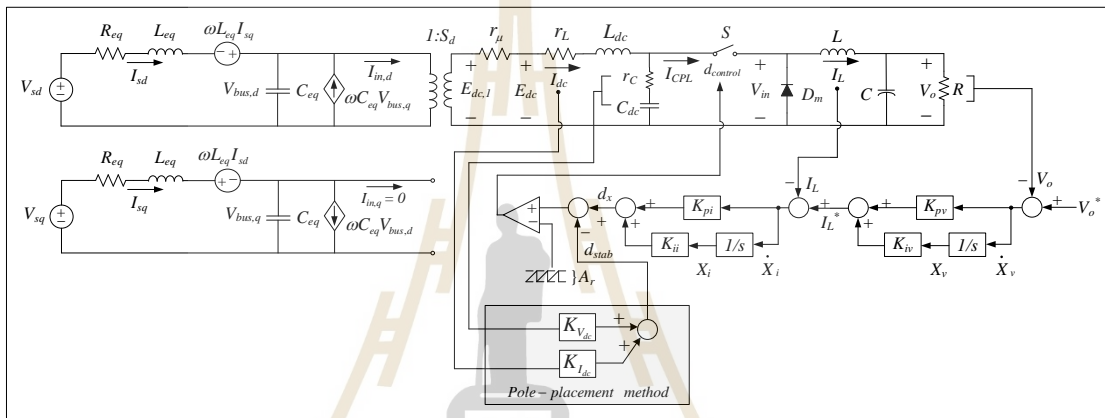


รูปที่ 5.3 ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัตที่มีการควบคุมเมื่อใช้อัตราขยาย $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ ในลูการวางโพล

5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเมื่อพิจารณาอุปสรรคการขาดเสถียรภาพ

5.3.1 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้วิธีการวางโพล

จากระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.3 สามารถนำองค์ความรู้ในการแปลงดีควด้วยวิธีการแปลงของปาร์คในบทที่ 3 มาใช้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ให้อยู่บนแกนดีคว ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.3 เมื่อกำหนดให้ $\phi = \phi$

จากรูปที่ 5.4 การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลสามารถดำเนินการได้โดยการตรวจจับสัญญาณ I_{dc} และ V_{dc} ของวงจรกรองสัญญาณดีซีมาคูณด้วยค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ ตามลำดับ เพื่อสร้างเป็นสัญญาณการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ (d_{stab}) ซึ่งจะนำไปหักล้างออกจากสัญญาณควบคุมพีไอ (d_x) ที่มีอยู่เดิม ส่งผลให้ได้เป็นสัญญาณควบคุมใหม่ ($d_{control}$) แสดงได้ดังสมการที่ (5-12)

$$\begin{cases} d_{control} = \frac{1}{A_r}(d_x - d_{stab}) \\ d_{control} = \frac{1}{A_r}(d_x - (K_{I_{dc}} I_{dc} + K_{V_{dc}} V_{dc})) \end{cases} \quad (5-12)$$

โดยที่ $d_x = K_{pv} K_{pi} V_o^* - K_{pv} K_{pi} V_o + K_{pi} K_{iv} X_v - K_{pi} I_L + K_{ii} X_i$

จากสมการที่ (5-12) ค่าอัตราขยาย $K_{I_{dc}}$ จะมีลักษณะเป็นค่าความต้านทานเสมือนเมื่อนำอัตราขยายดังกล่าวไปคูณกับสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำในวงจรรองดีซี จะได้เป็นแรงดันตกคร่อมที่ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองสัญญาณดีซี (r_L) เมื่อแรงดันตกคร่อมนี้มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ V_{dc} มีค่าลดลง (เทพพนม โสภานพรัตน์, 2561) ทำให้สามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ สำหรับอัตราขยาย $K_{V_{dc}}$ เป็นค่าอัตราขยายที่ใช้สำหรับปรับควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุในวงจรรองดีซีให้มีค่าลดลงเปรียบได้กับการมีอิมพีแดนซ์เสมือนต่อขนานกับตัวเก็บประจุของวงจรรองสัญญาณดีซี (Wu M. and Lu D.D.C., 2015) จึงสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้เช่นเดียวกัน

สำหรับการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้วิธีการวางโพล จะอาศัยแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโพลตรงแปลงผันแบบบัทช์ที่ไม่มีตัวควบคุมจากสมการที่ (3-50) ในบทที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5-13)

$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_C d}{L_{dc}} I_L \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{d}{C_{dc}} I_L \\ \dot{I}_L = \frac{d}{L} V_{dc} - \frac{1}{L} V_o \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \end{cases} \quad (5-13)$$

จากนั้นทำการแทนค่า d ในสมการที่ (5-13) ด้วย $d_{control}$ ในสมการที่ (5-12) จะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโพลกำลังไฟฟ้าคงตัวเมื่อพิจารณาอุปกรณ์วางโพลของรูปที่ 5.3 แสดงได้ดังสมการที่ (5-14)

$$\begin{cases}
\dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\
\dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
\dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\
\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{eq}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_C K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} V_o^* I_L \\
\quad - \frac{r_C K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} V_o I_L + \frac{r_C K_{pi} K_{iv}}{A_r L_{dc}} X_v I_L - \frac{r_C K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L^2 + \frac{r_C K_{ii}}{A_r L_{dc}} X_i I_L \\
\quad - \frac{r_C K_{I_{dc}}}{A_r L_{dc}} I_{dc} I_L - \frac{r_C K_{V_{dc}}}{A_r L_{dc}} V_{dc} I_L \\
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} V_o^* I_L + \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} V_o I_L - \frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r C_{dc}} X_v I_L \\
\quad + \frac{K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L^2 - \frac{K_{ii}}{A_r C_{dc}} X_i I_L + \frac{K_{I_{dc}}}{A_r C_{dc}} I_{dc} I_L + \frac{K_{V_{dc}}}{A_r C_{dc}} V_{dc} I_L \\
\dot{I}_L = \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r L} V_o^* V_{dc} - \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r L} V_o V_{dc} + \frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r L} X_v V_{dc} - \frac{K_{pi}}{A_r L} I_L V_{dc} \\
\quad + \frac{K_{ii}}{A_r L} X_i V_{dc} - \frac{K_{I_{dc}}}{A_r L} I_{dc} V_{dc} - \frac{K_{V_{dc}}}{A_r L} V_{dc}^2 - \frac{V_o}{L} \\
\dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\
\dot{X}_v = V_o^* - V_o \\
\dot{X}_i = -I_L - K_{pv} V_o + K_{pv} V_o^* + K_{iv} X_v
\end{cases} \tag{5-14}$$

5.3.2 การทำให้เป็นเชิงเส้น

จากสมการที่ (5-14) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ ปราบกฏอยู่ ซึ่งการวิเคราะห์ผลของค่าอัตราขยายดังกล่าวที่ทำให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพ จะดำเนินการโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่งร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งเป็นองค์ความรู้ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 และ 4 ที่ผ่านมา ดังนั้นแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณากการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้วิธีการวางโพลสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5-15)

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (5-15)$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ:

$$\delta \mathbf{x} = [\delta I_{sd} \quad \delta I_{sq} \quad \delta V_{bus,d} \quad \delta V_{bus,q} \quad \delta I_{dc} \quad \delta V_{dc} \quad \delta I_L \quad \delta V_o \quad \delta X_v \quad \delta X_i]^T$$

$$\text{ตัวแปรอินพุต: } \delta \mathbf{u} = [\delta V_m \quad \delta V_o^*]^T$$

$$\text{ตัวแปรเอาต์พุต: } \delta \mathbf{y} = [\delta I_{dc} \quad \delta V_{dc} \quad \delta I_L \quad \delta V_o]^T$$

รายละเอียดของ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ในสมการที่ (5-15) แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{S_d}{C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S_d}{L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} - \frac{r_C K_{I_{dc}} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} - \frac{r_C K_{V_{dc}} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} & a(5,7) & -\frac{r_C (K_{pv} K_{pi} + K_{V_o}) I_{L,0}}{A_r L_{dc}} & \frac{r_C K_{pi} K_{iv} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} & \frac{r_C K_{ii} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} + \frac{K_{I_{dc}} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} & \frac{K_{V_{dc}} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} & a(6,7) & \frac{(K_{pv} K_{pi} + K_{V_o}) I_{L,0}}{A_r C_{dc}} & -\frac{K_{pi} K_{iv} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} & -\frac{K_{ii} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{I_{dc}} V_{dc,0}}{A_r L} & a(7,6) & \frac{(K_{pi} + K_{I_L}) V_{dc,0}}{A_r L} & -\frac{(K_{pv} K_{pi} + K_{V_o}) V_{dc,0}}{A_r L} - \frac{1}{L} & \frac{K_{pi} K_{iv} V_{dc,0}}{A_r L} & \frac{K_{ii} V_{dc,0}}{A_r L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 \end{bmatrix}_{10 \times 10}$$

$$a(5,7) = \frac{r_C K_{pv} K_{pi} V_{o,0}^*}{A_r L_{dc}} - \frac{r_C (K_{pv} K_{pi} + K_{V_o}) V_{o,0}}{A_r L_{dc}} + \frac{r_C K_{pi} K_{iv} X_{v,0}}{A_r L_{dc}} - \frac{2r_C (K_{pi} + K_{I_L}) I_{L,0}}{A_r L_{dc}} + \frac{r_C K_{ii} X_{i,0}}{A_r L_{dc}} - \frac{r_C K_{I_{dc}} I_{dc,0}}{A_r L_{dc}} - \frac{r_C K_{V_{dc}} V_{dc,0}}{A_r L_{dc}}$$

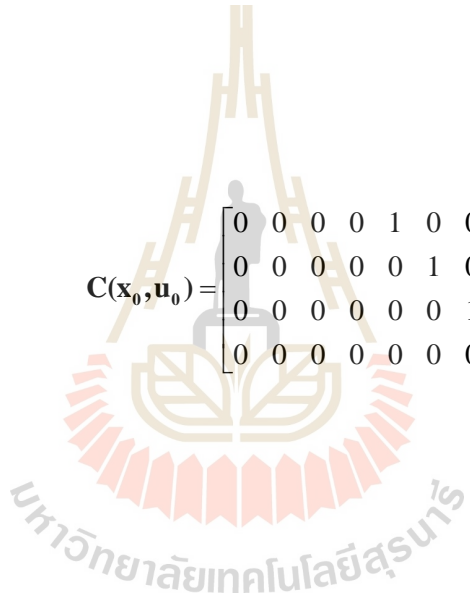
$$a(6,7) = -\frac{K_{pv} K_{pi} V_{o,0}^*}{A_r C_{dc}} + \frac{(K_{pv} K_{pi} + K_{V_o}) V_{o,0}}{A_r C_{dc}} - \frac{K_{pi} K_{iv} X_{v,0}}{A_r C_{dc}} + \frac{2(K_{pi} + K_{I_L}) I_{L,0}}{A_r C_{dc}} - \frac{K_{ii} X_{i,0}}{A_r C_{dc}} + \frac{K_{I_{dc}} I_{dc,0}}{A_r C_{dc}} + \frac{K_{V_{dc}} V_{dc,0}}{A_r C_{dc}}$$

$$a(7,6) = \frac{K_{pv}K_{pi}V_{o,0}^*}{A_rL} - \frac{(K_{pv}K_{pi} + K_{V_o})V_{o,0}}{A_rL} + \frac{K_{pi}K_{iv}X_{v,0}}{A_rL} - \frac{(K_{pi} + K_{I_L})I_{L,0}}{A_rL} + \frac{K_{ii}X_{i,0}}{A_rL} - \frac{K_{I_{dc}}I_{dc,0}}{A_rL} - \frac{2K_{V_{dc}}V_{dc,0}}{A_rL}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\cos(\lambda_0)}{L_{eq}} & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sin(\lambda_0)}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_C K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{L_{dc}} \\ 0 & -\frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{C_{dc}} \\ 0 & \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc,0}}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & K_{pv} \end{bmatrix}_{10 \times 2}$$

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

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



5.3.3 การคำนวณค่าในสภาวะคงตัว

การคำนวณหาค่าในสภาวะคงตัวของพจน์ $V_{dc,0}$, λ_0 , $V_{o,0}$, $I_{L,0}$, $X_{v,0}$, และ $X_{i,0}$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-15) สามารถดำเนินการได้โดยเริ่มต้นจากการประยุกต์ใช้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าหาค่าในสภาวะคงตัวทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง (V_{dc}) และ λ ซึ่งได้รับการพิสูจน์ไว้ในบทที่ 3 สำหรับค่าในสภาวะคงตัวของพจน์ตัวแปรที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ สามารถคำนวณได้จาก $V_{dc,0}$ และ λ โดยอาศัยสมการที่ (5-16)

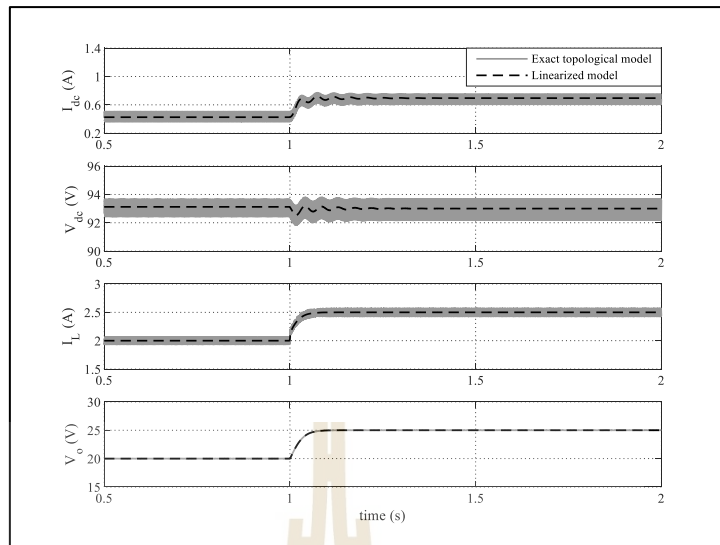
$$\begin{cases} V_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2}V_{bus,0}) - \frac{3L_{eq}\omega}{\pi} I_{dc,0} - r_L I_{dc,0} \\ V_{o,0} = V_o^* \\ I_{L,0} = \frac{V_{o,0}}{R} \\ X_{v,0} = \frac{I_{L,0}}{K_{iv}} \\ X_{i,0} = \frac{1}{K_{ii}} \left(\frac{A_r V_{o,0}}{V_{dc,0}} + K_{I_{dc}} I_{dc,0} + K_{V_{dc}} V_{dc,0} \right) \end{cases} \quad (5-16)$$

เมื่อ
$$I_{dc,0} = \frac{\sqrt{3} \left| \frac{V_s e^{j0} - V_{bus,0} e^{-j\lambda}}{Z e^{j\gamma}} \right|}{\sqrt{\frac{3}{2} \frac{2\sqrt{3}}{\pi}}}, \quad Z = \sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2} \quad \text{และ} \quad \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} \right)$$

5.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้น

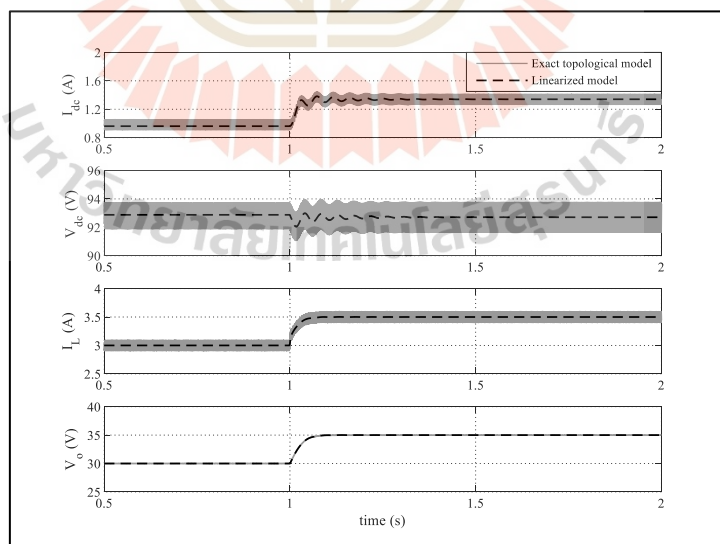
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-15) กับการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปแบบที่ 5.3 ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB รายละเอียดการเชื่อมต่อบล็อกอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ข.3 โดยกำหนดพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นในบทนี้ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของวงจรแปลงผันแบบบัทจาก 20 V ไปเป็น 25 V ที่เวลา 1 วินาที โดยกำหนดให้ค่า $K_{I_{dc}} = 0.5$ และ $K_{V_{dc}} = 0.1$ สามารถได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_o^* จาก 20 V ไปเป็น 25 V

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของวงจรแปลงผันแบบขั้วจาก 30 V ไปเป็น 35 V ที่เวลา 1 วินาที โดยกำหนดให้ค่า $K_{I_{dc}} = 1.0$ และ $K_{V_{dc}} = 0.2$ สามารถได้ดังรูปที่ 5.6

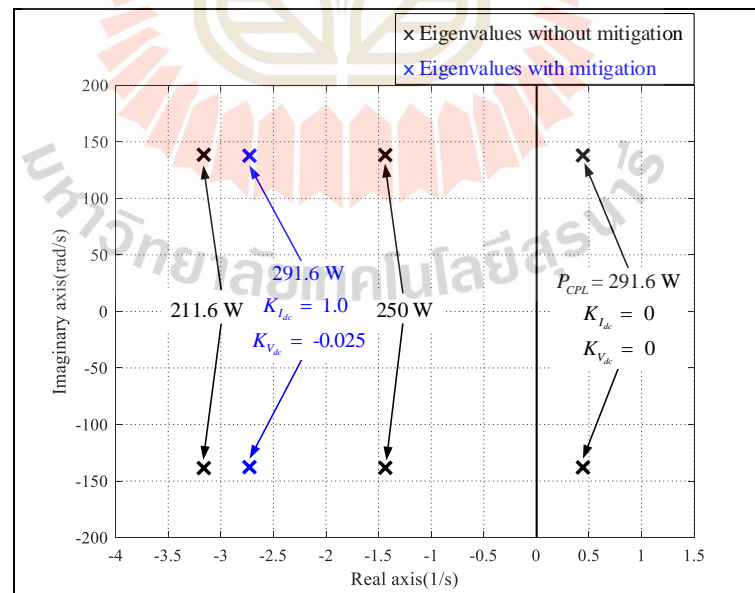


รูปที่ 5.6 ผลตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_o^* จาก 30 V ไปเป็น 35 V

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาลูปการวางโพลในรูปที่ 5.5 และ 5.6 พบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะคงตัว ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีการผสมผสานระหว่างวิธีตีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในบทนี้มีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

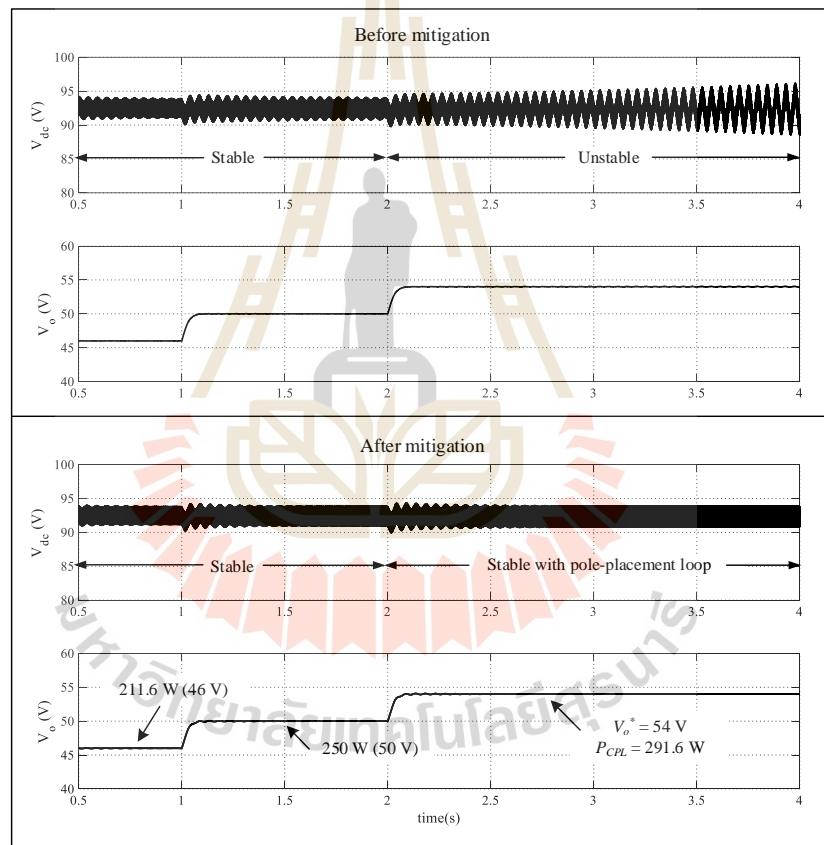
5.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.3 เพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราขยาย $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ ของลูปการวางโพลที่ทำให้ระบบที่เกิดการขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้นั้น จำเป็นต้องอาศัยเมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ของแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-15) ร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง การพิจารณาเสถียรภาพจะพิจารณาเฉพาะค่าเจาะจงเด่นของระบบเนื่องจากเป็นค่าเจาะจงที่มีผลต่อเสถียรภาพมากที่สุด การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาดังกล่าวใช้ค่าพารามิเตอร์ของระบบตามตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 โดยดำเนินการเปลี่ยนแปลงโพลดวงจรแปลงผันแบบบัตให้มีความถี่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งค่าเจาะจงเด่นของระบบเคลื่อนจากฝั่งซ้ายไปยังฝั่งขวาของระนาบเอส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

จากรูปที่ 5.7 พบว่า เมื่อปรับเพิ่มค่าโหลดวงจรแปลงผันแบบบักเทกกับ 291.6 W (54 V) โดยกำหนดให้ค่าอัตราขยาย $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ (ไม่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ) คุโพลเด่นของระบบจะเคลื่อนจากฝั่งซ้ายมาอยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอส ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ในสภาวะดังกล่าวเมื่อทำการปรับเพิ่มค่าอัตราขยาย $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ ให้มีค่าเท่ากับ 1.0 และ -0.025 ตามลำดับ (มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ) พบว่าคุโพลเด่นของระบบเคลื่อนจากฝั่งขวามาอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอส ส่งผลให้ระบบไฟฟ้ากลับมาเสถียรภาพอีกครั้ง การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์โดยการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบ ก่อนบรรเทาการขาดเสถียรภาพและหลังบรรเทาการขาดเสถียรภาพ แสดงได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ผลการจำลองสถานการณ์การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพล

จากรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่า กรณีก่อนมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ กำหนดค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ เท่ากับศูนย์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโหลดวงจรแปลงผันแบบบักจาก 211.6 W ไปเป็น 250 W และ 291.6 W ที่เวลา 1 และ 2 วินาที ตามลำดับ ที่โหลดวงจรแปลงผันแบบบักมีค่าเท่ากับ 291.6 W (54 V) ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งสามารถพิจารณา

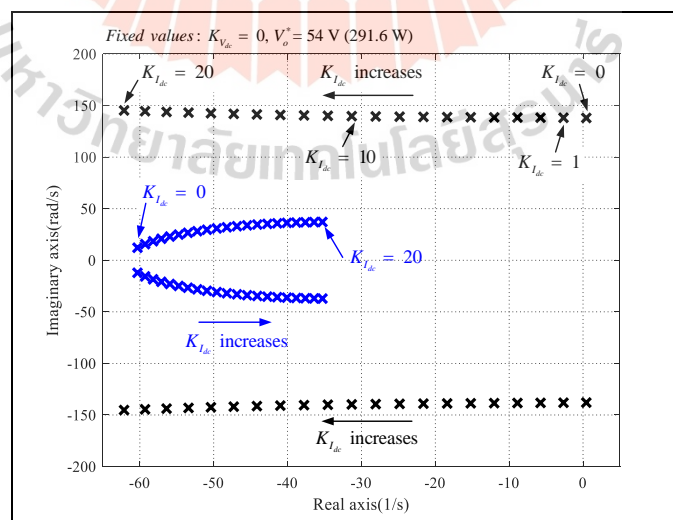
ได้จากสัญญาณ V_{dc} ที่มีการกระเพื่อมที่เพิ่มมากขึ้น แต่กรณีหลังจากมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ กำหนดให้ค่า $K_{I_{dc}} = 1.0$ และ $K_{V_{dc}} = -0.025$ จะเห็นได้ว่าระบบสามารถกลับมาเสถียรภาพ พิจารณาได้จากการลู่เข้าของสัญญาณ V_{dc} ดังนั้นผลการจำลองสถานการณ์จึงสามารถยืนยันได้ว่า วิธีการวางโพลสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบได้

ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพในหัวข้อนี้เป็นการบรรเทาเสถียรภาพโดยใช้ค่าอัตราขยาย การวางโพลที่ได้จากการสุ่มค่า ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอแนวทางสำหรับการออกแบบค่า อัตราขยายการวางโพลไว้ในหัวข้อถัดไป

5.5 การออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพล

5.5.1 วิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง

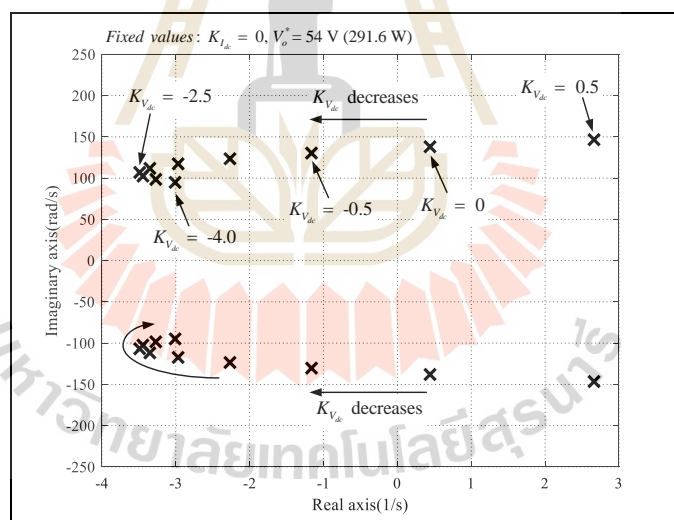
- การออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง การออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าเจาะจงของระบบ ที่จุดขาดเสถียรภาพ โดยจะเลือกค่าอัตราขยายการวางโพลค่าน้อยที่สุดที่เพียงพอต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ (sufficiently small values) ค่าอัตราขยายในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลมีเพียง 2 ค่า ได้แก่ $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ การออกแบบค่าอัตราขยายดังกล่าวสามารถทำได้ โดยการเลือกออกแบบทีละค่า สำหรับการออกแบบค่าอัตราขยาย $K_{I_{dc}}$ จะกำหนดให้ค่าอัตราขยาย $K_{V_{dc}}$ เท่ากับศูนย์ จากนั้นทำการปรับเพิ่มค่าอัตราขยาย $K_{I_{dc}}$ ซึ่งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ค่าเจาะจงเด่นของระบบที่จุดขาดเสถียรภาพ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยาย $K_{I_{dc}}$

จากรูปที่ 5.9 สามารถออกแบบค่าอัตราขยาย $K_{I_{dc}}$ ได้เท่ากับ 1 เนื่องจากเป็นค่าอัตราขยายที่มีค่าน้อยที่สุดที่สามารถทำให้คูโพลเด่นของระบบไฟฟ้าเคลื่อนจากฝั่งขวามายังฝั่งซ้ายของระนาบเอส ซึ่งเป็นการบรรเทาให้ระบบที่เกิดการขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพ นอกจากนี้ยังสามารถระบุได้ว่าขอบเขตของค่าอัตราขยาย $K_{I_{dc}}$ มีค่าเท่ากับ 10 เนื่องจากการปรับเพิ่มค่าอัตราขยาย $K_{I_{dc}}$ มากกว่า 10 จะส่งผลให้คูโพลเด่นของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเป็นคูโพลใหม่ ซึ่งแสดงได้ดังคูโพลสีน้ำเงิน โดยคูโพลสีน้ำเงินมีค่าความถี่ธรรมชาติต่ำกว่าคูโพลสีดำ ดังนั้นหากระบบมีการเปลี่ยนแปลงคูโพลเด่นจากคูโพลสีดำไปเป็นคูโพลสีน้ำเงิน จะทำให้สมรรถนะในการตอบสนองของระบบแย่ลง อีกทั้งคูโพลสีน้ำเงินยังมีทิศทางเคลื่อนโพลจากฝั่งซ้ายไปยังฝั่งขวาของระนาบเอส ซึ่งอาจจะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้

การออกแบบค่าอัตราขยาย $K_{V_{dc}}$ จะกำหนดให้ค่าอัตราขยาย $K_{I_{dc}}$ เท่ากับศูนย์ จากนั้นทำการปรับค่าอัตราขยาย $K_{V_{dc}}$ แต่เนื่องจากการปรับเพิ่มค่าดังกล่าวส่งผลให้คูโพลเด่นเคลื่อนไปทางขวาของระนาบเอสมากยิ่งขึ้น ทำให้ไม่สามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงต้องปรับค่าอัตราขยาย $K_{V_{dc}}$ ให้ลดลง เพื่อให้ระบบกลับมามีเสถียรภาพ ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10



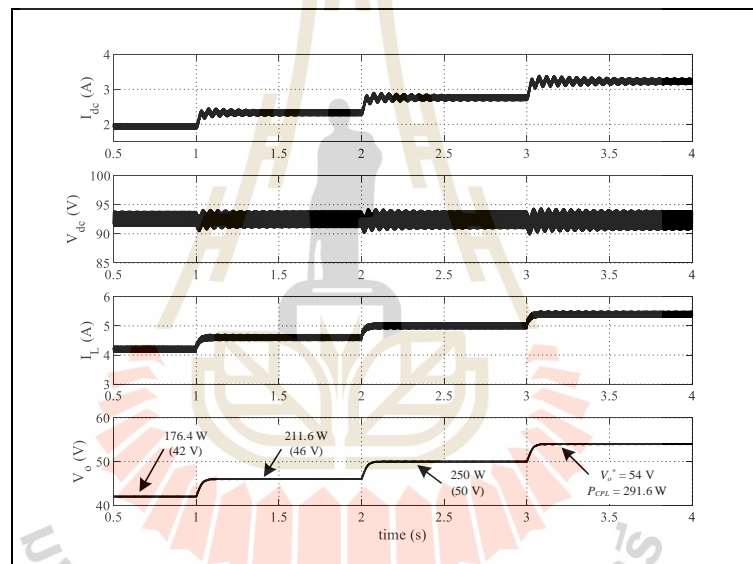
รูปที่ 5.10 ค่าเจาะจงเด่นของระบบที่จุดขาดเสถียรภาพ
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยาย $K_{V_{dc}}$

จากรูปที่ 5.10 สามารถเลือกค่าอัตราขยาย $K_{V_{dc}}$ ตามเงื่อนไขการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง ได้เท่ากับ -0.5 และสามารถระบุได้ว่าขอบเขตของค่าอัตราขยาย $K_{V_{dc}}$ มีค่าเท่ากับ -2.5 เนื่องจากการปรับลดค่าอัตราขยาย $K_{V_{dc}}$ ให้น้อยกว่า -2.5 จะส่งผลให้คูโพลเด่นของระบบไฟฟ้าเกิดการวอกกลับและเคลื่อนไปทางฝั่งขวาของระนาบเอส

พิจารณาจากรูปที่ 5.9 และ 5.10 สามารถสรุปผลการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองได้ว่า $K_{I_{dc}}$ เท่ากับ 1 และ $K_{V_{dc}}$ เท่ากับ -0.5

- การยืนยันผลการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง

การออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองในหัวข้อที่ผ่านมา จำเป็นต้องมีการยืนยันผลการวิเคราะห์เพื่อแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราขยายที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ โดยผลการยืนยันผลดังกล่าวจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ เมื่อใช้อัตราขยายการวางโพลที่ออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง

จากรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มลู่การวางโพลเข้าไปในระบบ โดยใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลจากการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง จะส่งผลให้ระบบที่เคยเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อค่าโพลตกค้างไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 291.6 W (54 V) สามารถกลับมา มีเสถียรภาพได้

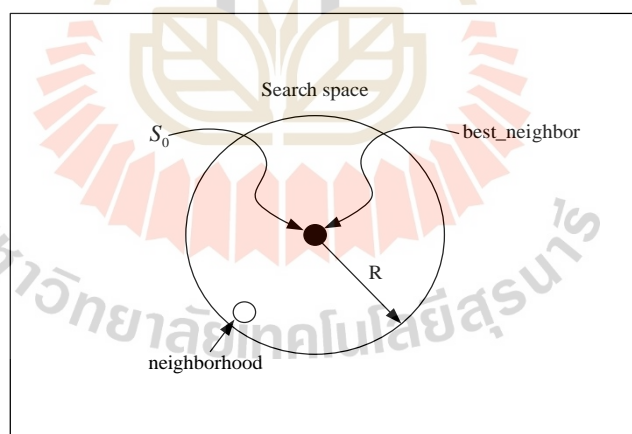
5.5.2 วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

- หลักการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search; ATS) เป็นวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์วิธีหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาขึ้นจากวิธีการค้นหาแบบตาบู่ (Tabu Search; TS) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ อัลกอริทึมนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยมีการเพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่แบบดั้งเดิม ได้แก่ กลไกการเดินย้อนรอย (back tracking) ซึ่งเป็นกลไกที่อนุญาตให้ระบบการค้นหาสามารถย้อนกลับไปค้นหาคำตอบในบริเวณพื้นที่เดิมที่เคยถูกค้นหามาก่อน เพื่อแก้ปัญหาการติดอยู่ในคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) และกลไกการปรับรัศมีการค้นหา (adaptive radius) ที่ช่วยในการปรับลดรัศมีในระหว่างการค้นหาจนกระทั่งการค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุด (Puangdownreong D., Areerak K-N., Srikaew A., Sujitjorn S., and Totarong P., 2002) อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวสามารถพิจารณาได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

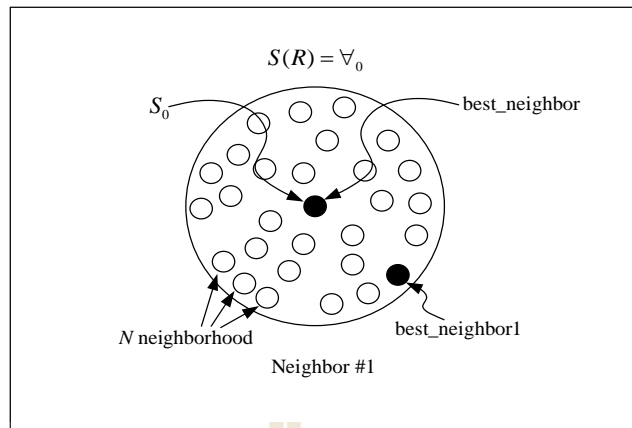
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น S_0 ภายในพื้นที่การค้นหา และให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) แสดงได้ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 สุ่มหาค่า S_0 ในพื้นที่การค้นหา

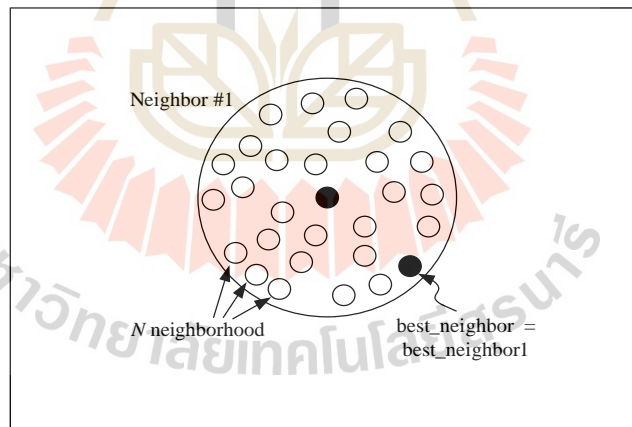
ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบ จำนวน N คำตอบ รอบ ๆ S_0 ภายในพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ ซึ่งเรียกว่าคำตอบรอบข้าง แสดงได้ดังรูปที่ 5.13



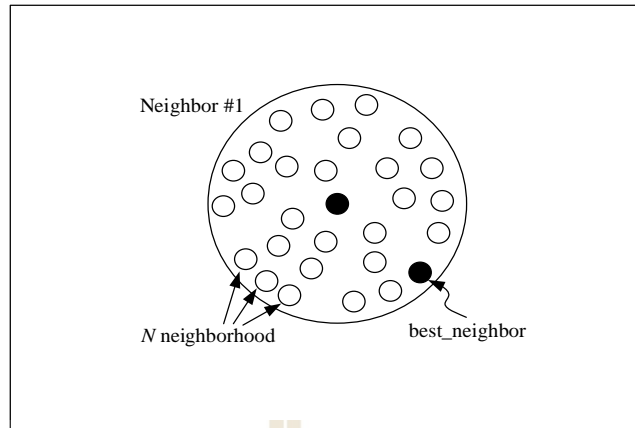
รูปที่ 5.13 ค่าใกล้เคียงรอบ ๆ S_0

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประเมินค่าตอบรอบข้างด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ โดยกำหนดให้ S_1 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดใ $S(R)$

ขั้นตอนที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ ดังนั้นกำหนดให้ $S_0 = S_1$ และเก็บค่า S_0 ในรายการตาม แสดงได้ดังรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15

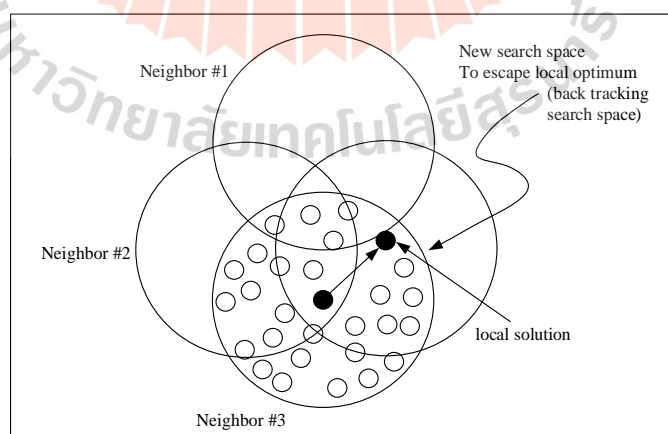


รูปที่ 5.14 กำหนดค่าใกล้เคียงใหม่

รูปที่ 5.15 กำหนดค่า S_0 ใหม่

ขั้นตอนที่ 6 ถ้า $count \geq count_{max}$ จะหยุดกระบวนการค้นหา โดยที่ค่า S_0 คือ ค่าตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 และเริ่มกระบวนการใหม่อีกครั้งจนกระทั่งได้คำตอบที่พึงพอใจ

ขั้นตอนที่ 7 จะเข้าสู่กลไกการเดินย้อนรอย เมื่อจำนวนคำตอบในแต่ละรอบไม่หลุดออกจากคำตอบที่เป็นแบบวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจำนวนคำตอบเท่ากับจำนวนคำตอบสูงสุดที่ทำการตั้งค่าไว้ กลไกนี้จะเลือกคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในพื้นที่การค้นหาเดิมในรายการตามูเพื่อนำมากำหนดเป็นคำตอบเริ่มต้นสำหรับการค้นหาในรอบถัดไป ทั้งนี้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น แสดงได้ดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 กลไกการเดินย้อนรอย

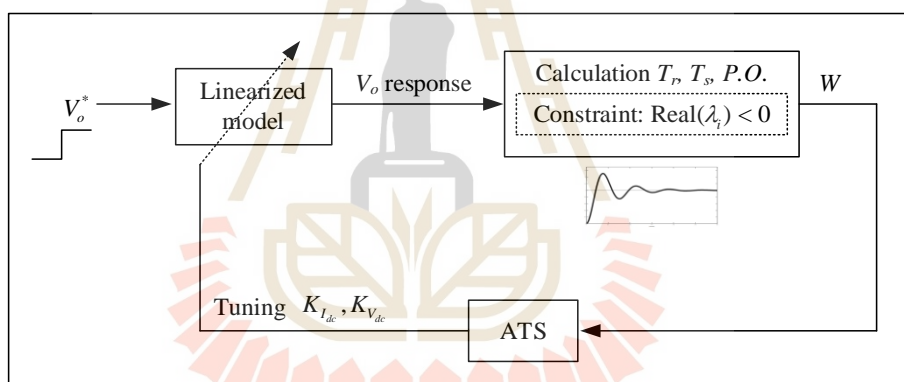
ขั้นตอนที่ 8 จะเข้าสู่กลไกการปรับลดค่ารัศมีการค้นหา โดยจะปรับลดรัศมีลงเรื่อย ๆ ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5-17)

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (5-17)$$

โดยที่ $DF > 1$ คือ ตัวประกอบปรับลดรัศมี (Decreasing Factor)

- การออกแบบอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

โครงสร้างบล็อกไดอะแกรมสำหรับการออกแบบอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว แสดงดังรูปที่ 5.17 ประกอบด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลและอัลกอริทึมการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว



รูปที่ 5.17 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการออกแบบอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

จากรูปที่ 5.17 แสดงขั้นตอนการออกแบบอัตราขยายการวางโพลของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ปรับตั้งค่าโพลของวงจรถ่วงปรับแบบบัพในจุดการทำงานที่ต้องการ ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ค่าโพลดังกล่าวเปลี่ยนแปลงจาก 250 W (50 V) ไปเป็น 291.6 W (54 V) ซึ่งเป็นจุดขาดเสถียรภาพที่ต้องการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์เสถียรภาพที่จุดขาดเสถียรภาพ โดยอาศัยเมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (5-15) มาวิเคราะห์ภายใต้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$

ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพผ่านเงื่อนไข (penalty condition) โดยส่วนจริงของค่าเจาะจงทุกค่าจะต้องน้อยกว่าศูนย์ หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวจะไม่นำค่าอัตราขยายการวางโพลมาพิจารณาในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 3 ทำการประเมินค่าสมรรถนะการควบคุมของ V_o โดยอาศัยค่าอัตราขยายการวางโพลที่ผ่านเงื่อนไขการมีเสถียรภาพในขั้นตอนที่ 2 ค่าสมรรถนะการควบคุมที่ใช้พิจารณาในการประเมิน ได้แก่ ช่วงเวลาขาขึ้น (Rise time; T_r), ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time; T_s) และเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Percent overshoot; $P.O.$) สมการของค่าสมรรถนะสามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (W) แสดงได้ดังสมการที่ (5-18) ซึ่งค่าสมรรถนะที่ทำให้ผลการตอบสนองที่ดีที่สุดจะต้องมีค่า W น้อยที่สุด

$$W = \alpha \left(\frac{T_{r,ATS}}{T_{r,CONV}} \right) + \beta \left(\frac{T_{s,ATS}}{T_{s,CONV}} \right) + \gamma \left(\frac{P.O.,ATS}{P.O.,CONV} \right) \quad (5-18)$$

โดยที่ $T_{r,ATS}$ คือ ช่วงเวลาขาขึ้นของ V_o โดยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (วินาที)

$T_{s,ATS}$ คือ ช่วงเวลาเข้าที่ของ V_o โดยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (วินาที)

$P.O.,ATS$ คือ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินของ V_o โดยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (เปอร์เซ็นต์)

$T_{r,CONV}$ คือ ช่วงเวลาขาขึ้นของ V_o โดยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง (วินาที)

$T_{s,CONV}$ คือ ช่วงเวลาเข้าที่ของ V_o โดยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง (วินาที)

$P.O.,CONV$ คือ เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินของ V_o โดยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง (เปอร์เซ็นต์)

เมื่อ α , β และ γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสำคัญของค่า T_r , T_s และ $P.O.$ ตามลำดับ ซึ่งในการออกแบบจะให้ความสำคัญของค่า T_r , T_s และ $P.O.$ เท่า ๆ กัน โดยนำค่าสมรรถนะจากวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ($T_{r,ATS}$, $T_{s,ATS}$, $P.O.,ATS$) หาดด้วยค่าสมรรถนะจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง ($T_{r,CONV}$, $T_{s,CONV}$, $P.O.,CONV$) แสดงดังสมการที่ (5-19) และกำหนดให้ค่า α , β และ γ เท่ากับ 0.33, 0.33 และ 0.34 ตามลำดับ

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (5-19)$$

ขั้นตอนที่ 4 นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (W) ส่งให้อัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ทำการค้นหาค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ จากนั้นส่งค่าอัตราขยายดังกล่าวให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการหาผลตอบสนองของ V_o ต่อไป กระบวนการค้นหาจะมีลักษณะการทำงานซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 100 รอบ เมื่อครบ 100 รอบ อัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวจะส่งค่าอัตราขยายการวางโพลที่ดีที่สุดเป็นคำตอบของกระบวนการ อย่างไรก็ตาม หากกระบวนการค้นหาเจอคำตอบที่ดีที่สุดจะให้คำตอบออกมาทันทีก่อนการวนซ้ำ 100 รอบ

การออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว จำเป็นต้องมีการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม เพื่อให้การค้นหามีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว มี 4 ค่า คือ จำนวนคำตอบเริ่มต้น จำนวนคำตอบรอบข้าง ค่ารัศมีการค้นหา และค่าอัตราปรับลดรัศมี หากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความเหมาะสมจะทำให้กระบวนการในการค้นหาด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยรายละเอียดของการทดสอบพารามิเตอร์ทั้ง 4 นั้นจะได้รับการนำเสนอไว้ที่ภาคผนวก ค. ในตารางที่ ค.1- ตารางที่ ค.4 โดยผู้วิจัยได้เลือกพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว จากค่า W เหลือที่น้อยที่สุด สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 พารามิเตอร์ของการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

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

ลำดับถัดไปจะเป็นการกำหนดขอบเขตการค้นหาอัตราขยายการวางโพล โดยสามารถพิจารณาได้จากการวิเคราะห์ค่าเงาของระบบเมื่อมีการปรับเพิ่มค่าอัตราขยายการวางโพล การวิเคราะห์ดังกล่าวได้ถูกนำเสนอไว้แล้วในรูปที่ 5.9 และ 5.10 ข้อจำกัดในการปรับค่าอัตราขยายการวางโพลของผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 5.9 และ 5.10 จะถูกนำมากำหนดเป็นขอบเขตขอบเขตการค้นหาอัตราขยายการวางโพล ซึ่งค่าคำตอบที่ได้จากการค้นหาต้องไม่ชนกับขอบเขตบนหรือขอบเขตล่างที่กำหนดไว้ หากค่าคำตอบที่ได้ชนกับขอบเขตบนหรือขอบเขตล่าง จะต้องกำหนดขอบเขตของคำตอบใหม่ ดังนั้นจะได้ขอบเขตการค้นหาอัตราขยายการวางโพลดังตารางที่ 5.6

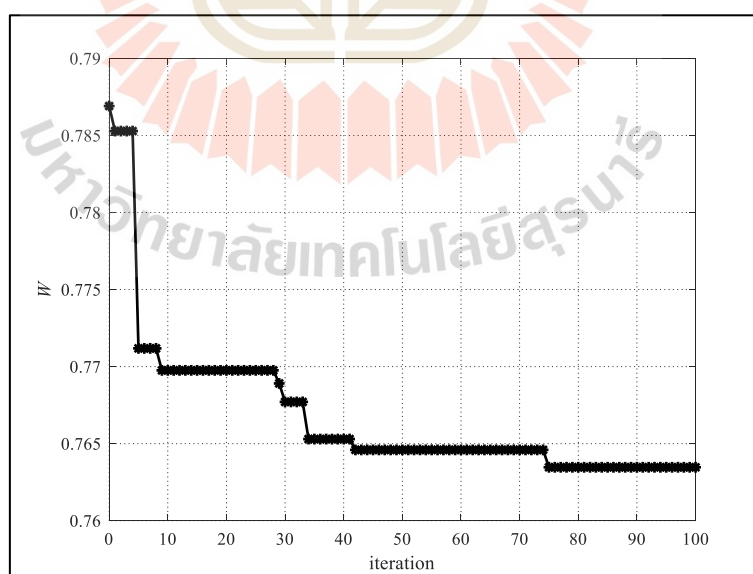
ตารางที่ 5.6 ขอบเขตการค้นหาค่าอัตราขยายการวางโพล

พารามิเตอร์ของลูการวางโพล	ขอบเขตการค้นหา	
	ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
$K_{I_{dc}}$	0	10
$K_{V_{dc}}$	-2.5	0

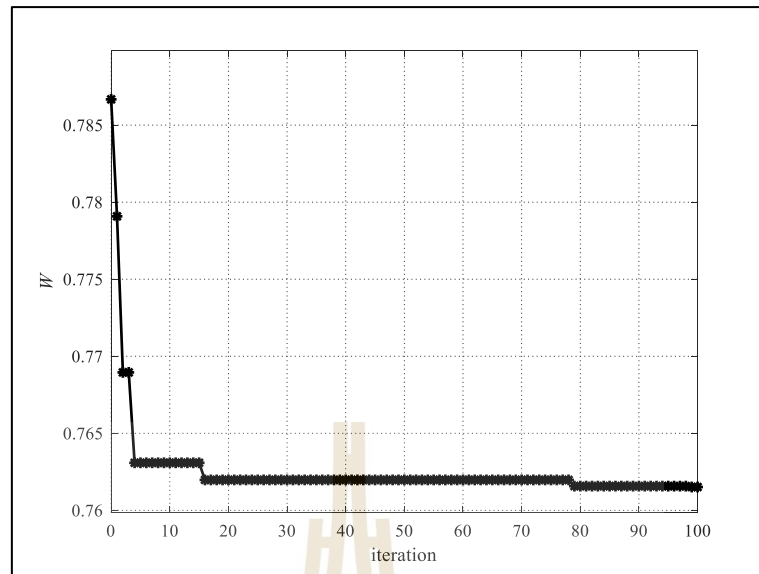
เมื่อทราบถึงกระบวนการขอบเขตการค้นหาค่าอัตราขยายการวางโพลแล้ว จะนำไปสู่การใช้อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ในการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพล ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมของโพลดน้อยที่สุด ซึ่งผลการออกแบบค่าดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

- ผลการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

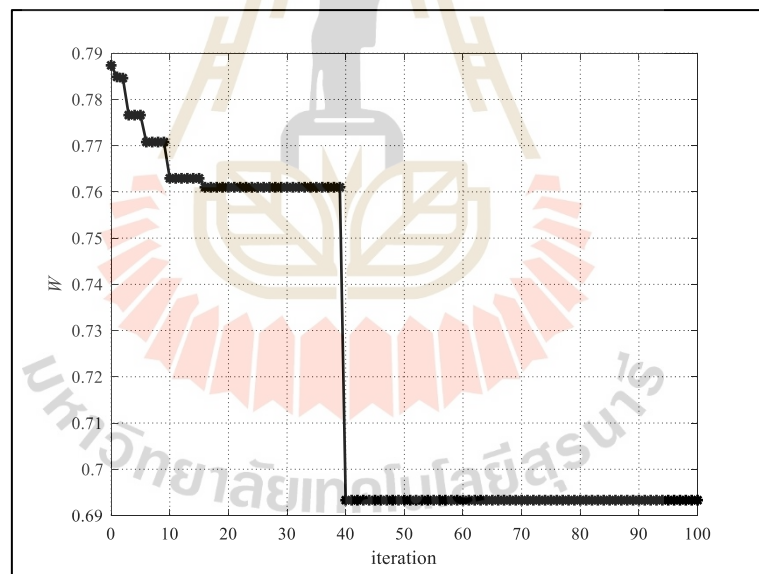
จากการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ที่ผ่านมา ทำให้สามารถประยุกต์ใช้กระบวนการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ในการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ สำหรับระบบไฟฟ้าในรูปที่ 5.3 ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาผลการลู่เข้าของค่า W โดยผลการลู่เข้าดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.18 – 5.22



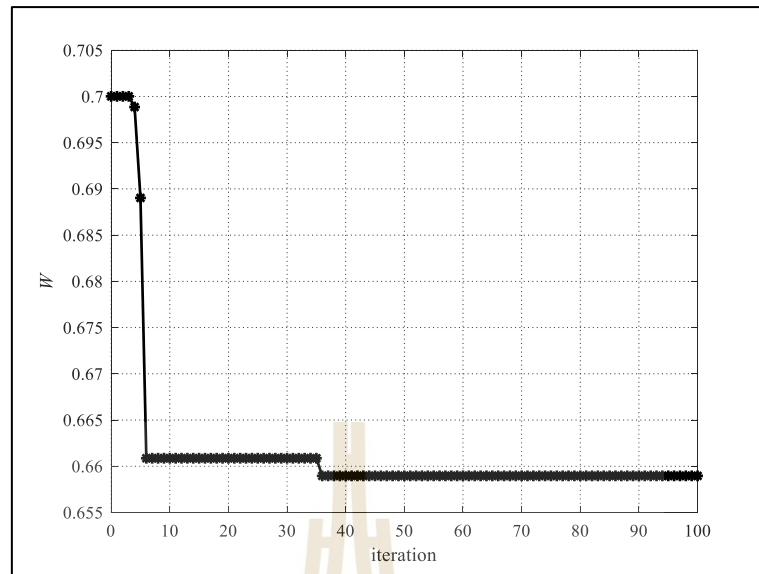
รูปที่ 5.18 การลู่เข้าสู่ค่าตอบของวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ครั้งที่ 1



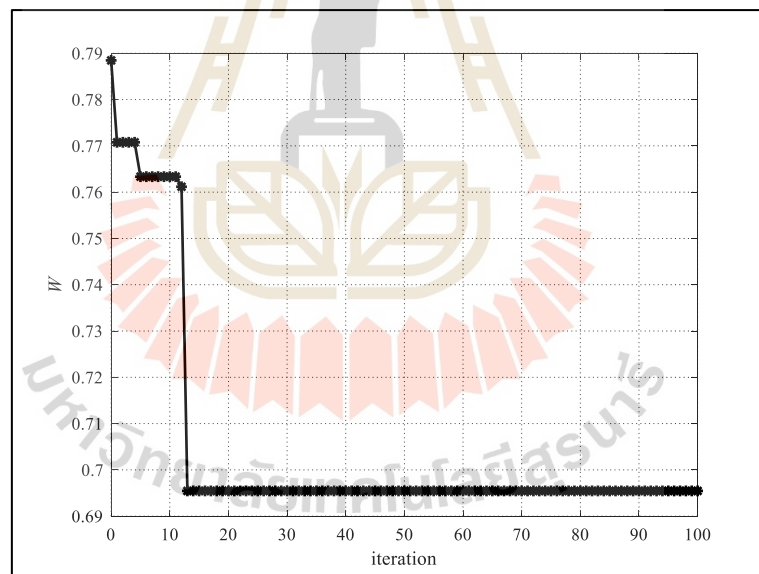
รูปที่ 5.19 การลู่เข้าสู่คำตอบของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ครั้งที่ 2



รูปที่ 5.20 การลู่เข้าสู่คำตอบของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ครั้งที่ 3



รูปที่ 5.21 การลู่เข้าสู่คำตอบของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ครั้งที่ 4



รูปที่ 5.22 การลู่เข้าสู่คำตอบของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว ครั้งที่ 5

ตารางที่ 5.7 ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

ครั้งที่	ค่าที่ออกแบบ		ค่า W
	$K_{I_{dc}}$	$K_{V_{dc}}$	
1	9.88	-0.94	0.7635
2	9.90	-1.00	0.7615
3	9.95	-0.98	0.6933
4	8.86	-1.68	0.6590
5	9.91	-0.99	0.6955

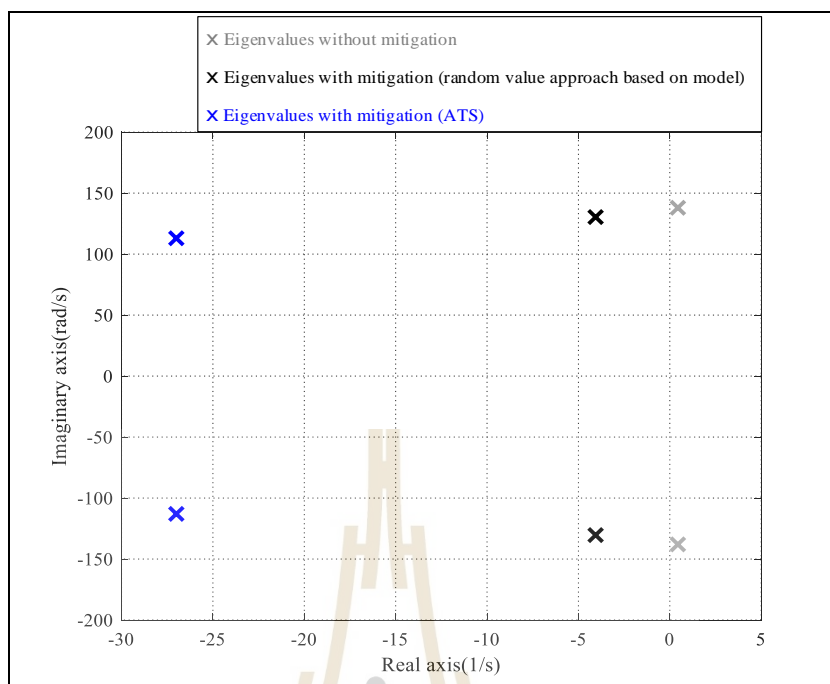
จากตารางที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ ที่ดีที่สุดจากการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว คือ 8.86 และ -1.68 ตามลำดับ การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ค่าอัตราขยายดังกล่าว จะถูกนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

- การยืนยันผลการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวเปรียบเทียบกับวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง

ค่าอัตราขยายการวางโพลที่ออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว สามารถสรุปผลการออกแบบได้ดังตารางที่ 5.8 สำหรับผลการวิเคราะห์ค่าเจาะจงเด่นของระบบที่ใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว มาเปรียบเทียบกับวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.23

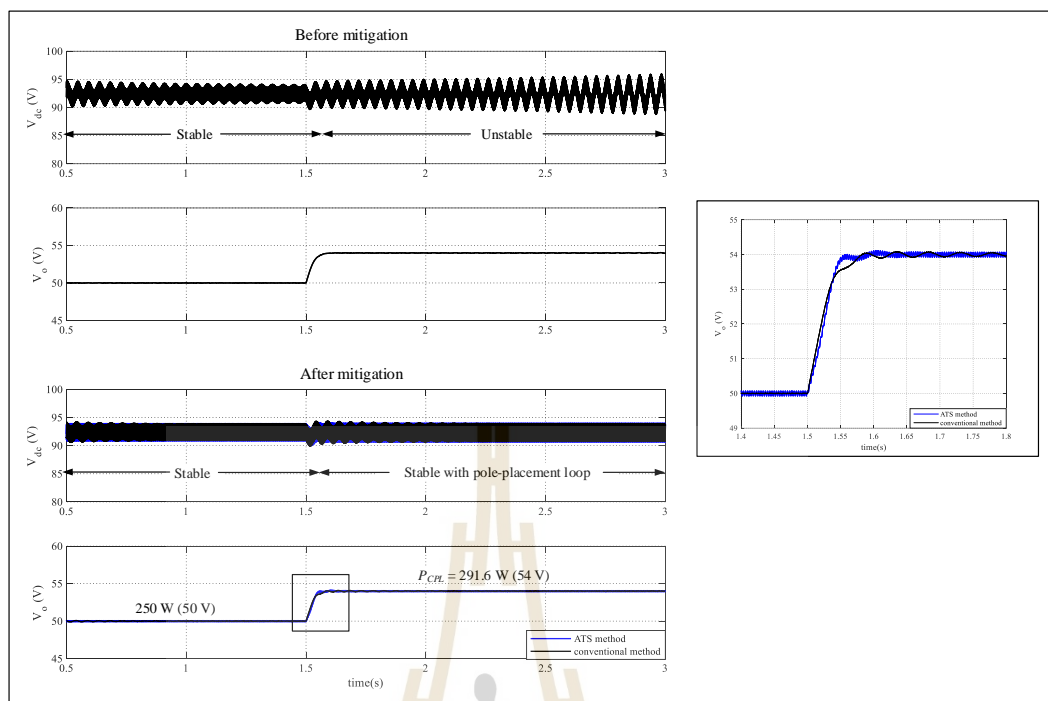
ตารางที่ 5.8 ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

วิธีการออกแบบ	$K_{I_{dc}}$	$K_{V_{dc}}$
วิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง	1	-0.5
วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว	8.86	-1.68



รูปที่ 5.23 ค่าเจาะจงเด่นของระบบที่ใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวเปรียบเทียบกับวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง

จากรูปที่ 5.23 เมื่อเปรียบเทียบค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่ใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวและวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองพบว่าวิธีการออกแบบทั้งสองวิธีสามารถทำให้ตำแหน่งคูโพลเด่นของระบบไฟฟ้าที่จุดขาดเสถียรภาพย้ายมาอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอส โดยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว มีตำแหน่งคูโพลเด่นอยู่ห่างจากแกนจินตภาพมากกว่าวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของคูโพลเด่นจะส่งผลโดยตรงต่อผลการตอบสนองของระบบ สำหรับการยืนยันผลการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพล จะดำเนินการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ เมื่อใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลที่ได้รับการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวกับวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตาข่ายปรับตัวเปรียบเทียบกับวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง

จากรูปที่ 5.24 จะเห็นได้ว่าการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตาข่ายปรับตัว สามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ อีกทั้งยังสามารถทำให้การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันแบบบuckมีสมรรถนะที่ดีกว่าการใช้อัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง

5.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นี้ได้นำเสนอแนวทางการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลมีหลักการสำคัญ คือ การนำสัญญาณตัวแปรสถานะของระบบมาคูณกับค่าอัตราขยายการวางโพลเพื่อย้ายตำแหน่งโพลของระบบที่อยู่ทางฝั่งขวาของระนาบเอสไปยังฝั่งซ้ายของระนาบเอส ซึ่งสัญญาณของตัวแปรสถานะที่นำมาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพนั้นสามารถเลือกเฉพาะตัวแปรสถานะที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพมาใช้ในรูปการวางโพลได้ โดยอาศัยหลักการตัวประกอบร่วมในการระบุตัวแปรสถานะดังกล่าว ทำให้สามารถลดจำนวนค่าอัตราขยายที่จะนำมาใช้ในรูปการวางโพลให้เหลือเพียง $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ วิธีการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลที่ได้นำเสนอ

ในบทนี้มี 2 วิธี ได้แก่ วิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว สำหรับวิธีการแรกเป็นการเลือกค่าอัตราขยายการวางโพลที่มีค่าน้อยที่สุดที่เพียงพอต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ส่วนวิธีการที่สองจะอาศัยอัลกอริทึมทางปัญญาประดิษฐ์ในการค้นหาค่าอัตราขยายการวางโพล โดยมีการเพิ่มเงื่อนไขการเปรียบเทียบสมรรถนะของ V_o เข้าไปในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อให้ได้ค่าอัตราขยายการวางโพลที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมแรงดันเอาต์พุตของโหลดน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพล รวมถึงการจำลองสถานการณ์เพื่อยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ค่าอัตราขยายที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทั้งสอง การดำเนินงานในลักษณะเช่นนี้เป็นการต่อยอดจากงานวิจัยในอดีตและปัจจุบันที่ยังไม่มีงานวิจัยใดนำวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม นอกจากนี้วิธีการวางโพลยังเป็นวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ไม่มีพจน์ของการอนุพันธ์สัญญาณ ทำให้ไม่มีผลของการขยายสัญญาณรบกวน ดังนั้นจึงถือได้ว่าเป็นจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อย่างไรก็ตามการยืนยันสมรรถนะของวิธีการวางโพลที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะได้นำผลการสร้างชุดทดสอบเพื่อยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอในบทนี้ รายละเอียดเกี่ยวกับการสร้างชุดทดสอบจะได้นำเสนอในบทที่ 6 เป็นลำดับถัดไป

บทที่ 6

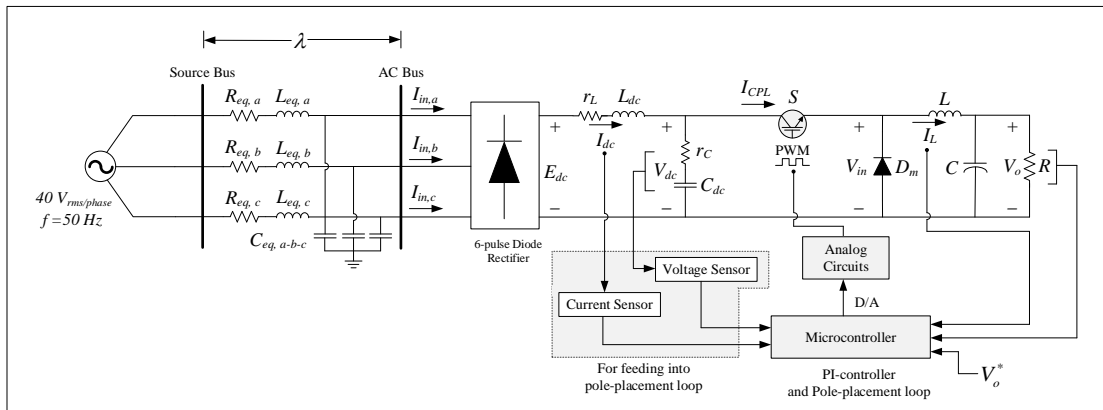
การสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลด เป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม

6.1 บทนำ

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลในบทที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า หลักการของวิธีการวางโพลสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้ ซึ่งสามารถยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้จากการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB อย่างไรก็ตามการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์เพียงอย่างเดียวอาจมีความน่าเชื่อถือไม่เพียงพอ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบสำหรับนำไปใช้ในการทดสอบสภาวะการขาดเสถียรภาพและสภาวะที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพล การสร้างชุดทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ทางฝั่งแหล่งจ่ายและทางฝั่งโหลด โดยทางฝั่งแหล่งจ่ายจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูลต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ผ่านวงจรกรองสัญญาณดีซีเพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับโหลด สำหรับทางฝั่งโหลดประกอบไปด้วยวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่ โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA2560 ในการควบคุมสัญญาณพัลส์ของวงจรแปลงผันแบบบัก นอกจากนี้ยังได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบวงจรของชุดทดสอบ ความรู้เบื้องต้นในการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ อีกทั้งยังได้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของชุดทดสอบ เพื่อใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของชุดทดสอบจะเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของชุดทดสอบ ซึ่งจะนำเสนอในบทที่ 7 เป็นลำดับถัดไป

6.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ คือ ระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม เมื่อพิจารณาระบบดังกล่าวโดยมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพล จะสามารถแสดงระบบไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 6.1



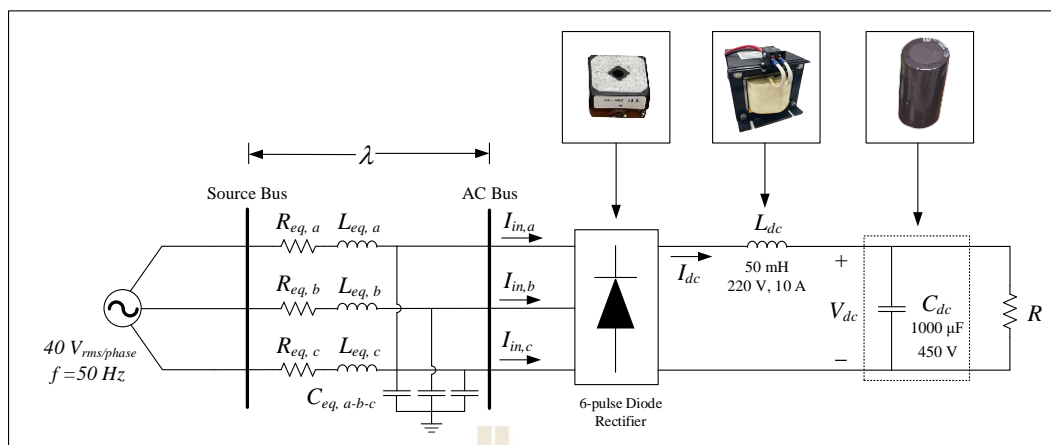
รูปที่ 6.1 ระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาสำหรับสร้างชุดทดสอบ

จากรูปที่ 6.1 เป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับสร้างชุดทดสอบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ฟังก์ชันจ่ายและฟังก์ชันโหลด โดยฟังก์ชันจ่ายจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูลที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านวงจรสมมูลสายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ผ่านวงจรกรองสัญญาณดีซีเพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับจ่ายให้แก่โหลด สำหรับฟังก์ชันโหลดประกอบด้วย วงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และวงจรการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพล

การสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 6.1 สามารถดำเนินการได้โดยเริ่มต้นจากการสร้างวงจรทางฟังก์ชันจ่าย คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดยในขั้นแรกจะพิจารณาโหลดของวงจรดังกล่าวเป็นตัวต้านทาน ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

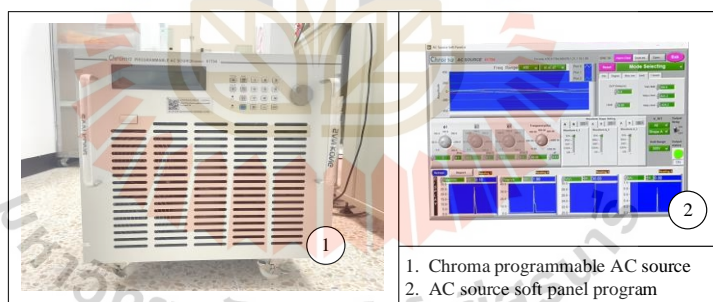
6.2.1 ภาพรวมของระบบ

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูล วงจรไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองสัญญาณดีซีซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ และโหลดของวงจรในที่นี้คือตัวต้านทาน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

จากรูปที่ 6.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส คือ CHROMA Programmable 3-Phase AC source MODEL 61704 Series ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สามารถคงค่าระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุลให้คงที่ผ่านโปรแกรม AC Source Soft Panel ที่ติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ จึงช่วยลดปัญหาค่าแรงดันตกเมื่อโหลดในระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ชุด CHROMA Programmable AC source

การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ (Mohan, N., Underland, T. M., and Robbins, W. P., 2003) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6-1)

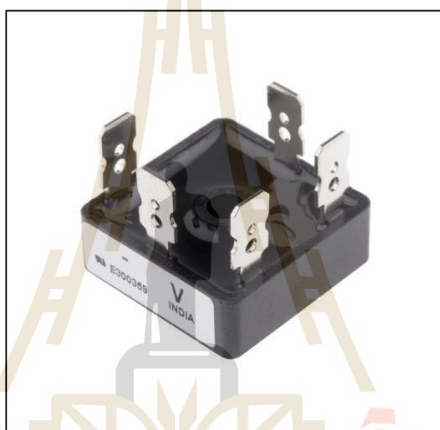
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad (6-1)$$

เมื่อ V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และ V_m คือ แรงดันค่ายอดของไฟฟ้ากระแสสลับ

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ในรูปที่ 6.2 ประกอบด้วย มอดูลไดโอดสำเร็จรูป รุ่น VS-36MT160 ตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรองกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส และตัวเก็บประจุสำหรับกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- มอดูลไดโอดสำเร็จรูป รุ่น VS-36MT160

อุปกรณ์สวิตช์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่ใช้ไดโอด 6 ตัว ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้มอดูลไดโอดสำเร็จรูป รุ่น VS-36MT160 ของบริษัท Vishay ที่มีพิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 35 A และพิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1600 V แสดงดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 มอดูลไดโอดสามเฟส รุ่น VS-36MT160

- ตัวเหนี่ยวนำสำหรับกรองกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟส
ตัวเหนี่ยวนำของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์มีขนาดเท่ากับ 50 mH
พิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10 A ผลิตโดยบริษัท ESTEL สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรเรียงกระแส

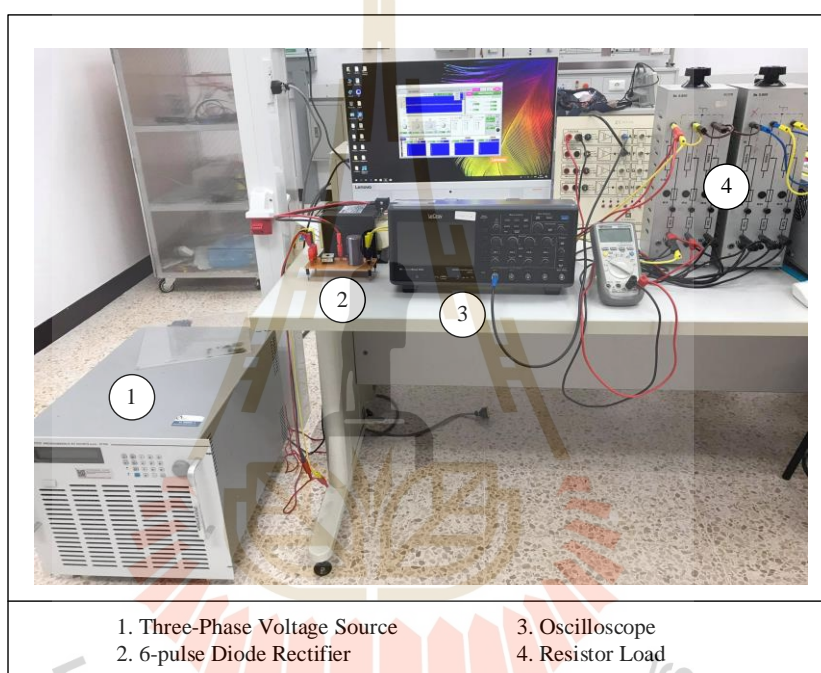
- ตัวเก็บประจุสำหรับกรองแรงดันปัลส์ดีซี
ตัวเก็บประจุที่ใช้สำหรับกรองแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์
มีขนาดเท่ากับ 1000 μF พิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 450 V ผลิตโดยบริษัท NIPPON สามารถแสดงได้
ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 ตัวเก็บประจุของวงจรเรียงกระแส

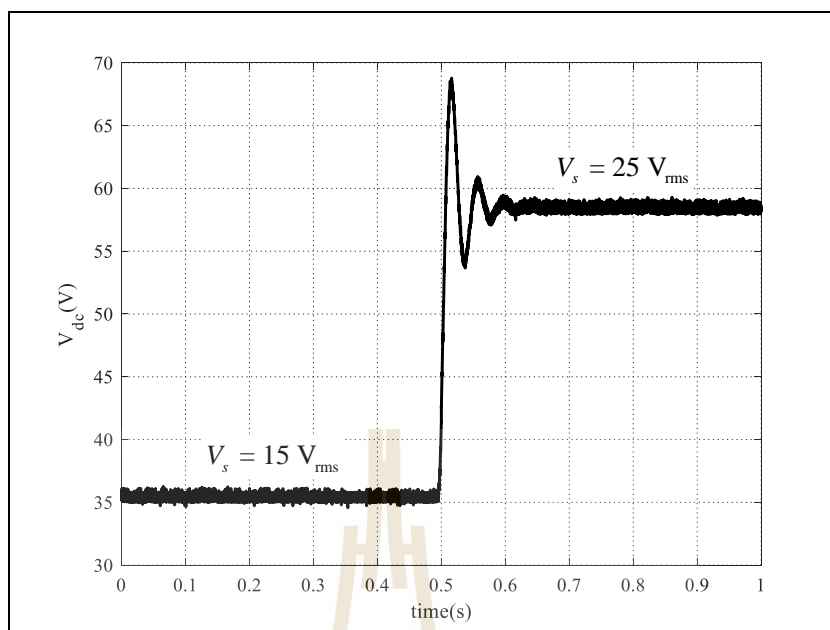
6.2.2 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

การทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานในหัวข้อนี้ จะดำเนินการโดยเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอินพุตของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ เพื่อดูผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากชุดทดสอบ สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของผลตอบสนองที่ได้จากชุดทดสอบจะใช้ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (6-1) โดยชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

การทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานของชุดทดสอบในรูปที่ 6.7 กำหนดให้แรงดันอินพุตของวงจรเรียงกระแสมีการเปลี่ยนแปลงจาก $15 V_{\text{rms}}$ ไปเป็น $25 V_{\text{rms}}$ ซึ่งจากสมการที่ (6-1) จะสามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้เท่ากับ $\frac{3\sqrt{3} \times \sqrt{2} \times 15}{\pi} = 35.09 \text{ V}$ และ $\frac{3\sqrt{3} \times \sqrt{2} \times 25}{\pi} = 58.48 \text{ V}$ ตามลำดับ โดยเมื่อกำหนดให้โหลดตัวต้านทาน $R = 20 \ \Omega$ และทำการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันอินพุตที่เวลา 0.5 วินาที จะได้ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานแสดงได้ดังรูปที่ 6.8



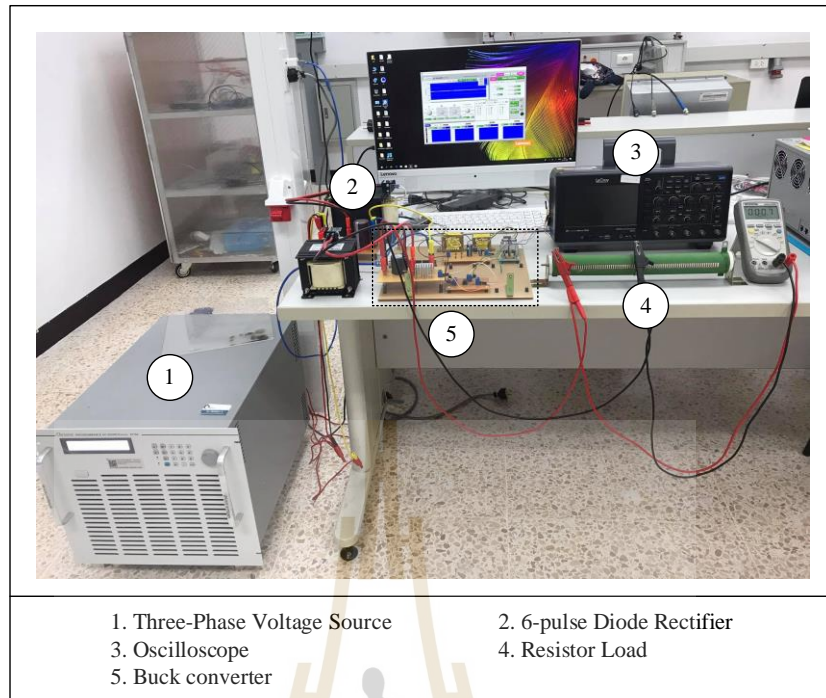
รูปที่ 6.8 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน

จากรูปที่ 6.8 พบว่าระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ก่อน 0.5 วินาที มีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าโดยประมาณเท่ากับ 35 V และหลัง 0.5 วินาที มีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าโดยประมาณเท่ากับ 58 V ผลการทดสอบดังกล่าวมีค่าที่ใกล้เคียงกับการคำนวณทางทฤษฎี ดังนั้นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานที่ได้สร้างขึ้นสามารถนำไปสร้างชุดทดสอบสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ โดยการปลด R เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับวงจรแปลงผันแบบบัค ซึ่งจะแสดงผลการทดสอบเป็นลำดับถัดไป

6.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัค

6.3.1 ภาพรวมของระบบ

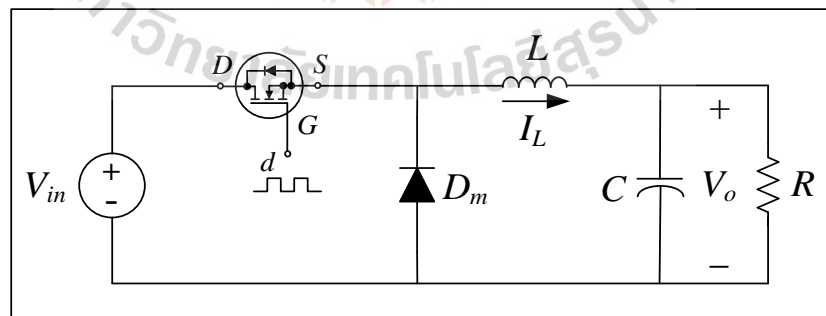
ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.9 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับค่าได้ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ MEGA2560



รูปที่ 6.9 ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก

6.3.2 วงจรแปลงผันแบบบัก

วงจรแปลงผันแบบบักที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานแสดงได้ดังรูปที่ 6.10 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ชุดสร้างสัญญาณพัลส์หรือค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR รุ่น Arduino Mega2560 ชุดวงจรแปลงผันแบบบัก และโหลดตัวต้านทาน



รูปที่ 6.10 วงจรแปลงผันแบบบัก

วงจรแปลงผันแบบบักหรือวงจรลดระดับแรงดันในรูปที่ 6.10 สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรแปลงผันแบบบัก (V_o) (Mohan, N., Underland, T. M., and Robbins, W. P., 2003) (Rashid, M. H., 2011) ได้ดังสมการที่ (6-2) ดังนี้

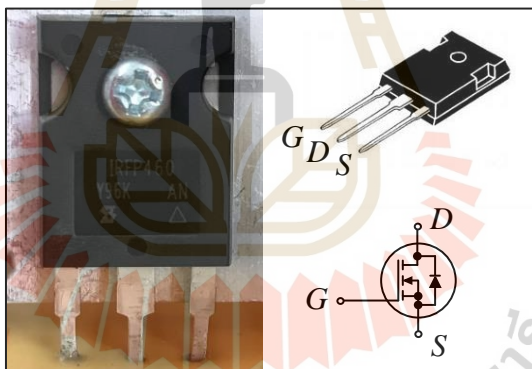
$$V_o = dV_{in} \quad (6-2)$$

โดยที่ V_{in} คือ แรงดันอินพุตที่จ่ายให้กับวงจรแปลงผันแบบบัก

d คือ วัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัก

- การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบัก

การออกแบบวงจรแปลงผันแบบบักในส่วนแรกจะทำการออกแบบสวิทช์ ซึ่งจะคำนึงถึงพิกัดแรงดันและพิกัดกระแสของโหลดเป็นสำคัญ นอกจากนี้ในการออกแบบยังต้องคำนึงถึงตัวประกอบนิรภัย (safety factor) ประมาณ 25% ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้สวิทช์มอสเฟสเบอร์ IRFP460 ที่มีพิกัดแรงดัน 500 V พิกัดกระแส 20 A แสดงได้ดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 อุปกรณ์สวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก

ลำดับถัดมาจะเป็นการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ซึ่งต้องคำนึงถึงค่าแรงดันพลิว (ΔV_C : ripple voltage) ของแรงดันที่ตกคร่อมโหลด และค่ากระแสพลิว (ΔI_L : ripple current) ของกระแสที่ไหลผ่านโหลด โดยสมการที่ใช้ในการออกแบบค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้า (Mohan, N., Underland, T. M., and Robbins, W. P., 2003) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6-3) และ (6-4) ตามลำดับ

$$\Delta I_L = \frac{V_o(V_{in} - V_o)}{f L V_{in}} \quad (6-3)$$

$$\Delta V_C = \frac{\Delta I_L}{8fC} \quad (6-4)$$

โดยที่ V_{in} คือ แรงดันอินพุต, V_o คือ แรงดันเอาต์พุต, f คือ ความถี่ในการสวิตช์
 L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ, ΔI_L คือ ค่ากระแสพลิว, ΔV_C คือ ค่าแรงดันพลิว
 C คือ ค่าความจุไฟฟ้า

สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบักในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้
 คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแส โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า
 กระแสสลับเท่ากับ $40 V_{rms}$ จะสามารถคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสจากสมการที่
 (6-1) ได้เท่ากับ $93.56 V$ ซึ่งค่าดังกล่าวคือค่า V_{in} ของวงจรแปลงผันแบบบัก เพื่อให้ง่ายต่อการ
 คำนวณจะประมาณค่าให้เท่ากับ $100 V$ และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าตั้งแต่ $5 V$ ถึง $80 V$
 โดยมีเงื่อนไขสำหรับการออกแบบดังนี้

$$\begin{aligned} V_{in} &= 100 V, & V_o &= 5 - 80 V \\ \Delta V_C &< 2.8 \text{ mV}, & \Delta I_L &< 0.2 A \\ f &= 10 \text{ kHz} \end{aligned}$$

จากเงื่อนไขดังกล่าวการออกแบบจะพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตพิกัดที่ได้กำหนดไว้ เพื่อให้
 สามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าที่รองรับค่าพิกัดได้ โดยการออกแบบ
 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$L = \frac{80(100-80)}{10 \times 10^3 \times 100 \times 0.2} = 8 \text{ mH}$$

$$C = \frac{0.2}{8 \times 10 \times 10^3 \times 2.8 \times 10^{-3}} = 892.86 \text{ } \mu\text{F}$$

จากการออกแบบข้างต้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำ
 ของตัวเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรแปลงผันกำลังแบบบัก
 มีค่าดังต่อไปนี้

- $L = 15 \text{ mH}$ พิกัดกระแสไฟฟ้า 10 A พิกัดแรงดันไฟฟ้า 400 V แสดงดังรูปที่ 6.12



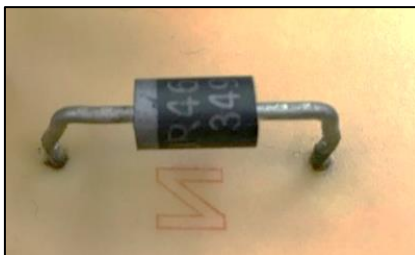
รูปที่ 6.12 ตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัค

- $C = 1000 \text{ }\mu\text{F}$ พิกัดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 200 V แสดงดังรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันแบบบัค

ในส่วนต่อไปจะพิจารณาไดโอด D_m ของวงจรแปลงผันแบบบัคในรูปที่ 6.10 ค่าพิกัดแรงดันเอาต์พุตต้องมีค่าไม่เกินแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันแบบบัค คือ 100 V และเมื่อคำนึงถึงตัวประกอบนิรภัย 25 เปอร์เซ็นต์ ค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าของไดโอด D_m จะมีค่ามากกว่า 125 V ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ไดโอด D_m ที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 400 V ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.14

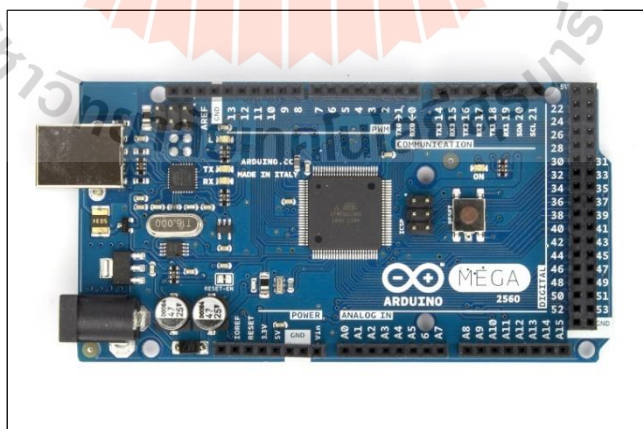


รูปที่ 6.14 ไดโอดของวงจรแปลงผันแบบบัค

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการออกแบบอุปกรณ์สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัค ได้แก่ สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัค ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และไดโอด โดยในการควบคุม สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคจะอาศัยสัญญาณพัลส์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

6.3.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA2560 ของบริษัท ATMEL ใช้ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA2560 ที่เป็นชิพตระกูล AVR ของบริษัท ATMEL รองรับการเขียนภาษา C++ ของ Arduino ซึ่งง่ายต่อการเขียนโปรแกรมสำหรับใช้งาน นอกจากนี้ยังมีพอร์ตอินพุตพอร์ตเอาต์พุต, พอร์ตดิจิทัล, พอร์ตแอนะล็อก, พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM, พอร์ตการสื่อสารอนุกรม (SPI) ผ่านโมดูล และขนาดหน่วยความจำที่มากเพียงพอต่อการใช้งาน โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA2560 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น MEGA2560

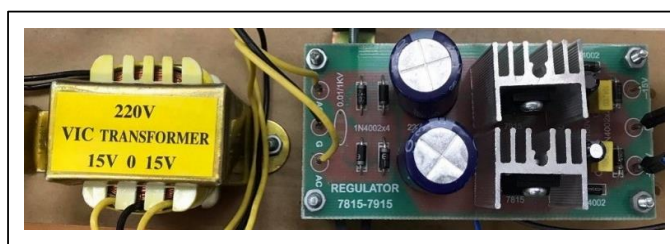
คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับบอร์ด MEGA2560

1. เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ประสิทธิภาพสูง แต่ใช้พลังงานต่ำในตระกูล AVR
2. สถาปัตยกรรมแบบ RISC
 - มีชุดคำสั่ง 135 คำสั่ง และส่วนใหญ่คำสั่งเหล่านี้จะใช้เพียง 1 สัญญาณนาฬิกาในการประมวลผลคำสั่งเท่านั้น
 - มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัว
 - ทำงานสูงสุดที่ 16 ล้านคำสั่งต่อวินาที (MIPS) เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz
3. หน่วยความจำ
 - หน่วยความจำแฟลชสำหรับโหลดโปรแกรมขนาด 128 กิโลไบต์ เขียน/ลบได้ 10,000 ครั้ง
 - หน่วยความจำ EEROM ขนาด 4 กิโลไบต์ เขียน/ลบได้ 10,000 ครั้ง
 - หน่วยความจำแรมชนิดแอสแรม (SRAM) ขนาด 8 กิโลไบต์
 - เก็บข้อมูลได้กว่า 20 ปีที่อุณหภูมิ 85°C และกว่า 100 ปีที่อุณหภูมิ 25°C
4. ระบบโปรแกรมตัวเองที่ถูกฝังในตัวชิพ
5. สามารถทำการอ่านขณะเขียนข้อมูลจริงและสามารถถือการทำงานได้เพื่อความปลอดภัยของซอฟต์แวร์
6. มีการเชื่อมประสานกับ JTAG (IEEE std.1149.1 compliant)
7. คุณสมบัติเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก
 - มีตัวตั้งเวลาและตัวนับขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงานจากกันได้ 3 โหมด คือ Prescaler และ Capture
 - มีตัวตั้งเวลาและตัวนับขนาด 16 บิต จำนวน 3 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงานจากกันได้ 2 โหมด คือ Prescaler, Compare และ Capture
 - มีตัวนับเวลาจริง (Real Time Count) ที่แยกวงจรถูกกำหนดความถี่ได้
 - มี PWM จำนวน 12 ช่องสัญญาณ ที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 16 บิต
 - มีตัวปรับผลการเปรียบเทียบของเอาต์พุต
 - มีตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ
 - มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับ/ส่งได้ จำนวน 4 พอร์ต
 - เชื่อมประสานอนุกรมแบบ SPI ได้ทั้งการเป็นมาสเตอร์และสเลฟ (Master/Slave)
 - มีการเชื่อมต่อประสานแบบอนุกรมด้วยสายสัญญาณ 2 เส้น ส่งข้อมูลแบบเรียงไบนารี
 - มีตัวตั้งเวลาแบบวอชด็อกที่สามารถกำหนดภาษาการทำงานได้โดยสามารถแยกสัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ
 - มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณแอนะล็อกอยู่ในตัว

- มีการรับรองการขัดจังหวะและการเวกอัพ (Wake-up) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับขาชีพ
8. คุณสมบัติพิเศษ
- มีระบบเริ่มเมื่อมีการรีเซ็ตและมีระบบตรวจจับการเกิดบราวน์เอาท์ (Brown-out) ที่สามารถกำหนดการทำงานได้
 - มีตัวตรวจหาความเที่ยงตรงของออสซิลเลเตอร์อยู่ในตัว (Internal Calibrated Oscillator)
 - มีแหล่งการขัดจังหวะทั้งภายนอกและภายใน (External and Internal Interrupt Source)
 - มีโหมดการทำงานสลีป 6 แบบ คือ Idle, ADC Noise Redution, Power-save, Power-down, Standby และ Extended Standby
9. อินพุต/เอาต์พุต และตัวถัง
- มีขาของอินพุต/เอาต์พุตที่สามารถกำหนดการทำงานได้ 86 ขา
 - ตัวถังแบบ TQFP ชนิด 100 ขา
10. ช่วงอุณหภูมิที่ชิพทำงานได้ -40°C ถึง 85°C
11. การใช้พลังงาน
- โหมดการทำงาน : ที่ 1 MHz ต้องการแรงดัน 1.8 V กระแส 0.5 mA
 - ขาโหมดเพาเวอร์ดาวน์ (Power-down) ต้องการกระแส 0.1 μA ที่แรงดัน 1.8 V

6.3.4 วงจรรักษาระดับแรงดัน

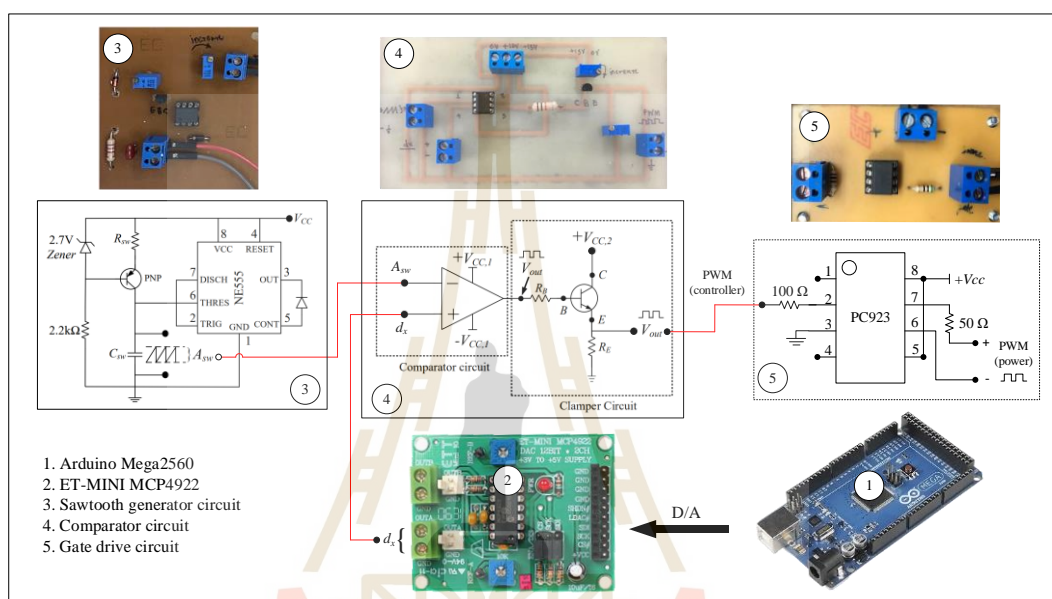
วงจรรักษาระดับแรงดันที่ใช้ในงานวิทยุวิทยานิพนธ์นี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.16 วงจรดังกล่าวจะใช้หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส จาก 220 V ไปเป็น 15 V หรือ 18 V จากนั้นจะป้อนแรงดันเข้าสู่วงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์เพื่อให้ได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าคงที่เท่ากับ +15 V, 0 V และ -15 V ผ่านไอซีเบอร์ 7815 และไอซีเบอร์ 7915 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จะถูกใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในที่นี้คือ วงจรขยายสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนสวิทช์ของวงจรแปลงผันแบบบัท วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า และวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ จะนำเสนอเป็นลำดับต่อไป



รูปที่ 6.16 วงจรรักษาระดับแรงดัน

6.3.5 ชุดวงจรขยายสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก

ชุดวงจรขยายสัญญาณพัลส์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น Mega 2560 บอร์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก รุ่น ET-MINI MCP4922 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ และวงจรขับเกท สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 ชุดวงจรขยายสัญญาณพัลส์เพื่อจุดชนวนสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก

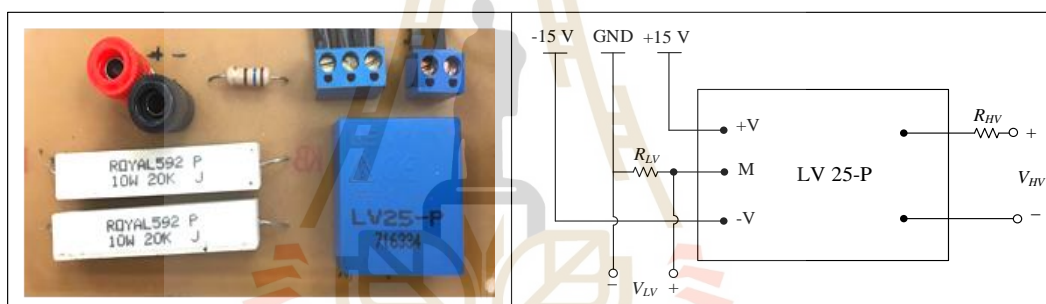
พิจารณาจากรูปที่ 6.17 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมแบบดิจิทัล จากนั้นสัญญาณดังกล่าวจะถูกแปลงเป็นสัญญาณควบคุมแบบแอนะล็อก (d_x) ผ่านบอร์ด ET-MINI MCP4922 เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อย (A_{sw}) ทำให้ได้เป็นสัญญาณพัลส์จากคอนโทรลเลอร์ (PWM controller) อย่างไรก็ตามสัญญาณพัลส์จากคอนโทรลเลอร์เป็นสัญญาณจากวงจรแรงต่ำจึงมีขนาดไม่เพียงพอต่อการจุดชนวนสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก ดังนั้นสัญญาณพัลส์ดังกล่าวจึงถูกส่งไปยังวงจรขับเกท เพื่อขยายขนาดแรงดันและสร้างเป็นสัญญาณพัลส์สำหรับจุดชนวนสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัก (PWM power) นอกจากนี้วงจรขับเกทยังสามารถแยกกราวนินส่วนของวงจรไฟฟ้าแรงต่ำซึ่งในที่นี้คือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ออกจากวงจรไฟฟ้าแรงสูงในที่นี้คือวงจรแปลงผันแบบบัก เพื่อไม่ให้กราวนรหว่างวงจรไฟฟ้าแรงต่ำเชื่อมกับวงจรไฟฟ้าแรงสูงเนื่องจากหากเกิดการใช้กราวนร่วมกันจะก่อให้เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ในวงจรไฟฟ้าแรงต่ำได้สำหรับรายละเอียดคุณสมบัติของบอร์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก รวมถึงรายละเอียด

ในการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ และวงจรชั้เกท สามารถดูได้จาก (รัฐพล โพธิ์สังข์, 2563)

6.3.6 วงจรตรวจจับ

- วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

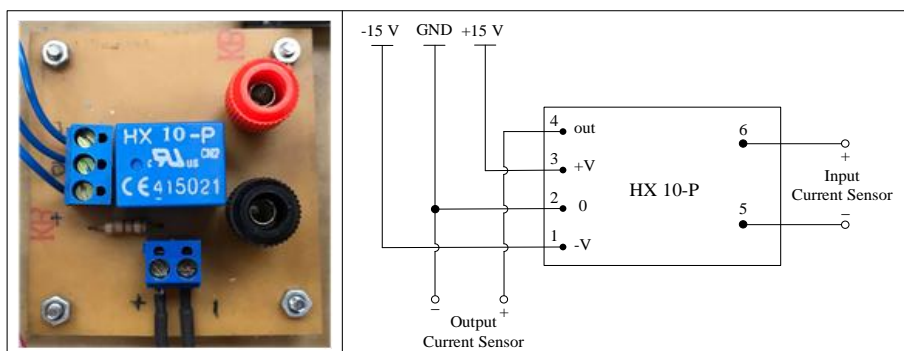
วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคใช้เซนเซอร์แรงดันเบอร์ LV 25-P พิกัดแรงดันไฟฟ้าด้านแรงสูง (V_{HV}) เท่ากับ 500 V พิกัดกระแสไฟฟ้าแรงสูง (I_{HV}) เท่ากับ 10 mA ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ออกแบบ V_{HV} ไว้ที่ 400 V ดังนั้นจะได้ค่าความต้านทานแรงสูง (R_{HV}) เท่ากับ 10 k Ω ในส่วนของเอาต์พุตซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าด้านแรงต่ำ (V_{LV}) จะขึ้นอยู่กับการปรับจูนค่าความต้านทานด้านแรงต่ำ (R_{LV}) เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยค่าความต้านทานที่เลือกใช้คือ 160 Ω วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

- วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคใช้เซนเซอร์เบอร์ HX 10-P พิกัดกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10 A ซึ่งจะทำหน้าที่วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ จากนั้นเอาต์พุตของวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งไปยังตัวควบคุมพีไอที่ถูกสร้างขึ้นด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

6.3.7 การเขียนโปรแกรมตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

การสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยการนำตัวควบคุมแบบสัดส่วน (proportional controller) และตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (integral controller) มารวมกัน ซึ่งมีข้อดีคือสามารถปรับปรุงค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวให้ลดน้อยลงจนหมดไป โดยสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอสามารถเขียนในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (6-5)

$$V_{out} = K_p V_{error} + K_i \int V_{error} dt \quad (6-5)$$

โดยที่ V_{out} คือ สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ

K_p คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วนในตัวควบคุมพีไอ

K_i คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบปริพันธ์ในตัวควบคุมพีไอ

V_{error} คือ สัญญาณความคลาดเคลื่อนที่เป็นอินพุตของตัวควบคุมพีไอ

จากสมการที่ (6-5) เป็นสมการที่ต่อเนื่องทางเวลาซึ่งไม่สามารถเขียนในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ เนื่องจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มีลักษณะการทำงานเป็นแบบสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำสมการดังกล่าวไปสร้างเป็นสมการใหม่ให้อยู่ในรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาเพื่อให้สามารถเขียนโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับการหาสมการที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาแสดงได้ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 พิจารณาสมการของตัวควบคุมพีไอในช่วงเวลาต่อเนื่อง (continuous time) จากสมการที่ (6-5)

ขั้นที่ 2 หาอนุพันธ์ทั้งสองข้างของสมการที่ (6-5) แสดงได้ดังสมการที่ (6-6)

$$\frac{d}{dt}V_{out} = K_p \frac{d}{dt}V_{error} + K_i V_{error} \quad (6-6)$$

ขั้นที่ 3 กำหนดให้ $dt = T_i$ เมื่อ T_i คือ ค่าสุ่มตัวอย่างเวลา (sampling time) อนุพันธ์ของแรงดันและอนุพันธ์ของแรงดันผิดพลาดที่ประมาณค่าให้อยู่ในรูปแบบผลต่าง แสดงได้ดังสมการที่ (6-7)

$$\frac{\Delta V_{out}}{T_i} = K_p \frac{\Delta V_{error}}{T_i} + K_i V_{error} \quad (6-7)$$

ขั้นที่ 4 กำหนดให้ ผลต่างของแรงดันเอาต์พุต (ΔV_{out}) มีค่าเท่ากับ $V_{out(i)} - V_{out(i-1)}$ และผลต่างของแรงดันผิดพลาด (ΔV_{error}) มีค่าเท่ากับ $V_{error(i)} - V_{error(i-1)}$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6-8) ดังนี้

$$\frac{V_{out(i)} - V_{out(i-1)}}{T_i} = K_p \frac{V_{error(i)} - V_{error(i-1)}}{T_i} + K_i V_{error(i)} \quad (6-8)$$

โดยที่ $V_{out(i)}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตในรอบปัจจุบัน

$V_{out(i-1)}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตในรอบก่อนหน้า (อดีต)

$V_{error(i)}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตผิดพลาดในรอบปัจจุบัน

$V_{error(i-1)}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตผิดพลาดในรอบก่อนหน้า (อดีต)

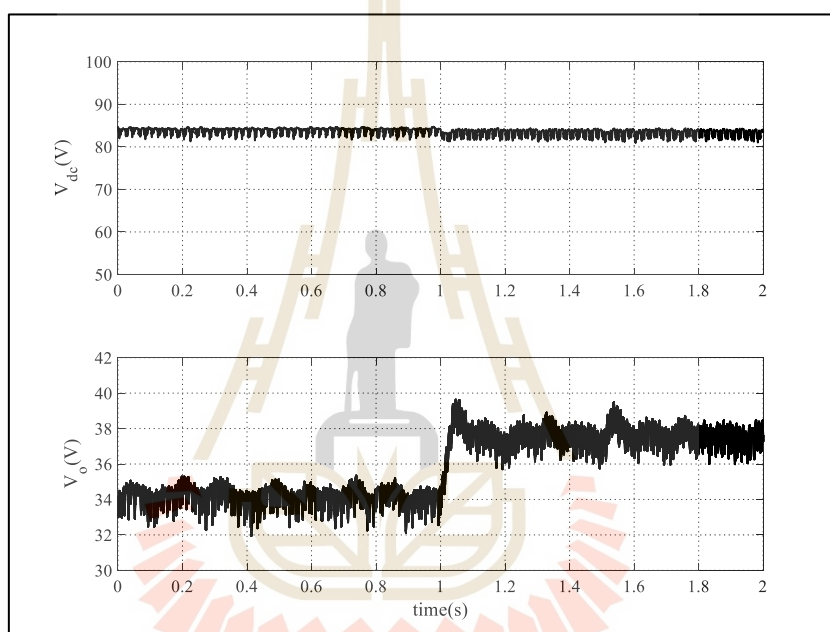
ขั้นที่ 5 จากสมการที่ (6-8) เมื่อคูณทั้งสองข้างของสมการดังกล่าวด้วย T_i จะทำให้ได้สมการตัวควบคุมพีไอที่เวลาไม่ต่อเนื่อง แสดงดังสมการที่ (6-9)

$$V_{out(i)} = V_{out(i-1)} + K_p V_{error(i)} + K_i T_i V_{error(i)} - K_p V_{error(i-1)} \quad (6-9)$$

จากสมการที่ (6-9) เป็นสมการที่สามารถนำไปเขียนโปรแกรมด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ซึ่งรายละเอียดการเขียนโปรแกรมสามารถดูได้จากภาคผนวก ง.

6.3.8 ผลการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัค

การทดสอบวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคในหัวข้อนี้จะทดสอบโดยใช้วงจรแปลงผันแบบบัคในกรณีที่มีการควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมพีไอ ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวถูกเขียนโปรแกรมขึ้นภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมที่ใช้มีค่า $K_p = 0.0257$ และ $K_i = 3.9478$ สำหรับผลการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.20

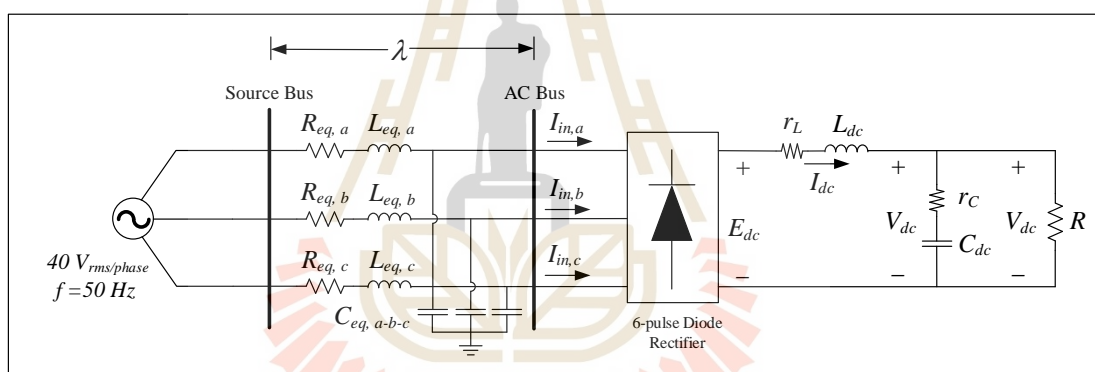


รูปที่ 6.20 ผลการทดสอบการตอบสนองของ V_{dc} และ V_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_o^* จาก 34 V ไปเป็น 38 V

พิจารณาจากรูปที่ 6.20 ผลการตอบสนองของ V_o เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_o^* จาก 34 V ไปเป็น 38 V ที่เวลา 1 วินาที จะสามารถสังเกตได้ว่าวงจรแปลงผันแบบบัคที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้คงที่ได้ถูกต้องตามที่กำหนด ดังนั้นชุดทดสอบดังกล่าวสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพและบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ สำหรับการสร้างวงจรการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลประกอบด้วยวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้าของวงจรกรอง ซึ่งวงจรดังกล่าวสามารถออกแบบได้โดยอาศัยแนวทางการออกแบบที่ได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 6.3.6 รายละเอียดเกี่ยวกับการทดสอบการขาดเสถียรภาพพร้อมทั้งการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะได้อธิบายไว้ในบทถัดไป

6.4 การระบุเอกลักษณ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว

ชุดทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมในหัวข้อที่ผ่านมาจะถูกนำไปประยุกต์สำหรับใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ โดยค่าพารามิเตอร์จริงของระบบมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพกับระบบจริงเป็นอย่างมาก เนื่องจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ไม่ถูกต้องจะส่งผลให้การวิเคราะห์จุดขาดเสถียรภาพเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบคือ ค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์และค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรอง เพื่อให้การค้นหาค่าดังกล่าวมีความซับซ้อนน้อยลงจึงกำหนดให้พิจารณาเฉพาะวงจรทางฝั่งแหล่งจ่ายของระบบได้ โดยจะกำหนดให้โหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เป็นโหลดตัวต้านทานแทนโหลดวงจรแปลงผันแบบบัค แสดงได้ดังรูปที่ 6.21

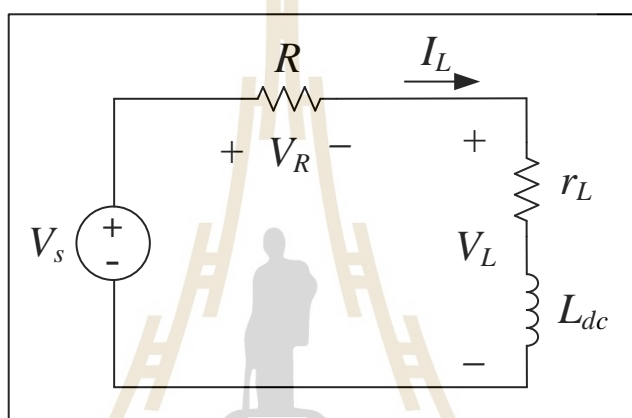


รูปที่ 6.21 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

จากรูปที่ 6.21 การค้นหาค่าพารามิเตอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกคือ การค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัด ซึ่งใช้สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่สามารถวัดค่าได้ง่าย ได้แก่ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง (L_{dc}) และค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง (r_L) และส่วนที่สองคือ การค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว วิธีการนี้ใช้สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ซับซ้อนในการวัดค่าด้วยเครื่องมือวัด ได้แก่ ค่าความต้านทานของสายส่ง (R_{eq}) ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง (L_{eq}) ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง (C_{dc}) และค่าความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (r_C) โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ในหัวข้อนี้จะถูกนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริง

6.4.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ด้วยเครื่องมือวัด

การทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัดและการทดสอบไฟฟ้ากระแสตรง (DC test) ใช้ในการค้นหาพารามิเตอร์ของค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำและค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองสัญญาณดีซี เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต่อการทดสอบและให้ผลที่ถูกต้องสำหรับวงจรทดสอบค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_s) ตัวต้านทาน (R) ตัวเหนี่ยวนำ (L_{dc}) และความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ (r_L) แสดงได้ดังรูปที่ 6.22



รูปที่ 6.22 วงจรทดสอบค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ

พิจารณารูปที่ 6.22 สามารถหาค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำโดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นทีละ 10 V เริ่มจาก 20 V ถึง 100 V เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำโดยอาศัยกฎของโอห์ม เนื่องจากในสภาวะคงตัวของวงจรไฟฟ้ากระแสตรง ตัวเหนี่ยวนำจะประพฤติตัวเป็นการลัดวงจร (short circuit) ค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะเกิดจากค่าความต้านทานภายในของตัวเหนี่ยวนำเท่านั้น ผลการคำนวณค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.1 โดยจะได้ค่าความต้านทานภายในของตัวเหนี่ยวนำประมาณ 0.2756Ω

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ

V_s (V)	I_L (A)	V_L (V)	r_L (Ω)
20	1.02	0.296	0.290
30	1.52	0.468	0.308
40	2.17	0.563	0.259
50	2.55	0.713	0.280
60	3.06	0.835	0.273
70	3.51	0.982	0.280
80	4.08	1.027	0.252
90	4.61	1.178	0.256
100	5.04	1.427	0.283
เฉลี่ย			0.2756

ลำดับต่อไปจะเป็นการวัดค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองด้วยเครื่องมือวัด LCR Meter รุ่น 897 จากบริษัท BK PRECISION ในห้องปฏิบัติการ แสดงดังรูปที่ 6.23 โดยจะทำการวัดค่าดังกล่าวทั้งหมด 5 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง แสดงดังตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.23 เครื่องมือวัด LCR Meter รุ่น 897 จากบริษัท BK PRECISION

ตารางที่ 6.2 ผลการวัดค่าความเหนี่ยวนำ

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
38.95 mH	39.07 mH	38.96 mH	39.05 mH	38.98 mH	39.002 mH

จากการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำและค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองด้วยเครื่องมือวัดแสดงให้เห็นว่า ค่าที่ได้จากการวัดไม่ตรงกับค่าพารามิเตอร์ที่อ่านได้จากป้ายของอุปกรณ์ หากนำค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพอาจทำให้ผลการวิเคราะห์เกิดความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบจึงเป็นค่าที่มีความถูกต้องและเหมาะสมต่อการนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริง โดยเนื้อหาเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริงจะได้นำเสนอไว้ในบทที่ 7

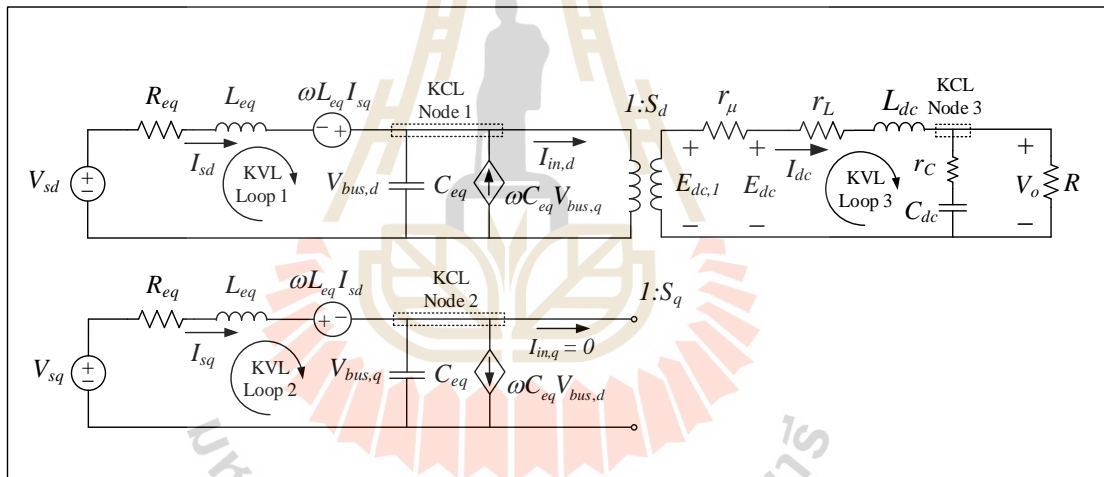
สำหรับค่าพารามิเตอร์ส่วนที่เหลือในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานซึ่งได้แก่ ค่าความต้านทานภายในสายส่ง ค่าความเหนี่ยวนำภายในสายส่ง ค่าความต้านทานในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง และค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดในการระบุค่าได้ เนื่องจากการวัดค่าจริงด้วยเครื่องมือวัดมีความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจะใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวเพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม รายละเอียดเกี่ยวกับการค้นหาดังกล่าวจะได้แสดงในหัวข้อถัดไป

6.4.2 การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

การหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ในหัวข้อนี้จะดำเนินการหาค่าพารามิเตอร์ของความต้านทานของสายส่ง (R_{eq}) ค่าความเหนี่ยวนำของสายส่ง (L_{eq}) ค่าความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (r_C) และค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง (C_{dc}) ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้สำหรับค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถระบุค่าได้ด้วยเครื่องมือวัด โดยเนื้อหาในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วย การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานด้วยวิธีตีความการทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานด้วยชุดทดสอบจริง และการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

- การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานด้วยวิธีดีคิวิ

การพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรในรูปที่ 6.21 จะพิจารณาเงื่อนไขการพิสูจน์เช่นเดียวกับเงื่อนไขที่อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 สำหรับวงจรในรูปที่ 6.21 ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล โดยที่ R_{eq} , L_{eq} และ C_{eq} แทนค่าความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้าตามลำดับ ในขณะที่ r_L , L_{dc} , r_C และ C_{dc} แทนค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ และค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรองตามลำดับ E_{dc} เป็นแรงดันเอาต์พุตดีซีจากวงจรเรียงกระแส และ V_{dc} เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีที่คร่อมตัวเก็บประจุ C_{dc} สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีดีคิวิสามารถทำให้เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายได้โดยกำหนดให้ $\theta = \phi - \phi_1$ ดังนั้นจะได้วงจรสมมูลอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 6.24



รูปที่ 6.24 วงจรสมมูลอย่างง่ายบนแกนดีคิวิของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 6.24 สามารถวิเคราะห์ห้วงจรด้วยกฎแรงดันไฟฟ้าและกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ ทำให้ได้แบบจำลองในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์แสดงดังสมการที่ (6-10) ดังนี้

$$\begin{cases}
 \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \cos(\lambda)}{L_{eq}} \\
 \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_m \sin(\lambda)}{L_{eq}} \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\
 \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{(R - r_C)}{RL_{dc}} V_o \\
 \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{V_{dc}}{RC_{dc}}
 \end{cases} \quad (6-10)$$

แบบจำลองในสมการที่ (6-10) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแบบจำลองตัวแปรสถานะได้ดังสมการที่ (6-11)

$$\begin{cases}
 \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u} \\
 \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u})\mathbf{u}
 \end{cases} \quad (6-11)$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ คือ $\mathbf{x} = [I_{sd} \quad I_{sq} \quad V_{bus,d} \quad V_{bus,q} \quad I_{dc} \quad V_{dc}]^T$

ตัวแปรอินพุต คือ $\mathbf{u} = [V_m]$, ตัวแปรเอาต์พุต คือ $\mathbf{y} = [V_{dc}]$

รายละเอียดของ $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ ในสมการที่ (6-11) แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_{\mu} + r_L + r_C)}{L_{dc}} & -\frac{(R - r_C)}{RL_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & -\frac{1}{RC_{dc}} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(\lambda) \\ \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(\lambda) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{6 \times 1}$$

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

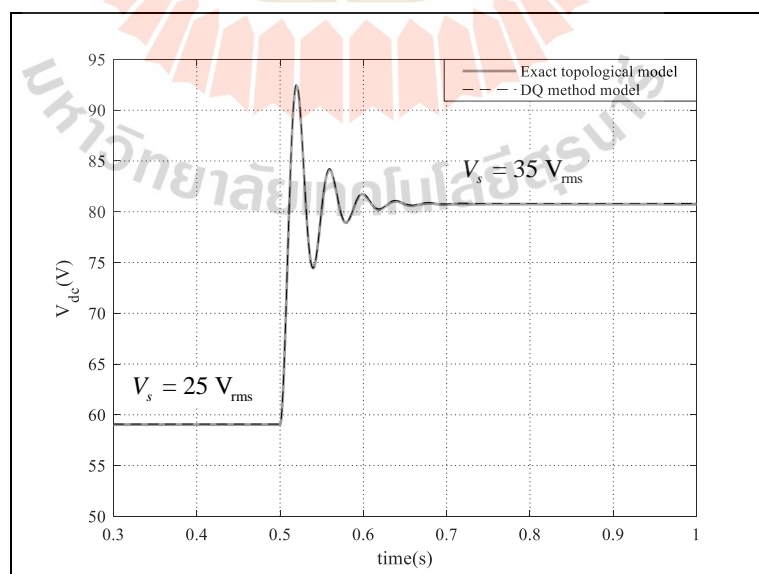
$$\mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = [0]_{1 \times 1}$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานที่ได้พิสูจน์ขึ้นดังแสดงในสมการที่ (6-11) สามารถดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรม MATLAB ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ของระบบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 6.21

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	25–35 $V_{\text{rms/phase}}$	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
R_{eq}	0.1 Ω	ความต้านทานของวงจรสมมูลสายส่ง
L_{eq}	24 μH	ความเหนี่ยวนำของวงจรสมมูลสายส่ง
C_{eq}	2 nF	ความจุไฟฟ้าของวงจรสมมูลสายส่ง
r_L	0.2756 Ω	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
L_{dc}	39.002 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
r_C	0.01 Ω	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
C_{dc}	1000 μF	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
R	20 Ω	ความต้านทานของโหลดตัวต้านทาน

จากค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 6.3 สามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก 25 V_{rms} ไปเป็น 35 V_{rms} ที่เวลา 0.5 วินาที ซึ่งจะได้ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 6.25

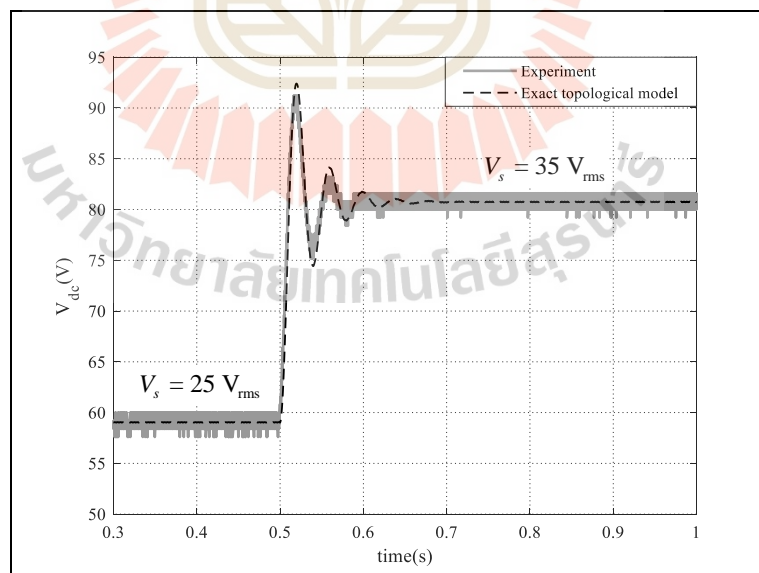


รูปที่ 6.25 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

จากรูปที่ 6.25 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (6-11) (DQ method model) และจากการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ (Exact topological model) ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลตอบสนองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีดีคิมมีลักษณะของรูปสัญญาณสอดคล้องกับผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะคงตัว ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นในบทนี้จึงมีความถูกต้องและสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของชุดทดสอบจริงด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ได้

- การทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานด้วยชุดทดสอบจริง

การทดสอบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานจะดำเนินการในลักษณะเช่นเดียวกับการต่อวงจรชุดทดสอบในหัวข้อที่ 6.2 ซึ่งในที่นี้จะนำผลการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากชุดทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจาก $25 V_{rms}$ ไปเป็น $35 V_{rms}$ ที่เวลา 0.5 วินาที ซึ่งผลการตอบสนองดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.26

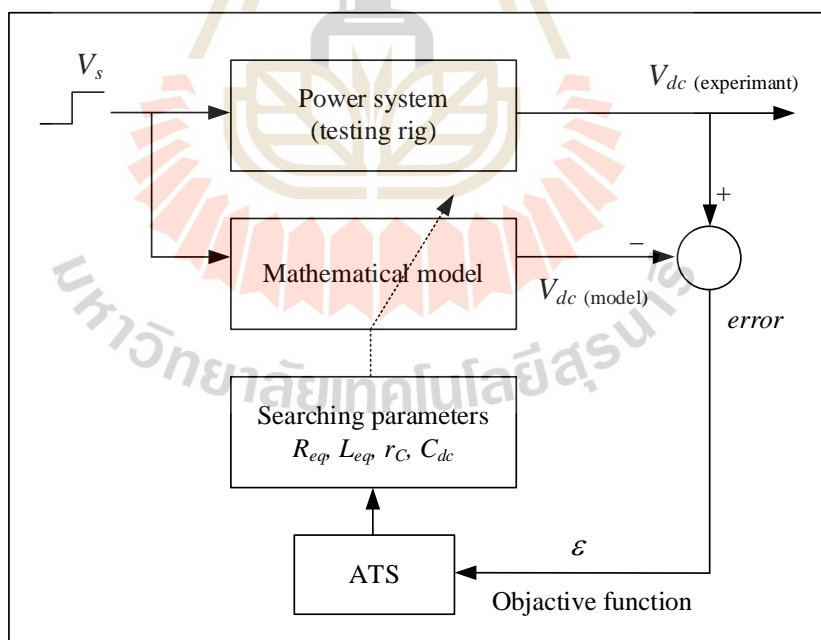


รูปที่ 6.26 ผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชุดทดสอบ

จากรูปที่ 6.26 พบว่าผลการตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนคอมพิวเตอร์มีลักษณะของรูปสัญญาณที่ไม่สอดคล้องกับผลการตอบสนองที่ได้จากชุดทดสอบในสถานะชั่วคราว เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองและใช้สำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ยังมีค่าไม่ถูกต้อง ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถส่งผลให้การวิเคราะห์เสถียรภาพมีความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาพารามิเตอร์ของชุดทดสอบ โดยการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นไปประยุกต์ใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของชุดทดสอบด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ รายละเอียดดังกล่าวจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป

- การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

การระบุเอกลักษณ์ในหัวข้อนี้จะประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับหลักการและขั้นตอนการค้นหาด้วยวิธีการดังกล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.5.2 ของบทที่ 5 สำหรับโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.27



รูปที่ 6.27 โครงสร้างบล็อกไดอะแกรมการค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

จากรูปที่ 6.27 จะเห็นได้ว่าการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของชุดทดสอบด้วยวิธีการแบบตาบู่เชิงปรับตัวซึ่งประกอบด้วย R_{eq} , L_{eq} , r_C และ C_{dc} ดำเนินการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุตจาก $25 V_{rms}$ ไปเป็น $35 V_{rms}$ เพื่อจำลองผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการตอบสนองดังกล่าวกับผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีจากชุดทดสอบ จะทำให้ได้ค่าความผิดพลาดซึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว จากนั้นอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวจะทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์ R_{eq} , L_{eq} , r_C และ C_{dc} จนกระทั่งผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีจากชุดทดสอบ หรือจนกว่าค่าความผิดพลาด (error) จะมีค่าน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ ก็จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบ สำหรับพารามิเตอร์ของการค้นหาค่าตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวและขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.4 และตารางที่ 6.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.4 พารามิเตอร์ของการค้นหาค่าตอบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
<i>Initial number neighbor</i>	40	จำนวนคำตอบเริ่มต้น
<i>Number neighbor</i>	20	จำนวนคำตอบรอบข้าง
<i>Radius</i>	30	ค่ารัศมีการค้นหาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของขอบเขต
<i>DF</i>	1.5	ค่าอัตราปรับลดรัศมี

ตารางที่ 6.5 ขอบเขตการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

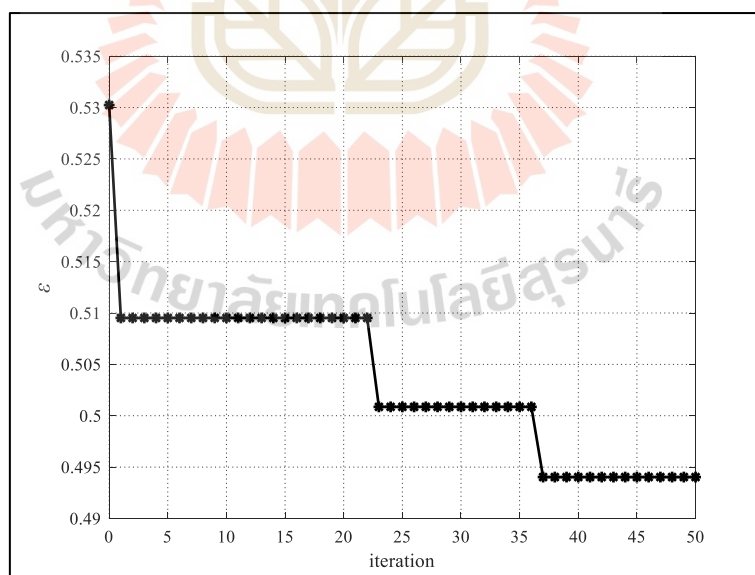
พารามิเตอร์	ขอบเขตการค้นหา	
	ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
R_{eq}	0.01 Ω	0.15 Ω
L_{eq}	100 μH	400 μH
r_C	0.01 Ω	1 Ω
C_{dc}	800 μF	1500 μF

- ผลการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการแบบตาบู่เชิงปรับตัว

การค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวจะดำเนินการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง ผลการทดสอบดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.6 โดยค่าพารามิเตอร์จากการค้นหาที่ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดจะถือเป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีค่าใกล้เคียงหรือตรงกับค่าพารามิเตอร์ของชุดทดสอบมากที่สุด ซึ่งผลการลู่เข้าของค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.28

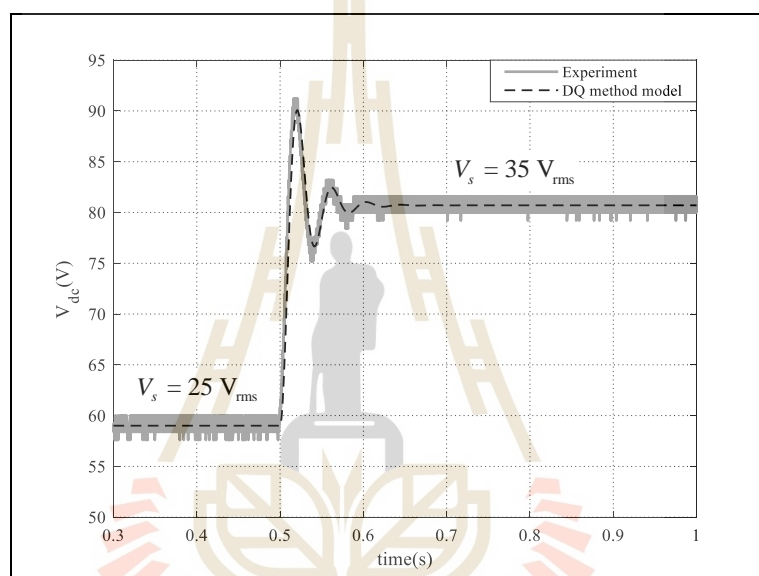
ตารางที่ 6.6 ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

ครั้งที่	R_{eq} (Ω)	L_{eq} (μH)	r_c (Ω)	C_{dc} (μF)	ε
1	0.0956	142.45	0.8327	1051.55	0.4940
2	0.0769	225.46	0.8627	1017.78	0.5036
3	0.0718	256.27	0.8825	1043.49	0.4954
4	0.0805	187.71	0.8801	1048.59	0.4982
5	0.0998	135.86	0.8449	1030.73	0.4973



รูปที่ 6.28 ผลการลู่เข้าของค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน

จากผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 6.6 พบว่าที่ค่าพารามิเตอร์ $R_{eq} = 0.0956 \Omega$, $L_{eq} = 142.45 \mu\text{H}$, $r_C = 0.8327 \Omega$ และ $C_{dc} = 1051.55 \mu\text{F}$ จะให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจึงเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีการแบบตามูเชิงปรับตัว อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้อง โดยอาศัยผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ค่าพารามิเตอร์จากการค้นหามาเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีจากชุดทดสอบ แสดงได้ดังรูปที่ 6.29



รูปที่ 6.29 ผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซี

จากรูปที่ 6.29 จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีที่ได้จากชุดทดสอบ มีลักษณะรูปสัญญาณที่สอดคล้องกันทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานจึงเป็นพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัดและการระบุเอกลักษณ์ด้วยการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวมีค่าดังนี้ $r_L = 0.2756 \Omega$, $L_{dc} = 39.002 \text{ mH}$, $R_{eq} = 0.0956 \Omega$, $L_{eq} = 142.45 \mu\text{H}$, $r_C = 0.8327 \Omega$ และ $C_{dc} = 1051.55 \mu\text{F}$

6.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 6 ได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตด้วยตัวควบคุมพีไอ ซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนของแหล่งจ่ายซึ่งในที่นี้คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทานที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.2 และส่วนที่สองเป็นส่วนของโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก ซึ่งโหลดดังกล่าวได้นำไปต่อแทนที่โหลดตัวต้านทานของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดยได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 6.3 การควบคุมสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น Mega2560 ซึ่งได้อธิบายความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ไว้แล้วข้างต้น นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวงจรจุดชนวนเกทของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัก ซึ่งประกอบด้วย บอร์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ และวงจรขับเกท สำหรับวงจรขับเกทผู้วิจัยเลือกใช้ไอซีเบอร์ PC923 เป็นตัวขยายสัญญาณที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งการให้สวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักสามารถทำงานได้ ไอซีดังกล่าวมีข้อดี คือ มีวงจรแยกกราวด์ภายในตัวทำหน้าที่ในการแยกกราวด์ของวงจรแรงสูงออกจากวงจรแรงต่ำ ในส่วนท้ายของหัวข้อที่ 6.3 เป็นการสร้างชุดทดสอบสำหรับใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยเมื่อทำการทดสอบการทำงานของชุดทดสอบดังกล่าวพบว่าให้ผลการตอบสนองที่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน สำหรับเนื้อหาในหัวข้อที่ 6.4 เป็นการระบุเอกลักษณ์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน ซึ่งได้นำเสนอวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ 2 วิธี วิธีแรกคือการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัด ใช้สำหรับการค้นหาค่า L_{dc} และ r_L เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถหาได้ง่ายด้วยเครื่องมือวัด และวิธีที่สองคือการค้นหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ใช้สำหรับค้นหาค่า R_{eq} , L_{eq} , r_C และ C_{dc} เนื่องจากการวัดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวด้วยเครื่องมือวัดนั้นทำได้ยากและซับซ้อน งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในการค้นหาพารามิเตอร์ดังกล่าว โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดตัวต้านทาน เพื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวโดยอาศัยการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีที่ได้จากชุดทดสอบ ผลการตรวจสอบความถูกต้องพบว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตดีซีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากชุดทดสอบมีลักษณะรูปสัญญาณที่สอดคล้องกันทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ในหัวข้อนี้จึงเป็นพารามิเตอร์ที่ถูกต้องและเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบที่จะได้นำเสนอในบทที่ 7 เป็นลำดับถัดไป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทที่ 6 นี้ได้ตีพิมพ์บทความทางวิชาการในวารสารระดับชาติ โดยจะแสดงบทความฉบับสมบูรณ์ไว้ในภาคผนวก จ. ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

จักรกริช ภัคดีโต, รัฐพล โพธิ์สังข์, อลิสสา ถนอมเมือง, กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์. การระบุเอกลักษณ์ระบบสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคค์ที่มีการควบคุมต่อขนานกันด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกรกฎาคม – กันยายน 2566.



บทที่ 7

ผลทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้วิธีการวางโพล

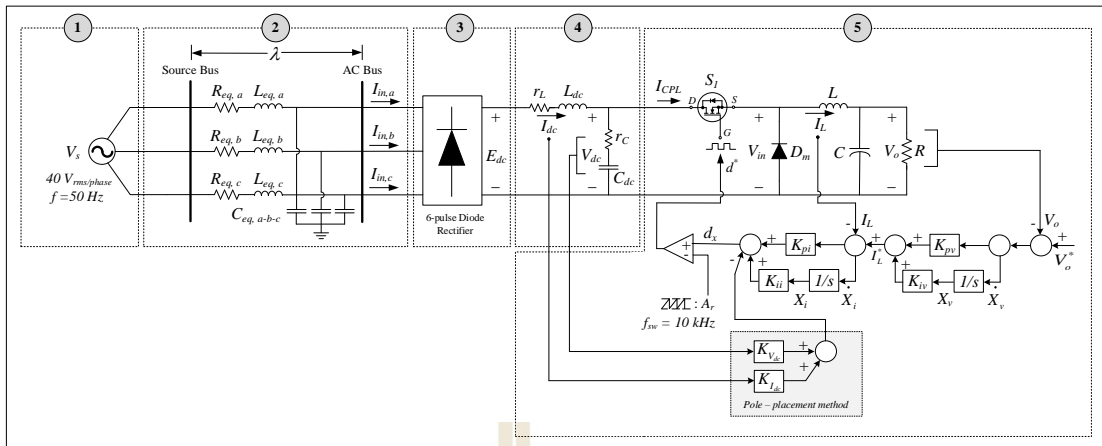
7.1 บทนำ

การดำเนินงานวิจัยในบทที่ผ่านมาเป็นการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม นอกจากนี้ยังมีการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ทางฝั่งแหล่งจ่ายของชุดทดสอบดังกล่าว พร้อมทั้งยืนยันความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากชุดทดสอบ จากผลการยืนยันความถูกต้องพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์มีความถูกต้องและเหมาะสมต่อการนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลของชุดทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก โดยจะดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ไว้แล้วในบทที่ 5 ในส่วนของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลจะดำเนินการเพิ่มลูบการวางโพลเข้าไปในตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัก การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพในบทนี้จะอาศัยผลตอบสนองที่ได้จากชุดทดสอบที่สร้างขึ้น โดยผลตอบสนองดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและกรณีที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ซึ่งผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้นำเสนอไว้

7.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพระบบจริง

7.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจริง

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.1 โดยมีการเพิ่มลูบการวางโพลที่ใช้สำหรับบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าอยู่ภายในตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัก ดังแสดงในกรอบสี่เหลี่ยมของรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากรูปที่ 7.1 จะเห็นได้ว่าระบบดังกล่าวมีโครงสร้างเช่นเดียวกันกับระบบที่พิจารณาในหัวข้อที่ 5.3 ของบทที่ 5 ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงในหัวข้อนี้จะอาศัยองค์ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่ได้รับการอธิบายไว้แล้วในบทที่ 5 นั่นคือ การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองที่ได้พิสูจน์ขึ้นเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงไว้แล้วในสมการที่ (5-14) แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นยังไม่เหมาะต่อการนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ดังนั้นจึงทำแบบจำลองดังกล่าวให้เป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่ง โดยแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นได้ถูกแสดงไว้แล้วในสมการที่ (5-15) สำหรับในบทนี้แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นและแบบจำลองที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นข้างต้นถูกนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (7-1) และสมการที่ (7-2) ตามลำดับ

$$\begin{cases}
\dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\
\dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\
\dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
\dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\
\dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{eq}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_C K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} V_o^* I_L \\
\quad - \frac{r_C K_{pv} K_{pi}}{A_r L_{dc}} V_o I_L + \frac{r_C K_{pi} K_{iv}}{A_r L_{dc}} X_v I_L - \frac{r_C K_{pi}}{A_r L_{dc}} I_L^2 + \frac{r_C K_{ii}}{A_r L_{dc}} X_i I_L \\
\quad - \frac{r_C K_{I_{dc}}}{A_r L_{dc}} I_{dc} I_L - \frac{r_C K_{V_{dc}}}{A_r L_{dc}} V_{dc} I_L \\
\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} V_o^* I_L + \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r C_{dc}} V_o I_L - \frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r C_{dc}} X_v I_L \\
\quad + \frac{K_{pi}}{A_r C_{dc}} I_L^2 - \frac{K_{ii}}{A_r C_{dc}} X_i I_L + \frac{K_{I_{dc}}}{A_r C_{dc}} I_{dc} I_L + \frac{K_{V_{dc}}}{A_r C_{dc}} V_{dc} I_L \\
\dot{I}_L = \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r L} V_o^* V_{dc} - \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_r L} V_o V_{dc} + \frac{K_{pi} K_{iv}}{A_r L} X_v V_{dc} - \frac{K_{pi}}{A_r L} I_L V_{dc} \\
\quad + \frac{K_{ii}}{A_r L} X_i V_{dc} - \frac{K_{I_{dc}}}{A_r L} I_{dc} V_{dc} - \frac{K_{V_{dc}}}{A_r L} V_{dc}^2 - \frac{V_o}{L} \\
\dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\
\dot{X}_v = V_o^* - V_o \\
\dot{X}_i = -I_L - K_{pv} V_o + K_{pv} V_o^* + K_{iv} X_v
\end{cases} \quad (7-1)$$

$$\begin{cases}
\dot{\delta \mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\
\delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u}
\end{cases} \quad (7-2)$$

โดยที่ ตัวแปรสถานะ:

$$\delta \mathbf{x} = [\delta I_{sd} \quad \delta I_{sq} \quad \delta V_{bus,d} \quad \delta V_{bus,q} \quad \delta I_{dc} \quad \delta V_{dc} \quad \delta I_L \quad \delta V_o \quad \delta X_v \quad \delta X_i]^T$$

$$\text{ตัวแปรอินพุต: } \delta \mathbf{u} = [\delta V_m \quad \delta V_o^*]^T \quad \text{ตัวแปรเอาต์พุต: } \delta \mathbf{y} = [\delta I_{dc} \quad \delta V_{dc} \quad \delta I_L \quad \delta V_o]^T$$

รายละเอียดของ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ในสมการที่ (7-2) แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{S_d}{C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S_d}{L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} - \frac{r_c K_{I_{dc}} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} - \frac{r_c K_{V_{dc}} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} & a(5,7) & -\frac{r_c (K_{pv} K_{pi} + K_{V_o}) I_{L,0}}{A_r L_{dc}} & \frac{r_c K_{pi} K_{iv} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} & \frac{r_c K_{ii} I_{L,0}}{A_r L_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} + \frac{K_{I_{dc}} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} & \frac{K_{V_{dc}} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} & a(6,7) & \frac{(K_{pv} K_{pi} + K_{V_o}) I_{L,0}}{A_r C_{dc}} & \frac{K_{pi} K_{iv} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} & \frac{K_{ii} I_{L,0}}{A_r C_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{I_{dc}} V_{dc,0}}{A_r L} & a(7,6) & \frac{(K_{pi} + K_{I_r}) V_{dc,0}}{A_r L} & -\frac{(K_{pv} K_{pi} + K_{V_o}) V_{dc,0}}{A_r L} - \frac{1}{L} & \frac{K_{pi} K_{iv} V_{dc,0}}{A_r L} & \frac{K_{ii} V_{dc,0}}{A_r L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv} & K_{iv} & 0 \end{bmatrix}_{10 \times 10}$$

$$a(5,7) = \frac{r_c K_{pv} K_{pi} V_{o,0}^*}{A_r L_{dc}} - \frac{r_c (K_{pv} K_{pi} + K_{V_o}) V_{o,0}}{A_r L_{dc}} + \frac{r_c K_{pi} K_{iv} X_{v,0}}{A_r L_{dc}} - \frac{2r_c (K_{pi} + K_{I_L}) I_{L,0}}{A_r L_{dc}} + \frac{r_c K_{ii} X_{i,0}}{A_r L_{dc}} - \frac{r_c K_{I_{dc}} I_{dc,0}}{A_r L_{dc}} - \frac{r_c K_{V_{dc}} V_{dc,0}}{A_r L_{dc}}$$

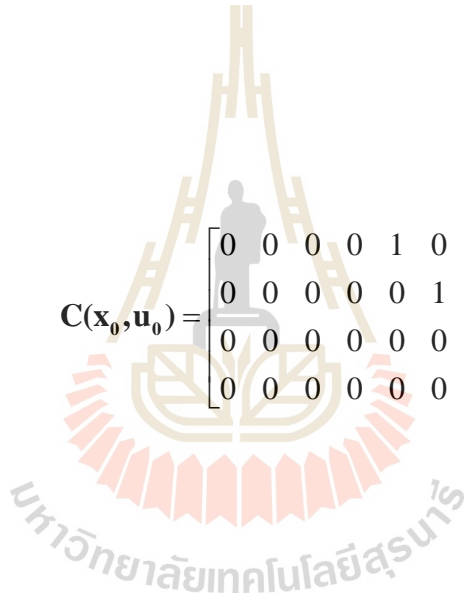
$$a(6,7) = -\frac{K_{pv} K_{pi} V_{o,0}^*}{A_r C_{dc}} + \frac{(K_{pv} K_{pi} + K_{V_o}) V_{o,0}}{A_r C_{dc}} - \frac{K_{pi} K_{iv} X_{v,0}}{A_r C_{dc}} + \frac{2(K_{pi} + K_{I_L}) I_{L,0}}{A_r C_{dc}} - \frac{K_{ii} X_{i,0}}{A_r C_{dc}} + \frac{K_{I_{dc}} I_{dc,0}}{A_r C_{dc}} + \frac{K_{V_{dc}} V_{dc,0}}{A_r C_{dc}}$$

$$a(7,6) = \frac{K_{pv}K_{pi}V_{o,0}^*}{A_rL} - \frac{(K_{pv}K_{pi} + K_{V_o})V_{o,0}}{A_rL} + \frac{K_{pi}K_{iv}X_{v,0}}{A_rL} - \frac{(K_{pi} + K_{I_L})I_{L,0}}{A_rL} + \frac{K_{ii}X_{i,0}}{A_rL} - \frac{K_{I_{dc}}I_{dc,0}}{A_rL} - \frac{2K_{V_{dc}}V_{dc,0}}{A_rL}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\cos(\lambda_0)}{L_{eq}} & 0 \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sin(\lambda_0)}{L_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_C K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{L_{dc}} \\ 0 & -\frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{C_{dc}} \\ 0 & \frac{K_{pv} K_{pi} V_{dc,0}}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & K_{pv} \end{bmatrix}_{10 \times 2}$$

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

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



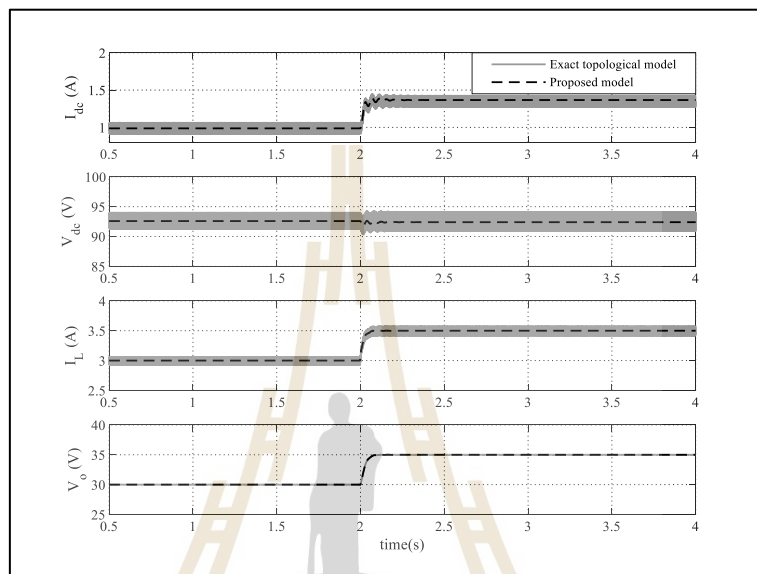
7.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้น

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (7-2) กับการจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7.1 ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB โดยใช้ค่าพารามิเตอร์อ้างอิงของระบบจริงที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของชุดทดสอบในบทที่ 6 สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริงสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
V_s	40 V _{rms/phase}	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
ω	$2\pi \times 50$ rad/s	ความถี่ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
R_{eq}	0.0956 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}	1051.55 μ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
L ($\Delta I_L \leq 0.2$ A)	15 mH	ความเหนี่ยวนำของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก
C ($\Delta V_C \leq 2.8$ mV)	1000 μ F	ความจุไฟฟ้าของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก
R	10 Ω	ความต้านทานของโพลดวงจรแปลงผันแบบบัก
A_r	10	ค่ายอดของสัญญาณสามเหลี่ยมสำหรับตัวควบคุมพีไอ
K_{pv}	0.0257	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีสำหรับลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{iv}	3.9478	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมไอสำหรับลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า
K_{pi}	2.8205	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีสำหรับลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า
K_{ii}	2531.7	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมไอสำหรับลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นในบทนี้ จะดำเนินการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของวงจรแปลงผันแบบบัทจาก 30 V ไปเป็น 35 V ที่เวลา 2 วินาที โดยกำหนดให้ค่า $K_{I_{dc}} = 0.5$ และ $K_{V_{dc}} = 0.1$ ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ได้จากการสุ่มค่าตอบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.2



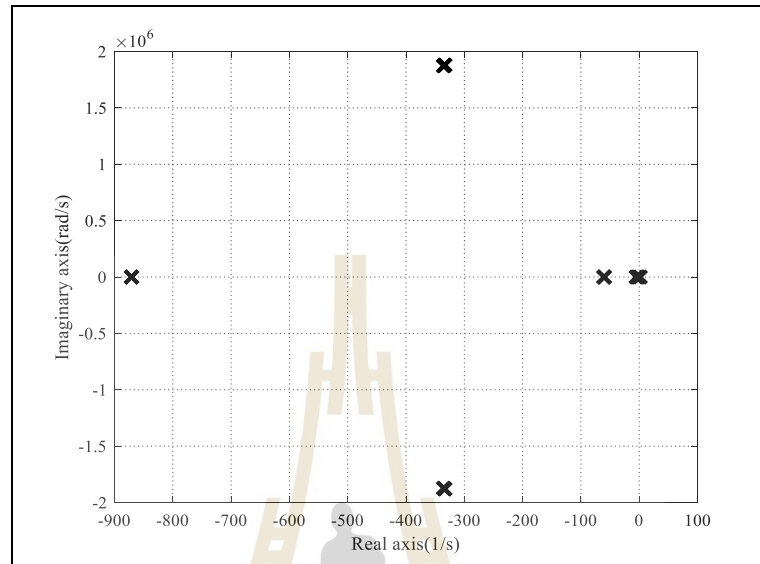
รูปที่ 7.2 ผลตอบสนองของ I_{dc} , V_{dc} , I_L และ V_o ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 7.1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_o^* จาก 30 V ไปเป็น 35 V

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปที่ 7.2 พบว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะคงตัว ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นในบทนี้มีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

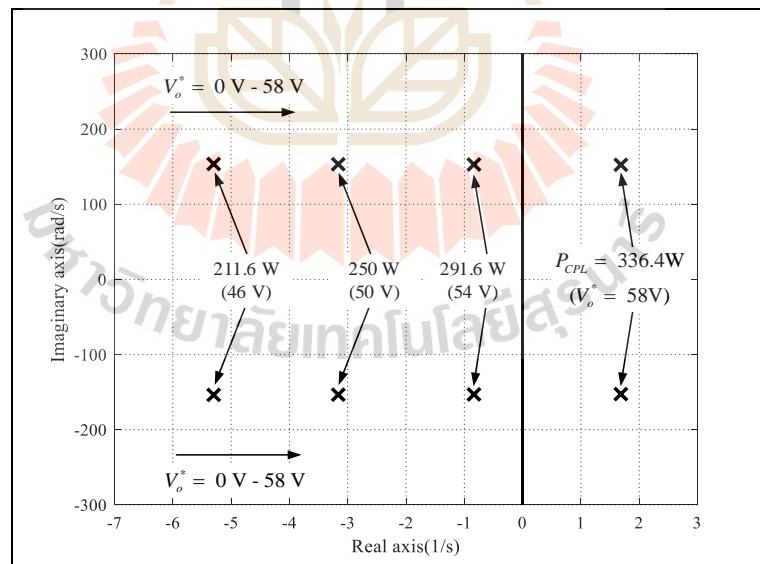
7.2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของชุดทดสอบจริงด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงจะอาศัยการคำนวณค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (7-2) ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้ค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ เปรียบเสมือนเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่ยังไม่มีอุปกรณ์การวางโพล การวิเคราะห์เสถียรภาพในหัวข้อนี้จะดำเนินการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิงของโหนดวงจรแปลงผันแบบบัทเพิ่มขึ้น

ที่ละ 4 V เริ่มตั้งแต่ 0 V (0 W) จนถึง 58 V (336.4 W) สำหรับค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบและค่าเจาะจงเด่นที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.3 และ 7.4 ตามลำดับ



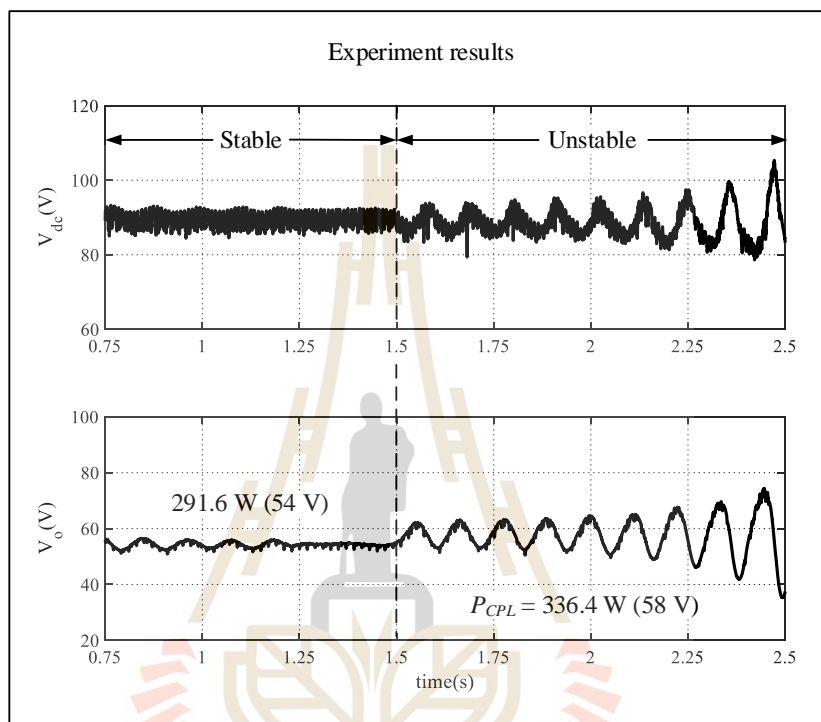
รูปที่ 7.3 ค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบที่พิจารณาในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.4 ค่าเจาะจงเด่นที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจริง

จากรูปที่ 7.4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าของโหลดคงจรแปลงผันแบบบัคมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 54 V (291.6 W) ไปเป็น 58 V (336.4 W) จะส่งผลให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบจริง

เคลื่อนจากฝั่งซ้ายของระนาบเอสมายังฝั่งขวาของระนาบเอส ซึ่งหมายถึงระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 7.1 เกิดการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าจุดการทำงานดังกล่าวเป็นจุดขาดเสถียรภาพของระบบ การยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยผลตอบสนองที่ได้จากชุดทดสอบจริง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.5

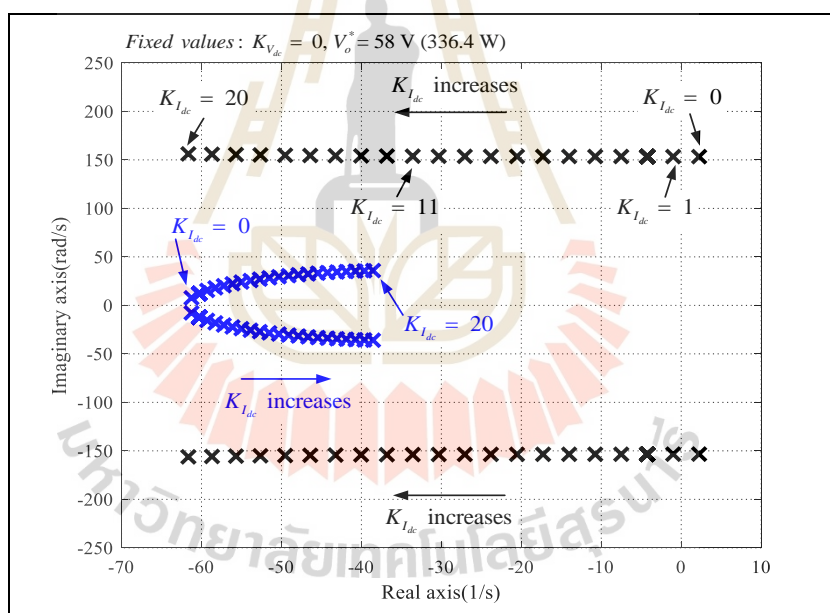


รูปที่ 7.5 การยืนยันผลการขาดเสถียรภาพของระบบจริง

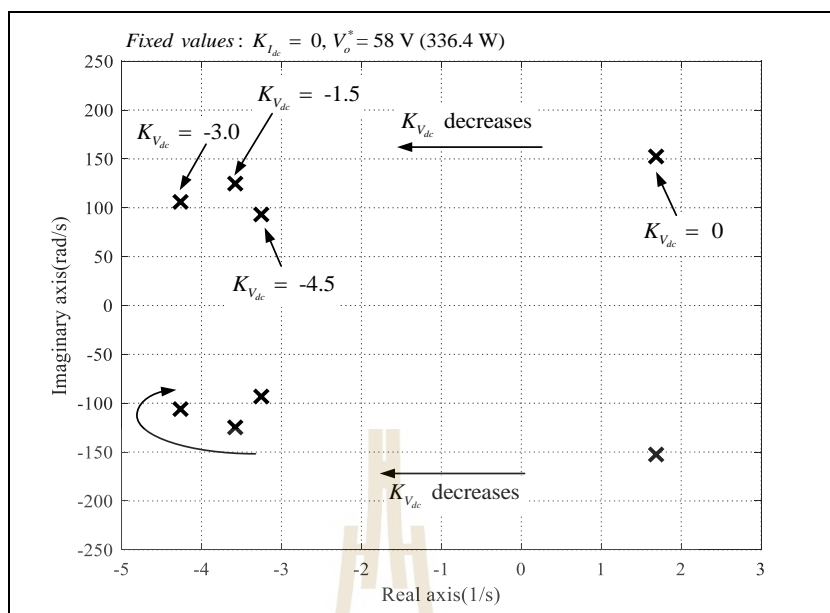
จากรูปที่ 7.5 จะเห็นว่า เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัตมีการเปลี่ยนแปลงจาก 54 V (291.6 W) ไปเป็น 58 V (336.4 W) ที่เวลา 1.5 วินาที จะทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งพิจารณาได้จากการกระเพื่อมของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่บัสดีซีมีค่าเพิ่มมากขึ้นและไม่สามารถเข้าสู่ค่าแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัวได้ โดยผลตอบสนองของชุดทดสอบมีจุดขาดเสถียรภาพเป็นไปตามทฤษฎีและสอดคล้องกับผลตอบสนองจากการจำลองสถานการณ์ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำแนวทางการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลมาใช้สำหรับบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบจริง ซึ่งยังไม่มียานวิจัยในอดีตที่นำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีซีที่มีโพลเป็นวงจรแปลงผันแบบบัตที่มีการควบคุมสำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับการทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลของระบบจริงจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

7.3 ผลทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากการ ออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง

เนื้อหาในหัวข้อนี้จะนำเสนอการนำวิธีการวางโพลมาประยุกต์ใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม โดยใช้ อัตราขยายการวางโพลที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง ซึ่งรายละเอียด เกี่ยวกับวิธีการออกแบบดังกล่าวได้ถูกนำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.5.1 ของบทที่ 5 การออกแบบ อัตราขยายด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองจะอาศัยการวิเคราะห์ค่าเจาะจงเด่นของระบบ ที่พิจารณา ณ จุดขาดเสถียรภาพ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยายการวางโพล การวิเคราะห์ ดังกล่าวจะดำเนินการผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (7-2) ซึ่งจะได้ค่าเจาะจงเด่น ของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ แสดงได้ดังรูปที่ 7.6 และรูปที่ 7.7 ตามลำดับ



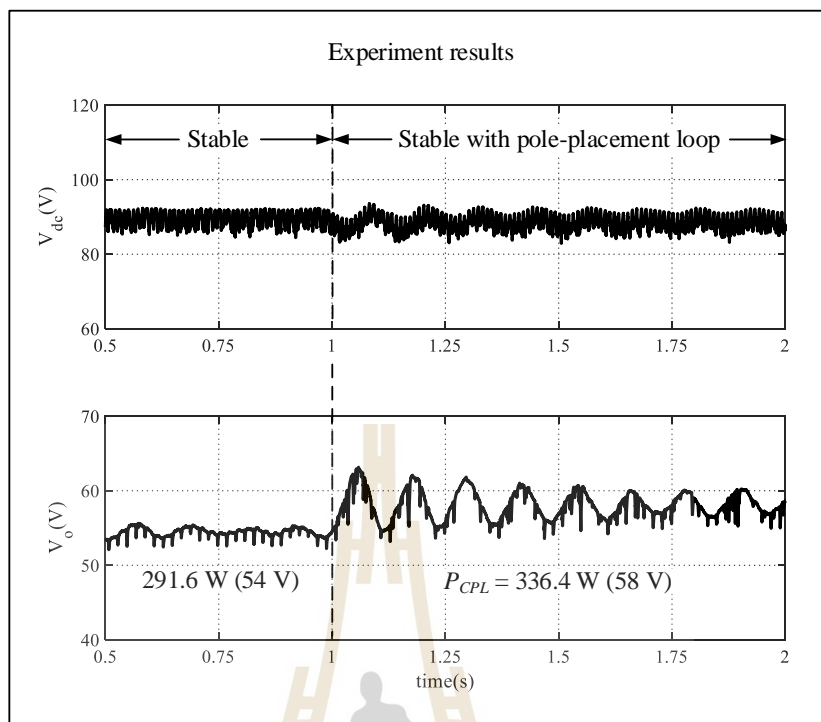
รูปที่ 7.6 ค่าเจาะจงเด่นของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$



รูปที่ 7.7 ค่าเจาะจงเด่นของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{V_{dc}}$

จากรูปที่ 7.6 และรูปที่ 7.7 จะสามารถออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลตามหลักการของวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองได้ โดยเลือกค่าอัตราขยายการวางโพลค่าน้อยที่สุดที่เพียงพอต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองไว้ที่ค่า $K_{I_{dc}} = 1$ และ $K_{V_{dc}} = -1.5$

ลำดับถัดไปจะเป็นการยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาเมื่อใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลที่ได้จากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.8 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ค่าอัตราขยายการวางโพล ที่ออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง

จากรูปที่ 7.8 เป็นผลตอบสนองที่ได้จากชุดทดสอบและผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่พิจารณาการวางโพล โดยกำหนดให้โพลดวงจรแปลงผันแบบบดมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิงจาก 54 V (291.6 W) ไปเป็น 58 V (336.4 W) ที่เวลา 1 วินาที ในที่นี้ได้ทำการคงค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}} = 1$ และ $K_{V_{dc}} = -1.5$ จากผลตอบสนองของชุดทดสอบจะเห็นได้ว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 58 V (336.4 W) ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะไม่เกิดการขาดเสถียรภาพในสภาวะการทำงานดังกล่าว ซึ่งเป็นไปตามผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการใช้อัตราขยายการวางโพลที่ออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้

7.4 ผลทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

การออกแบบอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวจะอาศัยแนวทางการออกแบบที่ได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.5.1 ของบทที่ 5 โดยจะนำแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นจากสมการที่ (7-2) มาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและประเมินสมรรถนะการควบคุม

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบuck เพื่อสร้างเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวสำหรับค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมดังกล่าวสำหรับการค้นหาค่าอัตราขยายการวางโพลในหัวข้อนี้ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัวสำหรับระบบจริง

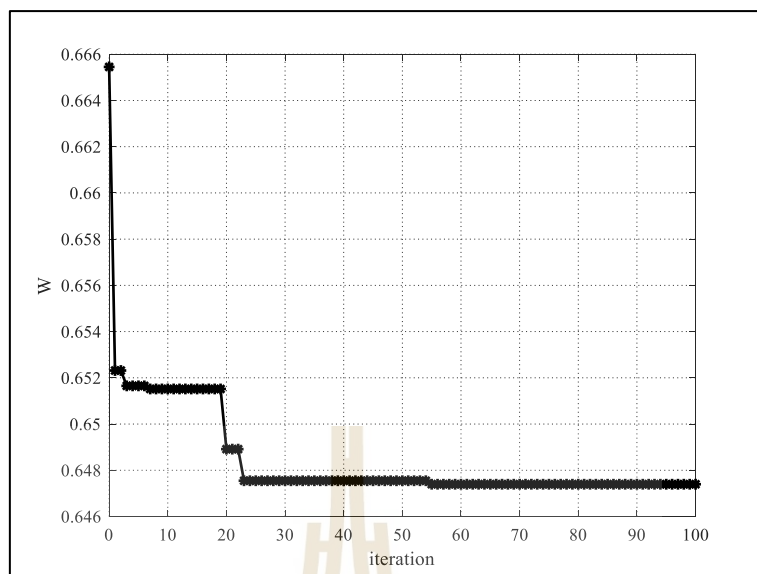
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
<i>Initial number neighbor</i>	20	จำนวนคำตอบเริ่มต้น
<i>Number neighbor</i>	40	จำนวนคำตอบรอบข้าง
<i>Radius</i>	20	ค่ารัศมีการค้นหาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของขอบเขต
<i>DF</i>	1.5	ค่าอัตราปรับลดรัศมี

การกำหนดขอบเขตการค้นหาอัตราขยายการวางโพลจะพิจารณาจากข้อจำกัดในการปรับค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ ที่ได้นำเสนอไว้แล้วในรูปที่ 7.6 และรูปที่ 7.7 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปดังกล่าวจะสามารถกำหนดขอบเขตการค้นหาอัตราขยายการวางโพลได้ดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 ขอบเขตการค้นหาอัตราขยายการวางโพลของระบบจริง

พารามิเตอร์ของลูการวางโพล	ขอบเขตการค้นหา	
	ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
$K_{I_{dc}}$	0	11
$K_{V_{dc}}$	-3.0	0

การค้นหาอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ ด้วยอัลกอริทึมตามเชิงปรับตัว จะพิจารณาผลการลู่เข้าของค่า W ที่ดีที่สุดจากการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งจะดำเนินการวนรอบเพื่อหาคำตอบเป็นจำนวน 100 รอบ ผลการลู่เข้าของค่า W ที่ดีที่สุดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.9 และผลการค้นหาอัตราขยายการวางโพลสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.4 จากผลการค้นหาดังกล่าวจะสามารถออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวได้โดยเลือกค่าอัตราขยายจากการค้นหาในรอบที่มีค่า W น้อยที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัวไว้ที่ค่า $K_{I_{dc}} = 10.51$ และ $K_{V_{dc}} = -2.13$

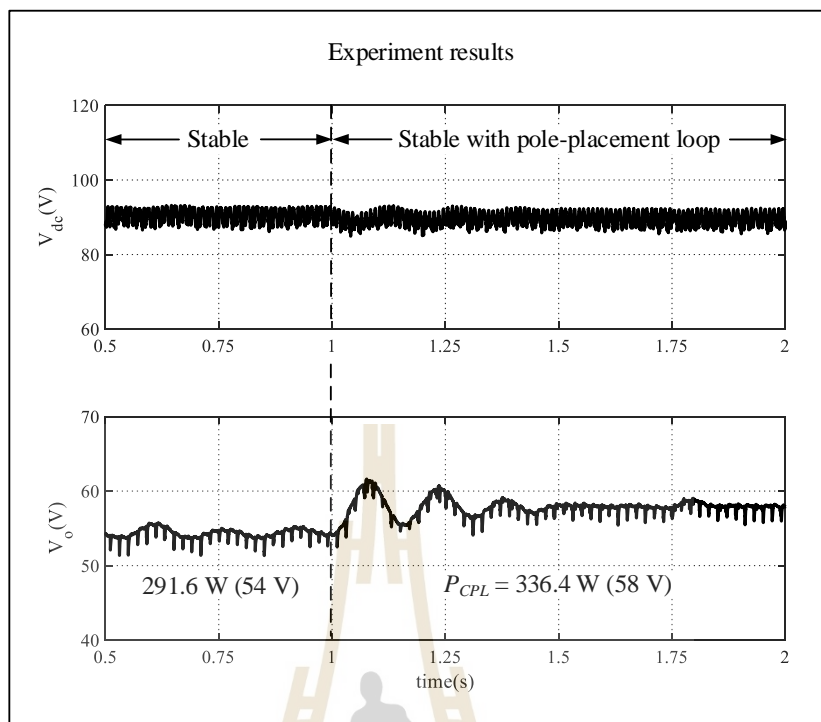


รูปที่ 7.9 การลู่เข้าสู่ค่าตอบของวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวของระบบจริง

ตารางที่ 7.4 ค่าอัตราขยายการวางโพลที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวของระบบจริง

ครั้งที่	ค่าที่ออกแบบ		ค่า W
	$K_{I_{dc}}$	$K_{V_{dc}}$	
1	10.30	-2.12	0.6522
2	9.82	-2.27	0.6528
3	10.51	-2.13	0.6474
4	10.17	-2.19	0.6491
5	10.69	-2.09	0.6499

การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลของกรณี
ที่ออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.10



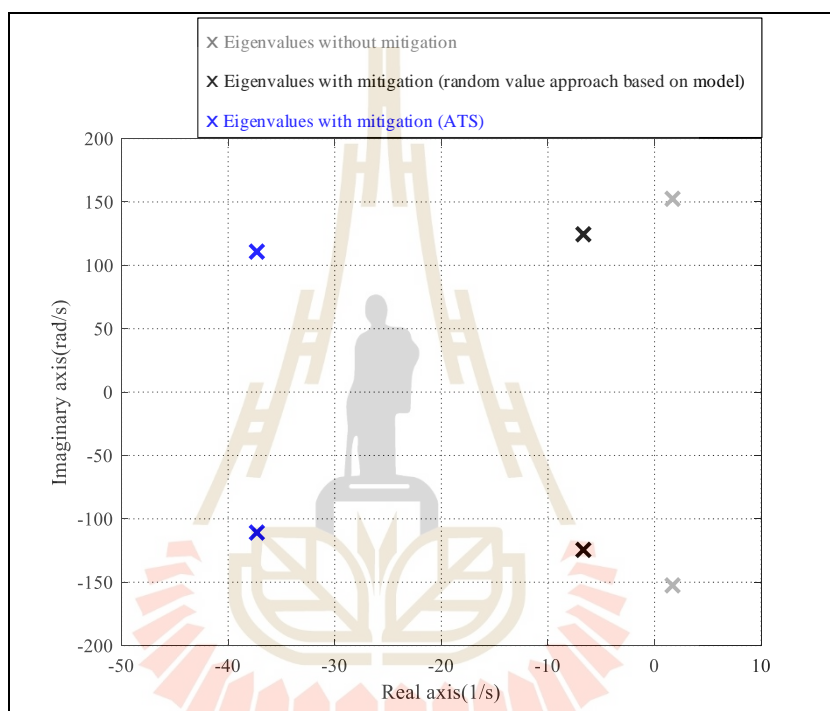
รูปที่ 7.10 การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลที่ออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

จากรูปที่ 7.10 เป็นผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และผลตอบสนองที่ได้จากชุดทดสอบในกรณีที่ใช้ค่าอัตราขยายจากวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวโดยกำหนดให้โพลตรงรแปลงผันแบบบักมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิงจาก 54 V (291.6 W) ไปเป็น 58 V (336.4 W) ที่เวลา 1 วินาที ในที่นี้ได้ทำการคงค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}} = 10.51$ และ $K_{V_{dc}} = -2.13$ จากผลตอบสนองของชุดทดสอบจะเห็นได้ว่า ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับ 58 V ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะไม่เกิดการขาดเสถียรภาพในสภาวะการทำงานดังกล่าว ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการใช้อัตราขยายการวางโพลที่ออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้

ลำดับถัดไปจะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณา ณ จุดขาดเสถียรภาพ เพื่อแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งค่าเจาะจงเด่นของระบบที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ทั้งกรณีที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและกรณีที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว โดยใช้อัตราขยายการวางโพลที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการดังกล่าวสามารถสรุปผลการออกแบบได้ดังตารางที่ 7.5 สำหรับค่าเจาะจงเด่นของระบบเมื่อพิจารณาจุดการวางโพลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.11

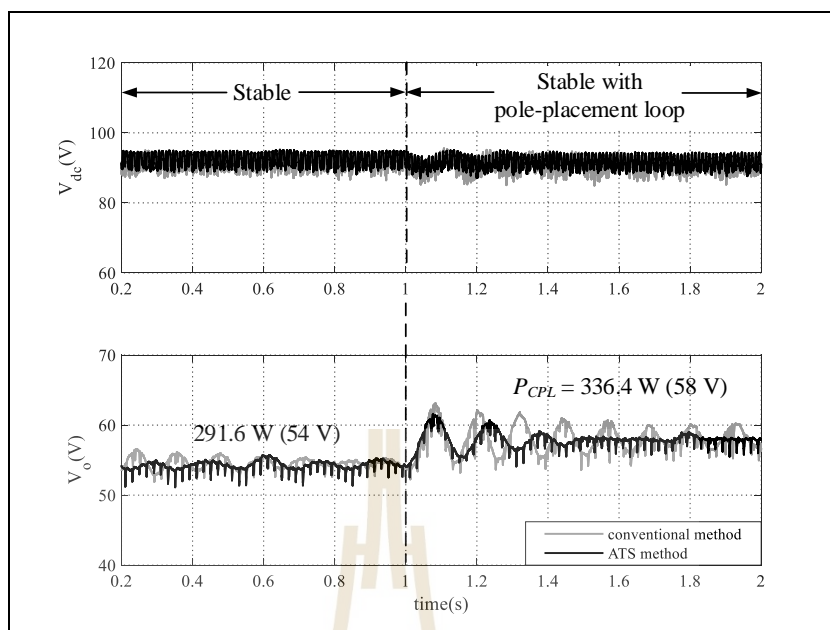
ตารางที่ 7.5 ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวของระบบจริง

วิธีการออกแบบ	$K_{I_{dc}}$	$K_{V_{dc}}$
วิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง	1	-1.5
วิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว	10.51	-2.13



รูปที่ 7.11 ค่าเจาะจงเด่นของระบบ เมื่อพิจารณาการวางโพลที่ออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว

จากรูปที่ 7.11 จะเห็นได้ว่าการใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลทั้งในกรณีที่ออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัวสามารถทำให้คู่โพลเด่นของระบบย้ายมาอยู่ทางฝั่งซ้ายของระนาบเอสได้ ซึ่งถือเป็นการยืนยันค่าเจาะจงเด่นของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวิธีการออกแบบทั้งสองกรณี อย่างไรก็ตามการบรรเทาการขาดเสถียรภาพโดยใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลของทั้งสองกรณีข้างต้นทำให้คู่โพลเด่นของระบบถูกย้ายไปยังตำแหน่งใหม่ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลให้สมรรถนะในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแตกต่างกัน การเปรียบเทียบสมรรถนะของผลตอบสนองจากชุดทดสอบที่ใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลของทั้งสองกรณีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.12



รูปที่ 7.12 การเปรียบเทียบสมรรถนะการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ

จากรูปที่ 7.12 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของชุดทดสอบ ในกรณีที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองกับวิธีการค้นหาแบบตาบู่ เซิงปรับตัว ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตในกรณีที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เสิงปรับตัวมีการพุ่งเกินและระยะเวลาในการลู่เข้าสู่สมดุลน้อยกว่ากรณีที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าเจาะจงเด่นในรูปที่ 7.11 เนื่องจากค่าเจาะจงเด่นของระบบที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เสิงปรับตัวมีอัตราส่วนการหน่วงมากกว่ากรณีที่ออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง จึงทำให้ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีการแกว่งของรูปสัญญาณน้อยกว่า ดังนั้นการบรรเทาการขาดเสถียรภาพในกรณีที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เสิงปรับตัวในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงมีสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบัทซ์ที่ดีกว่ากรณีที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง

7.5 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลด วงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทนี้ได้มาจากการระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ในบทที่ 6 จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่าจุดขาดเสถียรภาพของระบบจริงอยู่ที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเท่ากับ 336.4 W (58 V) ซึ่งผลตอบสนองที่ได้จากชุดทดสอบมีการขาดเสถียรภาพเป็นไปตามผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี อีกทั้งยังได้นำเสนอผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวางโพล วิธีการดังกล่าวจะกำหนดค่าอัตราขยายการวางโพล $K_{I_{dc}}$ และ $K_{V_{dc}}$ จากนั้นนำไปปรับเทียบกับสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรองสัญญาณดีซี เพื่อให้ได้เป็นสัญญาณการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของรูปการวางโพล สำหรับผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและกรณีที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวซึ่งผลตอบสนองที่ได้จากชุดทดสอบของทั้งสองกรณีเป็นไปตามผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพในทางทฤษฎี นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักของทั้งสองกรณีข้างต้น จากการเปรียบเทียบสมรรถนะพบว่าการบรรเทาการขาดเสถียรภาพในกรณีที่ใช้อัตราขยายการวางโพลจากการออกแบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวให้สมรรถนะในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักที่ดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซี เป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เริ่มต้นจากการศึกษาค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ผ่านมาคือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในข้างต้นถือเป็นพื้นฐานและองค์ความรู้ที่สำคัญในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับพัฒนางานวิจัยวิทยานิพนธ์ รายละเอียดที่เกี่ยวกับผลงานวิจัยและการพัฒนาระบบสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 3 การพิสูจน์หาแบบจำลองจะเริ่มต้นจากการพิจารณาระบบแบบวงเปิด (กรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุม) ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อทำการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นสวิตช์จะทำได้แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อนสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้อาศัยการผสมผสานระหว่างวิธีคิดร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเหมาะต่อการนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดำเนินการโดยเปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นกับผลตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบความถูกต้องแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พิสูจน์ขึ้นมีผลตอบสนองที่ถูกต้องทั้งในสภาวะชั่วคราวและสภาวะคงตัว ดังนั้นแบบจำลองที่ได้พิสูจน์ขึ้นนี้สามารถนำไปต่อยอดเพื่อพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีตัวควบคุมซึ่งเป็นระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคของระบบแบบวงปิด (กรณีที่มีตัวควบคุม) อาศัยการต่อยอดและพัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแบบวงเปิด โดยการเพิ่มตัวควบคุมแบบพีไอเข้าไปในระบบ อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ขึ้นปรากฏพจน์ของผลคูณระหว่างตัวแปรสถานะ

ซึ่งสามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับที่หนึ่ง การทำให้เป็นเชิงเส้นดังกล่าว ทำให้ได้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของระบบที่มีเมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ และ $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ รายละเอียดเมทริกซ์ดังกล่าวจะปรากฏพจน์ตัวแปรที่ต้องคำนวณค่าในสภาวะคงตัว ซึ่งค่าต่าง ๆ ในเมทริกซ์เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับจุดการทำงานจากระบบ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบักด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง พร้อมทั้งดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว ลำดับถัดไปเป็นการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม จากการศึกษาค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 2 พบว่ามีแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นอยู่หลายแนวทางที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เช่น การวิเคราะห์เสถียรภาพบนระนาบเอสด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง การวิเคราะห์เสถียรภาพบนโดเมนความถี่ด้วยเกณฑ์ของมิตเดิลบรูคส์ การวิเคราะห์ระนาบเฟส และการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบโดยตรงของเลียปูนอฟ เป็นต้น สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง การหาค่าเจาะจงของระบบจะนำเมทริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นไปใช้ในการคำนวณตามสมการที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 ผลการคำนวณหาค่าเจาะจงสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบได้โดยพิจารณาเฉพาะคู่เจาะจงเด่นซึ่งจุดการทำงานที่ส่งผลให้ค่าเจาะจงเด่นของระบบเคลื่อนจากฝั่งซ้ายไปยังฝั่งขวาของระนาบเอสจะเป็นจุดขาดเสถียรภาพของระบบ สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องจากการวิเคราะห์เสถียรภาพอาศัยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรม MATLAB เพื่อแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่บัสดีซีเกิดการขาดเสถียรภาพตรงตามผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี

จากการดำเนินงานที่ผ่านมาเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้ทราบถึงจุดขาดเสถียรภาพของระบบ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพเป็นเพียงการคาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพเท่านั้น แต่ไม่สามารถทำให้ระบบที่เกิดการขาดเสถียรภาพสามารถกลับมาเสถียรภาพได้ ดังนั้นเนื้อหาในบทที่ 5 จึงนำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมโดยใช้วิธีการวางโพล ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียเนื่องจากการเพิ่มวงจรช่วยเข้าไปในระบบ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการดังกล่าวจะอาศัยการเพิ่มลูบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเข้าไปในลูบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักที่มีอยู่เดิม โดยจะดำเนินการตรวจจับสัญญาณของตัวแปรสถานะทุกตัวในระบบมาปรับคูณกับค่าอัตราขยายการวางโพล ซึ่งค่าอัตราขยายดังกล่าวจะมีจำนวนเท่ากับจำนวนของตัวแปรสถานะในระบบ แต่เนื่องจากระบบที่พิจารณามีตัวแปรสถานะบางตัวที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง จึงทำให้สัญญาณตัวแปรสถานะที่จะนำมาใช้ในการบรรเทาการขาด

เสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลเหลือน้อยแค่เพียงสัญญาณตัวแปรสถานะที่สามารถวัดค่าได้ อย่างไรก็ตาม การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลสามารถพิจารณาเฉพาะสัญญาณของตัวแปรสถานะที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำหลักการตัวประกอบการมีส่วนร่วมมาใช้ในการระบุตัวแปรสถานะที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพ เพื่อลดจำนวนของสัญญาณตัวแปรสถานะที่จะป้อนเข้าสู่การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ สำหรับวิธีการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลที่ได้นำเสนอไว้มีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว การออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวจะอาศัยผลการวิเคราะห์ขีดจำกัดของค่าเงาเงเด่นจากการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองมาใช้ในการกำหนดขอบเขตของการค้นหา การยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวิธีการวางโพลจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์โดยนำค่าอัตราขยายการวางโพลที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทั้งสองไปใช้ในรูปการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพพบว่า การใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทั้งสองสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ โดยที่การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลที่ใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดที่ดีกว่าการใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง ดังนั้นจึงสามารถยืนยันว่าหลักการของวิธีการวางโพลสามารถใช้บรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ และการออกแบบค่าด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวให้ผลการบรรเทาที่มีสมรรถนะที่ดีกว่า

การสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โหลดดังกล่าวจะใช้วงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตซึ่งมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ชุดทดสอบดังกล่าวถูกสร้างขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพในทางทฤษฎี ในส่วนของชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะดำเนินการพิจารณาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเฉพาะที่จุดขาดเสถียรภาพของระบบ รายละเอียดการสร้างชุดทดสอบนี้เป็นเนื้อหาในบทที่ 6 ซึ่งได้อธิบายเกี่ยวกับรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของแต่ละวงจรที่เป็นส่วนประกอบหลักของระบบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ วงจรกรองสัญญาณดีซี และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัก นอกจากนี้ยังได้นำเสนอเกี่ยวกับวงจรที่ส่วนประกอบย่อยในระบบ ได้แก่ วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วงจรตรวจวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้า และวงจรจุดชนวนเกทของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัก การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรแปลงผันแบบบักใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น Arduino Mega2560 เป็นตัวควบคุมการทำงาน สำหรับรูปของตัวควบคุมพีไอและรูปการบรรเทาการขาดเสถียรภาพการวางโพลจะถูก

เขียนโปรแกรมไว้ภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ในส่วนท้ายของเนื้อหาได้นำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของชุดทดสอบ เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพรวมถึงการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของชุดทดสอบ

ลำดับสุดท้ายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอผลการทดสอบการขาดเสถียรภาพและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพที่ได้จากชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ซึ่งได้นำเสนอเนื้อหาไว้ในบทที่ 7 โดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ของชุดทดสอบ ผลการทดสอบการขาดเสถียรภาพจากชุดทดสอบแสดงให้เห็นว่า ชุดทดสอบมีจุดขาดเสถียรภาพตรงตามผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในทางทฤษฎี สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลได้ทำการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลโดยดำเนินการในลักษณะเช่นเดียวกันกับการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 ค่าอัตราขยายการวางโพลที่ออกแบบจะถูกนำไปใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของชุดทดสอบ โดยได้กำหนดค่าอัตราขยายการวางโพลไว้ในโปรแกรมของลูการวางโพลที่ถูกเขียนอยู่ภายในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของชุดทดสอบพบว่าการใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลองและวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวสามารถบรรเทาการขาดเสถียรภาพได้ โดยที่การใช้อัตราขยายการวางโพลจากวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของโหลดที่ดีกว่าการใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวิธีการวางโพลในทางทฤษฎี

8.2 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

- ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก โดยใช้วิธีดีคิวผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อเปลี่ยนแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับการอีกทั้งยังได้นำเสนอการทำแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นผ่านทฤษฎีบทค่าเจาะจงได้

- ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำการหวนวงแบบแอกทีฟทางด้านโหลดด้วยวิธีการวางโพลมาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม ซึ่งยังไม่พบเห็นงานวิจัยในอดีตถึงปัจจุบันที่นำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี โดยวิธีการวางโพลเป็นการสร้างสัญญาณชดเชยสำหรับ

บรรเทาการขาดเสถียรภาพในลักษณะเชิงเส้น ไม่มีพจน์ของการอนุพันธ์สัญญาณ ดังนั้นจึงไม่มีผลกระทบของการขยายสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์วางโพล

- ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำวิธีการค้นหาแบบตาข่ายปรับตัวซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพล ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของอุปกรณ์บรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพล เพื่อให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของโพลตรงแปลงผันแบบบัสดีกว่าการใช้ค่าอัตราขยายการวางโพลจากวิธีการสุ่มเลือกค่าโดยอิงแบบจำลอง

- ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ประยุกต์ใช้หลักการตัวประกอบการมีส่วนร่วมเพื่อลดจำนวนของสัญญาณตัวแปรสถานะที่จะนำไปใช้ในอุปกรณ์บรรเทาการขาดเสถียรภาพ โดยทั่วไปสัญญาณตัวแปรสถานะที่จะนำมาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพลจะมีจำนวนเท่ากับจำนวนของตัวแปรสถานะจากแบบจำลองของระบบ แต่เนื่องจากตัวแปรสถานะบางตัวของระบบนั้นไม่สามารถวัดค่าสัญญาณได้โดยตรง งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำหลักการดังกล่าวมาใช้ในการลดจำนวนสัญญาณของตัวแปรสถานะสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ โดยจะพิจารณาเฉพาะสัญญาณตัวแปรสถานะที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเท่านั้น

8.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

- งานวิจัยในอนาคตควรมีการพิจารณาระบบไฟฟ้าที่สอดคล้องกับโครงสร้างที่มีสถาปัตยกรรมใหม่ ตัวอย่างเช่น ระบบไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินหรือระบบไฟฟ้าที่มีการนำพลังงานทดแทนมาใช้งานในปัจจุบัน เพื่อแสดงถึงการนำองค์ความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

- งานวิจัยในอนาคตควรมีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยอุปกรณ์วางโพล โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับนำมาใช้ในการคำนวณหาอัตราขยายการวางโพลที่แปรเปลี่ยนไปตามระดับกำลังไฟฟ้าของโพลกำลังไฟฟ้าคงตัว เพื่อให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถจ่ายโพลกำลังไฟฟ้าคงตัวในระดับที่สูงขึ้นได้

- งานวิจัยในอนาคตควรมีการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์อื่น ๆ มาประยุกต์ใช้กับงานด้านการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ เพื่อให้แนวทางการหาค่าอัตราขยายของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพมีความหลากหลายมากยิ่งขึ้นสถานะ

- งานวิจัยในอนาคตสามารถดำเนินการลดอันดับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบให้เป็นระบบอันดับสอง เพื่อให้สามารถออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลได้ด้วยวิธีการเทียบสัมประสิทธิ์ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพลแบบดั้งเดิม

รายการอ้างอิง

- กองพัน อารีรักษ์ (2564). **แบบจำลองวงจรแปลงผันอิเล็กทรอนิกส์กำลัง**. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: บริษัท จรัสสนิทวงศ์ จำกัด
- จักรกริช ภัคดีโต (2557). การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**.
- จักรกริช ภัคดีโต (2561). การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กโดยใช้เทคนิคลูบยกเล็ก **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**.
- เทพพนม โสภานเพิ่ม (2554). การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนาดกัน. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**.
- รัฐพล โพธิ์สังข์ (2563). การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้ลูบป้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**.
- อภิชัย สุขะพันธ์ (2558). การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**.
- Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M. and Thomas D.W.P. (2008). Stability Analysis and Modelling of AC-DC System with Mixed Load Using DQ-Transformation Method. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**. : 19-24.
- Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M., Lillo L.D. and Thomas D.W.P. (2009). Stability Study for a Hybrid AC-DC More-Electric Aircraft Power System. **IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems**. 48(1): 329-347.
- Areerak, K-N., Bozhko, S. V., Asher G. M., De Lillo L., and Thomas, D. W. P. (2012). Stability Study for a Hybrid AC-DC More-Electric Aircraft Power System. **IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems**. 48(1): 329-347.

- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P. (2008). Stability analysis and modelling of AC-DC system with mixed load using DQ-transformation method. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics.** : 19-24.
- Cespedes M., Xing L. and Sun J. (2011). Constant-Power Load System Stabilization by Passive Damping. **IEEE Trans. on Power Electronics.** 26(7) : 1832-1836.
- Chanpittayagit R., Areerak K-N. and Areerak K-L. (2014). Modeling of AC-DC power system feeding a controlled buck-boost converter. **11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON).** : 1-6.
- Chonsatidjamroen S., Areerak K-N. and Areerak K-L. (2012). The optimal cascade pi controller design of buck converters. **9th International Conference on Electrical Engineering Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology.** : 1-4.
- Emadi A., Khaligh A., Rivetta C.H. and Williamson G.A. (2006). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives. **IEEE Trans. on Vehicular Tech.** 55(4): 1112-1125.
- Emadi Ali (2004). Modeling of Power Electronic Loads in AC Distribution Systems Using the Generalized State-Space Averaging Method. **IEEE Trans on Industrial Electronics.** 51(5): 992-1000.
- Fulwani D.K. and Singh S. (2017). **Mitigation of Negative Impedance Instabilities in DC Distribution Systems: A Sliding Mode Control Approach.**
- Gamelin T.W. (2000). **Complex Analysis.** New York, USA: Springer.
- Han S.B., Choi N.S., Rim C.T. and Cho G.H. (1998). Modeling and Analysis of Static and Dynamic Characteristic for Buck-Type Three-Phase PWM Rectifier by Circuit DQ Transformation. **IEEE Trans on Power Electronics.** 13(2): 323-336.
- Hashlamoun, W. A., Hassouneh, M. A., and Abed, E. H. (2009). New Results on Modal Participation Factors: Revealing a Previously Unknown Dichotomy. **IEEE Transactions on Automatic Control,** 54(7), 1439-1449.
- Kabalan M., Singh P. and Niebur D. (2017). Large Signal Lyapunov-Based Stability Studies in microgrids: A Review. **IEEE Trans on Smart Grid.** 8(5): 2287-2295.

- Kim, S., and Williamson, S. S. (2011). Negative impedance instability compensation in more electric aircraft DC power systems using state space pole placement control. **IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**, 1-6.
- Kim, S., and Williamson, S. S. (2012). Negative impedance instability compensation in buck converter using state space pole placement control. **25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)**, 1-5.
- Lin Z., Liu Y., He X., Xie W., Dong M. and Wang F. (2020). Closed-loop Stability Analysis of DC/DC converter with Input Filter. **IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA 2020)**. : 397-403.
- Mahdavi J., Emaadi A., Bellar M.D. and Ehsani M. (1997). Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications**. 44(8) : 767-770.
- Mohan, N., Undeland, T.M. and Robbins, W.P. (1995). **Power Electronics: Converters, Applications and Design**. (2nd ed.). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Mohan, N., Underland, T. M., and Robbins, W. P. (2003). **Power Electronics: Converters, Applications and Design**. (2nd Ed.). USA: John Wiley & Sons.
- Pakdeeto, J., Thanommuang, A., Chaicharoenudomrung, K., Areerak, K-N. and Areerak, K-L. (2021). The Effect of Parameter Variations of System Stability for AC-DC Power System Feeding Controlled Buck Converter. **2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)**. : 61-64.
- Phosung, R., Areerak, K-N., Sopapirm, T., and Areerak, K-L. (2022). Design and Optimization of Instability Mitigation for AC-DC Feeder Systems with Constant Power Loads Using Artificial Intelligence Techniques. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 37(5), 5385-5397.
- Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Srikaew, A., Sujitjorn, S., and Totarong, P. (2002). System identification via Adaptive Tabu Search. **IEEE International Conference on Industrial Technology**, 2(2), 915-920.

- Rahimi A.M., Williamson G.A. and Emadi A. (2010). Loop-Cancellation Technique: A Novel Nonlinear Feedback to Overcome the Destabilizing Effect of Constant-Power Loads. **IEEE Trans on Vehicular Technology**. 59(2): 650-661.
- Rashid, M. H. (2011). **Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications**. (3rd Ed.). Berlington, USA: Butterworth-Heinemann.
- Riccobono A. and Santi E., (2014). Comprehensive Review of Stability Criteria for DC Power Distribution Systems. **IEEE Trans on Indus. Appl.** 50(5): 3525-3535.
- Sopapirm, T. (2018). Instability Mitigation of a Three-Phase Diode Rectifier Feeding a Controlled Buck Converter by Using the Active Damping Method. **21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, 745-748.
- Sudhoff S.D. and Wasynczuk O. (1993). Analysis and Average-Value Modeling of Line-Commutated Converter-Synchronous Machine Systems. **IEEE Trans. on Energy Conversion**. 8(1): 92-99.
- Wu, M., and Lu, D. D. (2015). A Novel Stabilization Method of LC Input Filter With Constant Power Loads Without Load Performance Compromise in DC Microgrids. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 62(7), 4552-4562.



ภาคผนวก ก

โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณค่า λ ด้วยการ
คำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน - ราฟสัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

*****
โปรแกรมการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าและการคำนวณหาค่า  $\lambda$  ด้วยการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์
ของนิวตัน-ราฟสัน
*****

% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบ
Vrms = 40;
f = 50;
w = 2*pi*f;
Req = 0.079;
Leq = 0.1005e-3;
Ceq = 2e-9;
rL = 0.2756;
Ldc = 39.0002e-3;
rc = 0.5312;
Cdc = 1300e-6;
L = 15e-3;
C = 1000e-6;
R = 10;
Kpv = 0.0257
Kiv = 3.9478
Kpi = 2.8205
Kii = 2531.7
ru = 3*w*Leq/pi;
Sd = sqrt(3/2)*2*sqrt(3)/pi;
Ar = 10;
% เรียกใช้ฟังก์ชันการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าและการคำนวณหาค่า  $\lambda$ 
Vref = 40;
[A1] = Power_Flow(Vrms,w,Req,Leq,rL,R,Kpv,Kiv,Kii,Vref);
% ฟังก์ชันการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าและการคำนวณหาค่า  $\lambda$ 
function [A1]=Power_Flow(Vrms,w,Req,Leq,rL,R,Kpv,Kiv,Kii,v1o)
Z = sqrt(Req^2+(w*Leq)^2);

```

```

r = atand(w*Leq/Req);
P_Total = (v1o^2)/R;
Q_Total = 0;
Vs = Vrms;
% กำหนดค่าคำตอบเริ่มต้นและค่าความคาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้
eaVbus = 100;
ealambda = 100;
es = 1e-6;
k=0;
% คำนวณมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
% ด้วยการคำนวณของนิวตัน-ราฟสัน
while eaVbus>=es & ealambda>=es
    if k~=0
        du = Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*cosd(r)/Z;
        DU = Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z;
        dv = Vs*sind(r-lampda(k))/Z - 2*Vbus(k)*sind(r)/Z;
        DV = -Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z;
        U = Vbus(k)*Vs*cosd(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*cosd(r)/Z - P_Total/3;
        V = Vbus(k)*Vs*sind(r-lampda(k))/Z - Vbus(k)^2*sind(r)/Z - Q_Total;
        Vbus(k+1) = Vbus(k)-(U*DV-V*DU)/(du*DV-DU*dv);
        lampda(k+1) = lampda(k)-(V*du-U*dv)/(du*DV-DU*dv);
        eaVbus = abs((Vbus(k+1)-Vbus(k))/Vbus(k+1))*100 ;
        ealambda = abs((lampda(k+1)-lampda(k))/lampda(k+1))*100;
        V_bus = Vbus(k+1);
        L_degree = lampda(k+1);
    else
        Vbus(k+1) = Vrms*pi/(3*sqrt(3));
        lampda(k+1) = 0.0001;
    end
    k=k+1;
end

```

```

% คำนวณค่าในสภาวะคงตัว
A = Vs-V_bus*(cosd(L_degree)-i*sind(L_degree));
B = Z*(cosd(r)+i*sind(r));
Idc = (pi/(sqrt(6)))*abs(A/B);
Vdc = (3*sqrt(6)*V_bus/pi) - 3*Leq*w*Idc/pi - rL*Idc;
lambda = L_degree;
Vo = v1o;
IL = Vo/R;
Xv = ((IL)+(Kpv*Vo)-(Kpv*Vo))/Kiv;
Xi = Ar*(Vo)/(Vdc*Kii);
% เมทริกซ์ผลลัพธ์จากการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าและการคำนวณหาค่า λ
A1 = [lambda;Idc;Vdc;IL;Vo;Xv;Xi];
return

```

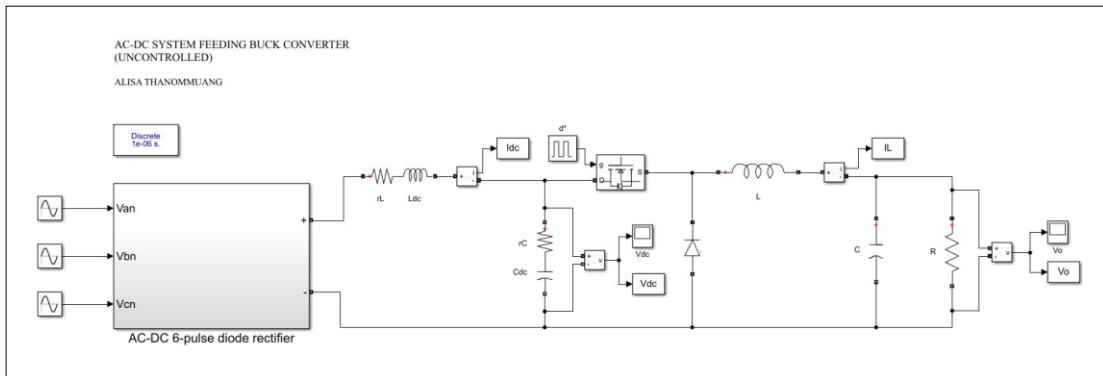




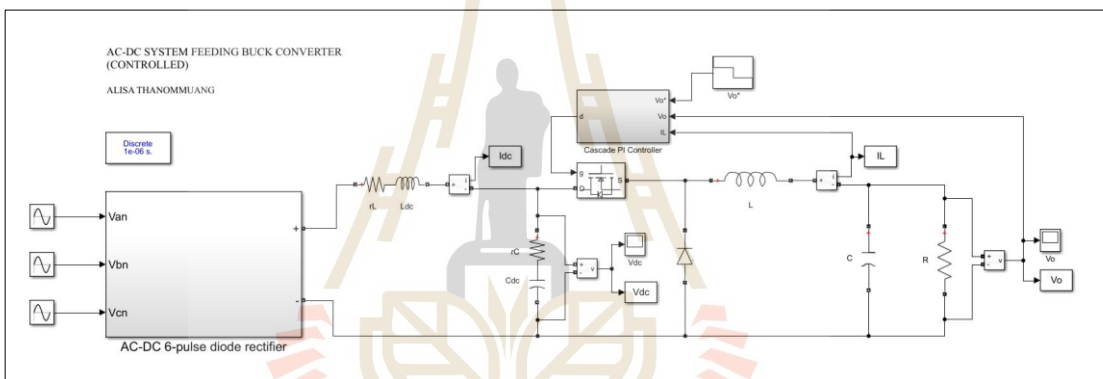
ภาคผนวก ข

ชุดบล็อกกำลังไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB

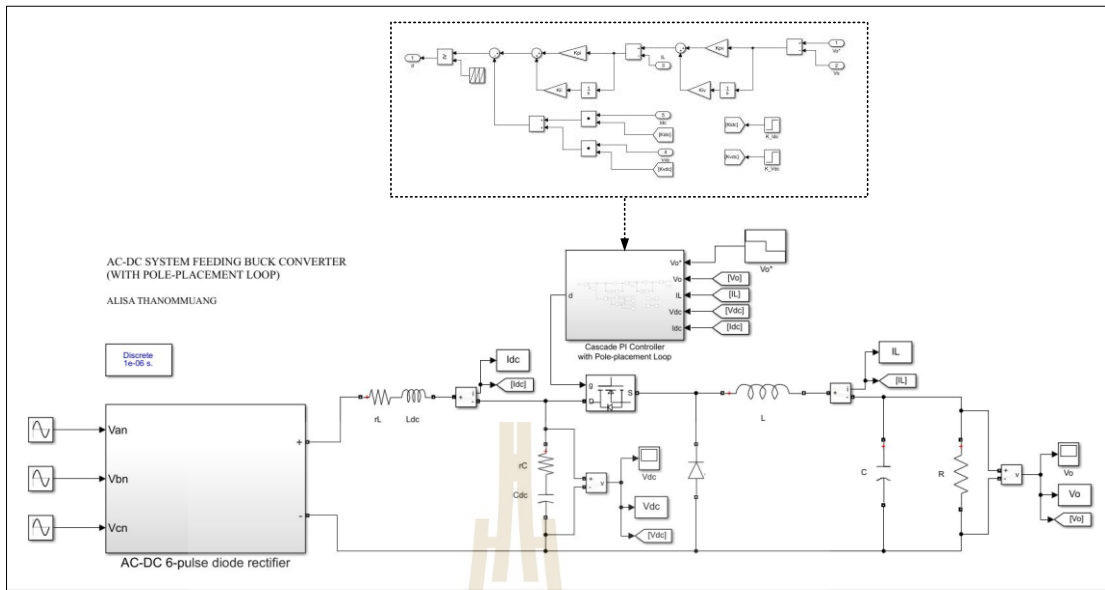
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.1 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา
กรณีที่โหลดไม่มีการควบคุม



รูปที่ ข.2 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา
กรณีที่โหลดมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต



รูปที่ ข.3 ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของโปรแกรม MATLAB สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา
เมื่อมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพล



ภาคผนวก ค

ตารางผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวเพื่อใช้ ในการออกแบบค่าอัตราขยายการวางโพล

การทดสอบหาค่าจำนวนคำตอบเริ่มต้นได้ทำการทดสอบที่ค่าเท่ากับ 10 20 30 40 และ 50 คำตอบ ดังตารางที่ ค.1 โดยกำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 10 รอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ ค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ และอัตราปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2

ตารางที่ ค.1 การทดสอบจำนวนคำตอบเริ่มต้น

ค่า W					
ครั้งที่	จำนวนคำตอบเริ่มต้น (คำตอบ)				
	10	20	30	40	50
1	0.7883	0.7918	0.7743	0.7816	0.7864
2	0.7900	0.7906	0.7805	0.7920	0.7694
3	0.7742	0.7778	0.7726	0.7688	0.7864
4	0.7725	0.7686	0.7711	0.7868	0.7711
5	0.7716	0.7842	0.7859	0.7829	0.7771
ค่าเฉลี่ย	0.7793	0.7826	0.7769	0.7824	0.7781

การทดสอบหาค่าจำนวนคำตอบรอบข้างได้ทำการทดสอบที่ค่าเท่ากับ 10 20 30 40 และ 50 คำตอบ ดังตารางที่ ค.2 โดยกำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 10 รอบ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ ค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ และอัตราปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.2

ตารางที่ ค.2 การทดสอบจำนวนคำตอบรอบข้าง

ค่า W					
ครั้งที่	จำนวนคำตอบรอบข้าง (คำตอบ)				
	10	20	30	40	50
1	0.7644	0.7772	0.7748	0.7760	0.7741
2	0.7933	0.7624	0.7685	0.7747	0.7800
3	0.7834	0.7883	0.7714	0.7715	0.7709
4	0.7761	0.7780	0.7853	0.7654	0.7695
5	0.7654	0.7816	0.7930	0.7703	0.7735
ค่าเฉลี่ย	0.7765	0.7775	0.7786	0.7716	0.7736

การทดสอบหาค่ารัศมีการค้นหาได้ทำการทดสอบที่ค่าเท่ากับ 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ ค.3 โดยกำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 10 รอบ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ และอัตราปรับลดรัศมีการค้นหาเท่ากับ 1.2

ตารางที่ ค.3 การทดสอบค่ารัศมีการค้นหา

ค่า W					
ครั้งที่	ค่ารัศมีการค้นหา (เปอร์เซ็นต์)				
	10	20	30	40	50
1	0.7817	0.7923	0.7809	0.7802	0.7810
2	0.7813	0.7804	0.7827	0.7878	0.7834
3	0.7916	0.7758	0.7969	0.7789	0.7900
4	0.7692	0.7924	0.7860	0.7688	0.7943
5	0.7931	0.7908	0.7630	0.7779	0.7943
ค่าเฉลี่ย	0.7834	0.7863	0.7819	0.7787	0.7886

การทดสอบหาค่าอัตราปรับลดรัศมีได้ทำการทดสอบที่ค่าเท่ากับ 1.2 1.3 1.4 1.5 และ 1.6 ดังตารางที่ ค.4 โดยกำหนดให้จำนวนรอบการค้นหาเท่ากับ 10 รอบ จำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 10 คำตอบ จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 10 คำตอบ ค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ค.4 การทดสอบค่าอัตราปรับลดรัศมี

ค่า W					
ครั้งที่	ค่าอัตราปรับลดรัศมี				
	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
1	0.7957	0.7655	0.7792	0.7847	0.7836
2	0.7868	0.7722	0.7714	0.7704	0.7759
3	0.7959	0.7806	0.7712	0.7708	0.7752
4	0.7929	0.7899	0.7707	0.7985	0.7627
5	0.7821	0.7936	0.7765	0.7646	0.7734
ค่าเฉลี่ย	0.7907	0.7804	0.7738	0.7778	0.7742

จากตารางที่ ค.1-ค.4 เมื่อพิจารณาค่า W เฉลี่ยที่มีค่าน้อยที่สุดผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกใช้ค่าจำนวนคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 30 คำตอบ, จำนวนคำตอบรอบข้างเท่ากับ 40 คำตอบ, ค่ารัศมีการค้นหาเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ และค่าอัตราปรับลดรัศมีเท่ากับ 1.4



ภาคผนวก ง

โปรแกรมตัวควบคุมพีไอที่มีลูบรบทการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการวางโพล
ในบอร์ด Arduino Mega2560

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```

*****
โปรแกรมการควบคุมวงจรรูปการวางโพลด้วยชุดบอร์ด Arduino Mega2560
โดยนางสาวอลิสา  ถนอมเมือง  สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
พ.ศ. 2565
*****

% การประกาศเรียกใช้งานไฟล์ในไลบรารีของบอร์ด Arduino Mega2560

#include<avr/io.h>
#include<avr/interrupt.h>
#include<compat/deprecated.h>
% เรียกใช้งานไฟล์ในไลบรารี Keypad ของบอร์ด Arduino Mega2560
#include <Keypad.h>
const byte ROWS = 4;
const byte COLS = 4;
char keys[ROWS][COLS] = {
  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'}};
byte rowPins[ROWS] = {31, 33, 35, 37}; //{8, 7, 6, 5}
byte colPins[COLS] = {39, 41, 42, 45}; //{4, 3, 2, 1}
Keypad keypad = Keypad( makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS );
% ประกาศตัวแปรที่ใช้งานสำหรับการรับค่าแอนะล็อกเป็นดิจิตอลและส่วนอื่น ๆ
int num[5],count_num,num1,Gain,i,Vcount = 22; //Vcount = 22;
float Vset,V_o_buck=0,V_o_act,V_o,i_L_buck=0,i_L_act,i_L,V_o_buck_keep;
float i_L_buck_keep,V_o_buck_keep_old=0,co_LPF=0.68,i_L_buck_keep_old=0;
float V_dc_filter=0,V_dc_act,V_dc,i_dc_filter=0,i_dc_act,i_dc;
int Upi_max=4095,Upi_min=0;
int d,dx,signal_pp,d_control;
% เรียกใช้งานไฟล์ในไลบรารีจอแสดงผล LCD ของบอร์ด Arduino Mega2560
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

```

```

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
% ประกาศตัวแปรสำหรับลูบการนับเวลา
float period_time=0,count_timer=0.00005,tstep=0.5;
% ประกาศตัวแปรสำหรับลูบตัวควบคุมพีไอและลูบการวางโพล
float kpv=0.03, kiv=3.95,kpi=2.82,kii=2531.7,Ts=0.005;
float err_v,Upv,Uiv,Uiv_1=0,Upi_v;
float err_i,Upi,Uii,Uii_1=0,Upi_i,V,V_o1=0,I_L1=0;
float k_Idc,k_Vdc;
% กำหนดช่องสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก
int CS = 48;
int SCX= 52;
int SDI = 53;
int LDAC = 51;
int SHDN = 50;
% เข้าสู่ฟังก์ชันการตั้งค่า CPU ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อใช้งานช่องสื่อสาร DAC
void Write_MCP4922(unsigned char DAC_Chanel,unsigned int DAC_Data)
{digitalWrite(CS,LOW);
switch(DAC_Chanel) {
case 0x00:DAC_Data |=0x3000;
break;
case 0x01:DAC_Data |=0xB000;
break;
}
shiftOut(SDI,SCX,MSBFIRST,(DAC_Data>>8)&0xFF);
shiftOut(SDI,SCX,MSBFIRST,DAC_Data&0xFF);
digitalWrite(CS,HIGH);
digitalWrite(LDAC,LOW);
digitalWrite(LDAC,HIGH);
}
% เข้าสู่ฟังก์ชัน setup เพื่อตั้งค่าต่าง ๆ
void setup(){

```



```

Serial.begin(9600);
pinMode(CS,OUTPUT);
pinMode(SCX,OUTPUT);
pinMode(SDI,OUTPUT);
pinMode(LDAC,OUTPUT);
pinMode(SHDN,OUTPUT);
digitalWrite(CS,HIGH);
digitalWrite(SCX,LOW);
digitalWrite(SDI,LOW);
digitalWrite(LDAC,HIGH);
digitalWrite(SHDN,HIGH);
Write_MCP4922(0,0);
% Setup หน้าจอ LCD เพื่อรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิงสูงสุดที่ต้องการ
lcd.begin();
lcd.setCursor(1,0);
lcd.print("Please press Vo");
lcd.setCursor(1,1);
lcd.print("Vo=");
% รับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอ้างอิงสูงสุดที่ต้องการจากคีย์แพด
keypad.addEventListener(keypadEvent);
count_num=0;
i=1;
num[5]=0;
while(i!=0){ number(); }
V=num1;
lcd.clear();
% Setup หน้าจอ LCD เพื่อเลือกค่าอัตราขยายการวางโพล
lcd.begin();
lcd.setCursor(1,0);
lcd.print("Gain: 0,1,2");
lcd.setCursor(1,1);

```

```

lcd.print("K =");
% รับค่าการเลือกอัตราขยายการวางโพลที่ต้องการจากคีย์แพด
keypad.addEventListener(keypadEvent);
count_num=0;
  i=1;

num[1]=0;
while(i!=0){ number(); }
Gain=num1;
lcd.clear();
}
% ฟังก์ชันการตรวจสอบตัวเลขที่ถูกป้อนมาจาก Keypad
void number(){
  keypad.getKey();
}
void keypadEvent(KeypadEvent eKey){
  switch (keypad.getState()){
  case PRESSED:
    lcd.setCursor(5+count_num,1);
    if(eKey!='A'){lcd.print(eKey);};
    switch (eKey){
      case '1':num[count_num]=1;count_num=count_num+1;break;
      case '2':num[count_num]=2;count_num=count_num+1;break;
      case '3':num[count_num]=3;count_num=count_num+1;break;
      case '4':num[count_num]=4;count_num=count_num+1;break;
      case '5':num[count_num]=5;count_num=count_num+1;break;
      case '6':num[count_num]=6;count_num=count_num+1;break;
      case '7':num[count_num]=7;count_num=count_num+1;break;
      case '8':num[count_num]=8;count_num=count_num+1;break;
      case '9':num[count_num]=9;count_num=count_num+1;break;
      case '0':num[count_num]=0;count_num=count_num+1;break;
      case 'A':check_num();return;
    }
  }
}

```

```

} } }
void keypadEvent_stop(KeypadEvent eKey){
  switch (keypad.getState()){
    case PRESSED:
      //Serial.println(count_num);
      Serial.print(eKey);
      switch (eKey){
        case 'C':check_num();setup();
      } } }
void check_num(){
  if(count_num==0){setup();}
  if(count_num==1){num1=num[0];i=0; return;}
  if(count_num==2){num1=num[0]*10+num[1];i=0; return;}
  if(count_num==3){num1=num[0]*100+num[1]*10+num[2];i=0; return;}
  if(count_num==4){num1=num[0]*1000+num[1]*100+num[2]*10+num[3];i=0; return;}
  if(count_num>4){setup();}
}
% เข้าสู่ฟังก์ชันการทำงานลูปไม่รู้จบ
void loop() {
% อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า
V_o_buck = analogRead(A2);
V_o_act = (V_o_buck*5)/1024;
V_o = V_o_act*100+2.8;
// lcd.setCursor(1,0);
// lcd.print("Vo = ");lcd.print(float(V_o));delayMicroseconds(500);
%อ่านค่ากระแสไฟฟ้าจากวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า
I_L_buck = analogRead(A3);
I_L_act = I_L_buck*5/1024;
I_L = I_L_act*1.2+0.056; // I_L = I_L_act*1.3;
% อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าดีซีของวงจรกรองจากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า
V_dc_filter = analogRead(A0);

```

```

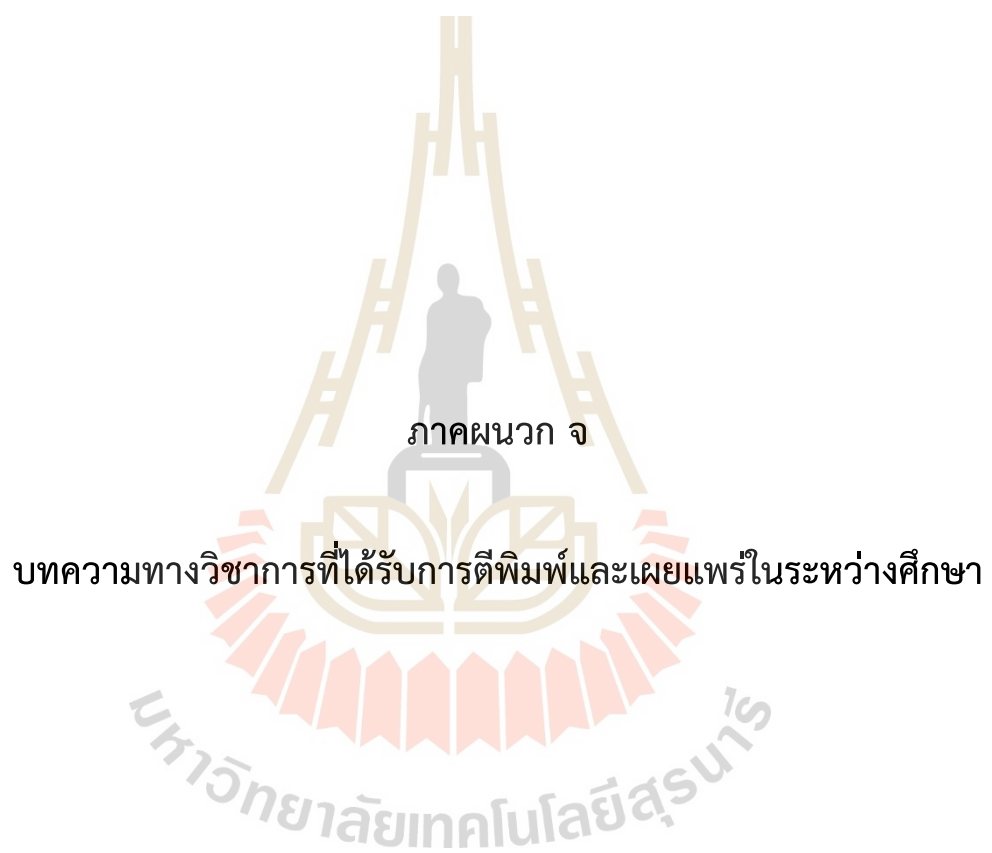
V_dc_act = (V_dc_filter*5)/1023;
V_dc = V_dc_act*30+0.44; // V_dc_act*21+0.71;
% อ่านค่ากระแสไฟฟ้าของวงจรรองจากวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า
I_dc_filter = analogRead(A1);
I_dc_act = I_dc_filter*5/1023;
I_dc = I_dc_act*2.5+0.0031;
% เข้าสู่การนับเวลาเพื่อ step ค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเพิ่มทีละ 4 V
period_time = period_time + count_timer;
if (Vcount <= V){
    if (period_time < tstep)
        {Vset = Vcount;}
    else if (period_time >= tstep)
        {Vcount = Vcount + 4; // Vcount = Vcount + 4;
        tstep = tstep + 0.5;} // tstep = tstep + 0.5;
    }
else if (Vcount > V){
    {Vset = V;}
}
% เข้าสู่กระบวนการของลูปตัวควบคุมพีไอและลูปการวางโพล
err_v = Vset-V_o;
Upv = kp_v*err_v;
Uiv = (kiv*Ts*err_v)+Uiv_1;
Upi_v = Upv+Uiv;
if (Upi_v >= Upi_max)
    {Upi_v = Upi_max;}
else if (Upi_v <= Upi_min)
    {Upi_v = Upi_min;}
err_i = Upi_v-I_L;
Upi = kpi*err_i;
Uii = (kii*Ts*err_i)+Uii_1;
Upi_i = Upi+Uii;

```

```

if (Upi_i >= Upi_max)
    {Upi_i = Upi_max;}
else if (Upi_i <= Upi_min)
    {Upi_i = Upi_min;}
dx = Upi_i;
if (Gain == 0){k_ldc = 0; k_vdc = 0;}
else if (Gain == 1){k_ldc = 1; k_vdc = -1.5;}
else if (Gain == 2){k_ldc = 10.51; k_vdc = -2.13;}
signal_pp = (k_ldc*I_dc)+(k_vdc*V_dc);
d_control = dx-signal_pp;
if (d_control >= Upi_max)
    {d_control = Upi_max;}
else if (d_control <= Upi_min)
    {d_control = Upi_min;}
d = d_control;
Write_MCP4922(0,d);
% คำสั่งรอกการกดปุ่มหยุดจาก Keypad
keypad.addEventListener(keypadEvent_stop);
keypad.getKey();
% อัปเดตค่าความผิดพลาดของตัวควบคุมพีไอ
Uiv_1 = Uiv;
Uii_1 = Uii;
}

```



ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Pakdeeto, J., Thanommuang, A., Chaicharoenudomrung, K., Areerak, K-N. and Areerak, K-L. (2021). The Effect of Parameter Variations of System Stability for AC-DC Power System Feeding Controlled Buck Converter. **2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)**. : 61-64.

จักรกริช ภัคดีโต, รัฐพล โพธิ์สังข์, อลิสา ถนอมเมือง, กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์. การระบุเอกลักษณ์ระบบสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบักก์ที่มีการควบคุมต่อขนานกันด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกรกฎาคม – กันยายน 2566.



The Effect of Parameter Variations of System Stability for AC-DC Power System Feeding Controlled Buck Converter

Jakkrit Pakdeeto¹ Alisa Thanommuang² Koson Chaicharoenudomrung³ Kongpan Areerak^{2*} and Kongpol Areerak²

¹ Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, KMUTNB

² School of Electrical Engineering, Instituted of Engineering, Suranaree University of Technology

³ Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, KMUTNB

*kongpan@sut.ac.th

Abstract— It is well-known that the constant power load (CPL) can significantly degrade the system stability. The behaviors of the controlled output power converter are similar to the CPL. Hence, the stability analysis via the mathematical model of the system having CPL is required. In this paper, the eigenvalue theorem is used to analyze the system stability via the proposed time-invariant mathematical model. However, the dynamic model of the power converter is normally to be the time-varying model due to the switching action. The switching function can be eliminated by using the DQ method combined with the generalized state space averaging approach. In this paper, the stability analysis of AC/DC power system feeding a controlled buck converter is presented. Moreover, the simulation results via SimPowerSystem[®] are used to confirm the theoretical results which are useful for the design engineer to avoid unstable scenario.

Keywords—stability analysis, mathematical model, eigenvalue theorem

I. INTRODUCTION

Nowadays, the adoption of power electronic loads has continuously increased because they are easy to maintenance and control [1]. Nevertheless, these loads regulated by the controller behave as the constant power load (CPL) [2], resulting in degraded system stability. The system components may be damaged from the unstable scenario and the performance of the system may also be decreased. To avoid the unstable operation, the eigenvalue theorem is used. The eigenvalue theorem [3] will be applied with the mathematical model in which the linear time-invariant model is required [4]. From the previous research [5-7], the DQ method is suitable for the three-phase power system and the DC/DC converters appropriate with the GSSA. Hence, this paper presents the DQ method combined with the generalized state space averaging approach (GSSA) for the mathematical model derivation. To validate the proposed model, the comparison of the responses between the derived model and the SimPowerSystem[®] is used. After the model derivation, the stability analysis by using the eigenvalue theorem is applied. However, the unstable operation dose not only occur at the same point when the system parameters are changed [8]. These parameters can be designed by the engineers in which they might be uncaredful about the unstable operation. Therefore, the effect varied parameters in the AC/DC

power system feeding a controlled buck converter in term of stability are also presented. In this paper, the instability line [9] can be created from the eigenvalue theorem when the operating points are varied. This line can predict the stable region trends of the proposed system. In addition, the simulation results are shown to confirm the trends.

This paper structured as follows: First section is the introduction and the considered system is addressed in section II. Section III will present the mathematical model. The stability analysis is explained in section IV and the parameter variations affecting the system stability is presented in section V. The details of this paper are concluded in section VI.

II. THE CONSIDERED SYSTEM

The considered system is depicted in Fig. 1 which can be divided into two parts as follows: source and load sides. For the source side, it consists of the three-phase voltage source, transmission line equivalent circuit, full-bridge diode rectifier and ripple filter circuit. The buck converter controlled by PI controller is located in the load side of the system. The behavior of controlled buck converters is similar to the CPL in which it affects the system stability significantly. Therefore, the system stability analysis is important to avoid the unstable operation. To investigate the system stability, the mathematical model of the considered system will be used and explained in the next section.

III. THE MATHEMATICAL MODEL DERIVATION

The mathematical model of the considered system is derived from the combination between the DQ and GSSA methods. For the DQ method, it is suitable for three-phase system and will be applied to the system components as follows: three-phase voltage source, equivalent circuit of transmission line, full-bridge diode rectifier. In addition, the GSSA will be also used for the remaining components. The assumptions of the considered system in Fig. 1 are operated in the continuous conductance mode (CCM) and the higher-order harmonics oscillation occurred from switching function is ignored [4]. When the PI controller of buck converter has not been considered, the switching function of S_j is the periodic signal represented by $u(t)$. This function affects that the buck converter is the time-varying model. Thus, the GSSA is applied in

2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)
October 20-22, 2021, Nakhon Ratchasima, THAILAND

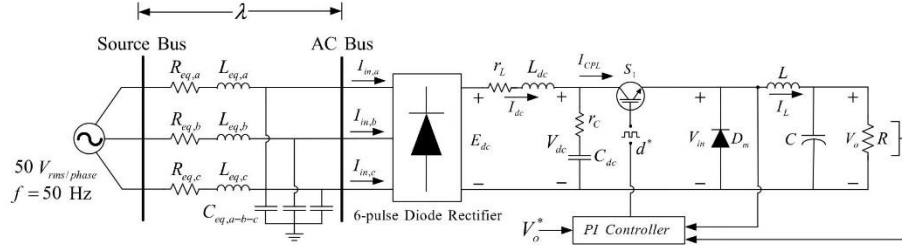


Fig. 1 The considered system.

order to eliminate the $u(t)$ function. After the zero-order of complex Fourier series is used in the GSSA, the $u(t)$ is equal to the duty cycle (d) of the buck converter [10]. However, this converter must have the PI controller in order to regulate the output voltage in which the control signal of PI controller can be calculated in (1) [11].

$$d^* = \frac{1}{A_v} (-K_{pi} I_L - K_{pv} V_o + K_{iv} K_{pi} X_v + K_{ii} X_i + K_{pi} K_{pv} V_o^*) \quad (1)$$

As for the buck converter controlled by PI controller, the d will be set equal to d^* . After the DQ and GSSA methods are applied, the time-invariant dynamic model of the proposed system can be shown in (2). This model is nonlinear in which it is complicated to analyze the system stability. Thus, the first-order Taylor's series expansion is applied to achieve the linear model as shown in (3). The values of the Jacobean matrices (A, B, C, and D) depend on the operating point of the system in any condition.

$$\begin{cases} \dot{I}_{d1} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{d1} + \omega I_{d2} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{d2} = -\omega I_{d1} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{d2} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{d1} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\ \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{d2} - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_L + r_c + r_o)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c K_{pi}}{A_i L_{dc}} I_L^2 \\ - \frac{r_c K_{pi} K_{pv}}{A_i L_{dc}} I_L V_o + \frac{r_c K_{pi} K_{pv}}{A_i L_{dc}} I_L X_v + \frac{r_c K_{ii}}{A_i L_{dc}} I_L X_i + \frac{r_c K_{pi} K_{pv}}{A_i L_{dc}} I_L V_o^* \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{C_{dc}} d' I_L \\ \dot{I}_L = -\frac{K_{pv}}{A_L} V_o I_L - \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_L} V_o V_o - \frac{1}{L} V_o + \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_L} V_{dc} X_v \\ + \frac{K_{ii}}{A_L} V_{dc} X_i + \frac{K_{pv} K_{pi}}{A_L} V_{dc} V_o^* \\ \dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\ \dot{X}_v = -V_o + V_o^* \\ \dot{X}_i = -I_L - K_{pi} V_o + K_{iv} X_v + K_{ii} V_o^* \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \delta \dot{x} = A(x_0, u_0) \delta x + B(x_0, u_0) \delta u \\ \delta \dot{y} = C(x_0, u_0) \delta x + D(x_0, u_0) \delta u \end{cases} \quad (3)$$

To confirm the model in equation (3), the responses from the exact topological model by using SimPowerSystem® are used in order to compare with the proposed model responses. The system parameters are set as follows: $V_s = 50V_{rms/phase}$, $R_{eq} = 0.1 \Omega$, $L_{eq} = 24mH$, $C_{eq} = 2nF$, $r_L = 0.01 \Omega$, $L_{dc} = 30mH$, $r_c = 0.4 \Omega$, $C_{dc} = 1000 \mu F$, $L (\Delta I_L \leq 0.2A) = 15 mH$, $C (\Delta V_o \leq 2.8 mV) = 1000 \mu F$, $R = 20 \Omega$, $K_{pv} = 0.0757$, $K_{iv} = 3.9478$, $K_{pi} = 2.2564$, $K_{ii} = 2025.3$, $A_v = 10$. The model validation can be illustrated in Fig. 2.

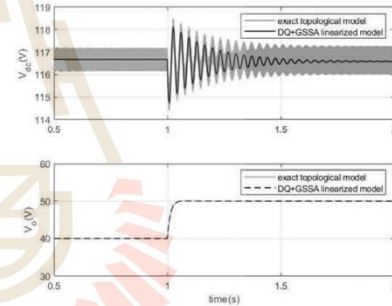


Fig. 2 The result of dynamic model validation.

In Fig. 2, the output from the buck converter is changed from 40V to 50V at $t=1s$. The results show that the responses from the proposed model are nearly the same as the exact topological model. Therefore, the model derived from the DQ and GSSA methods is correct and it can be used for the stability analysis described in the section IV.

IV. THE STABILITY ANALYSIS.

In this paper, the stability analysis is used to predict the unstable point of the system via the eigenvalue theorem in which this theorem is suitable for the linear time-invariant model. The eigenvalues of the system at any scenarios can be calculated from the matrix $A(x_0, u_0)$ as shown in (4) [12].

$$\det[\lambda I - A] = 0 \quad (4)$$

From equation (4), the system is stable if $\text{Re}\{\lambda_i\} < 0$ where $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (n = the number of state variables). For the stability analysis, the system

2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)
October 20-22, 2021, Nakhon Ratchasima, THAILAND

will be unstable if the dominant poles are located at the right-hand side (RHS) of the s-plane. Therefore, only dominant poles are used. The dominant poles of the system when the output voltage of V_o is varied can be shown in Fig. 3.

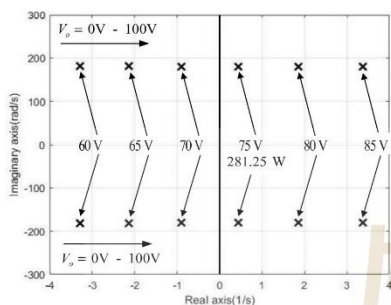


Fig. 3 The system stability analysis.

It can be seen that the system will be unstable when the V_o is changed from 70V to 75V (281.25W). To confirm the analytical process, the simulation via SimPowerSystem® in MATLAB is depicted in Fig. 4.

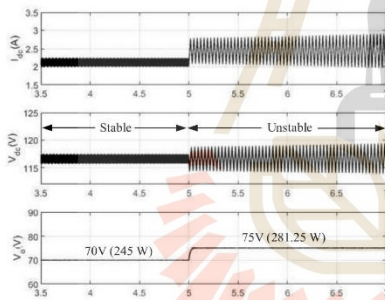


Fig. 4 The simulation result for stability analysis.

The result in Fig. 4 shows that V_o is changed from 70V (245W) to 75V (281.25W), resulting in occurred the huge oscillation of V_{dc} . This oscillation confirms that the system is operated at the unstable condition. Hence, the proposed model can provide the correct system stability analysis by using the eigenvalue theorem. However, the system stability does not only depend on V_o but it might be also affected from the other system parameters. Therefore, the parameter variations affecting the system stability will describe in the next section.

V. THE PARAMETER VARIATIONS

From the previous sections, the linear time-invariant model and the stability analysis are explained in which their results are confirmed. In this section, details of the parameter variations to affect the system stability are addressed. The instability line can be created from the eigenvalue theorem when the

operating points are varied. In addition, this line can show the stability trend that the system is more or less stable operation. As for the considered system, the L_{dc} and C_{dc} are the ripple filter parameters from the rectifier circuit output in which the inductance and capacitance values of buck converter are represented by L and C , respectively. In addition, the bandwidth values of voltage loop (ω_m) and current loop (ω_{cl}) are used to design the PI controller of buck converter. However, the parameters of transmission line equivalent circuit cannot be designed by the engineer. Thus, only six parameters designed from the engineer might affect the system stability in the considered system as shown as follows: L_{dc} , C_{dc} , L , C , ω_m and ω_{cl} . The whole parameters are designed by the engineer satisfaction. However, the system might be unstable because some values are too high. Therefore, the stability analysis via instability line is used for the parameter variations. The instability line of six parameter variations and the simulation results can be illustrated in Fig. 5 to 10.

The results can be clearly shown that there are only two parameters affecting the system stability. The system operation will be less stable in case of increasing L_{dc} . On the other hand, in case of increasing C_{dc} , the system will be more stable operation. In addition, the remaining parameters do not affect the system stability. As for the simulation results on the right-hand side in Fig. 5 to 10, there are three points of each instability line in which the simulation results are used to validate the theoretical results. It is obviously shown that the system will be the diverged huge oscillation when the power of the buck converter is more than the stable region, resulting in an operating unstable point. The information is helpful to design the system for engineers.

VI. CONCLUSION

This paper presents the parameter variations effect on the system stability in which the AC-DC power system feeding a controlled buck converter is proposed. In addition, the mathematical model and the stability analysis of the considered are presented. The simulation results via SimPowerSystem® are used to ensure the proposed model and the stability analysis. However, the parameters of the system can be designed by the engineer in which some values of them can affect to change the unstable point. From the results, the significant parameters affecting the system stability are only L_{dc} and C_{dc} of the ripple filter circuit whereas other parameters do not affect. The system will be unstable operation more rapidly in case of increasing L_{dc} , but the system will be more stable because of increasing C_{dc} . This paper can be used for the designing engineer cautions because both L_{dc} and C_{dc} can be increased to provide the minimum of ripple current and voltage. The engineer should concern this effect to ensure that the system can be operated without the occurring unstable operation.

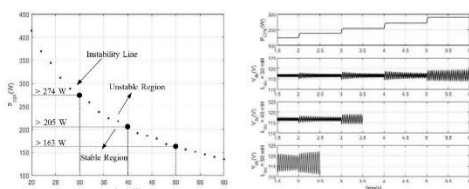


Fig. 5 instability line for different value of L_{dc} and simulation result.

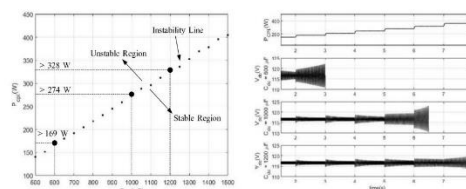


Fig. 6 instability line for different value of C_{dc} and simulation result.

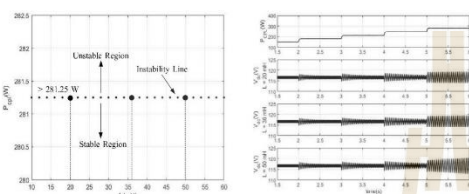


Fig. 7 instability line for different value of L and simulation result.

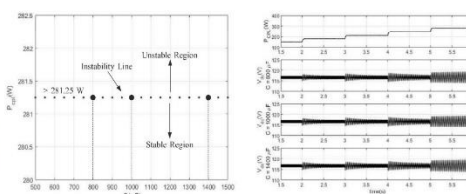


Fig. 8 instability line for different value of C and simulation result.

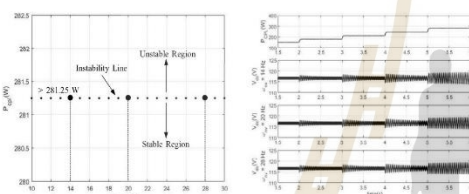


Fig. 9 instability line for different value of ω_{dv} and simulation result.

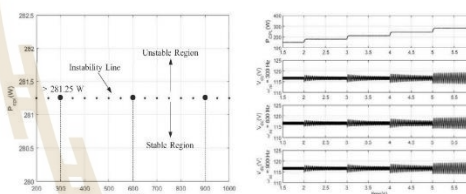


Fig. 10 instability line for different value of ω_{dt} and simulation result.

REFERENCES

- [1] D. Boroyevich, I. Cvetkovic, D. Dong, R. Burgos, F. Wang, and F. Lee, "Future electronic power distribution systems a contemplative view," in *2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, 2010, pp. 1369-1380.
- [2] K. Areerak, T. Sopapirm, S. Bozhko, C. I. Hill, A. Suyapan, and K. Areerak, "Adaptive Stabilization of Uncontrolled Rectifier Based AC-DC Power Systems Feeding Constant Power Loads," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 10, pp. 8927-8935, 2018.
- [3] J. Pakdeeto, K. Areerak, and K. Areerak, "The Stability Analysis of DC Micro-Grid System with PV Array," in *2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2018, pp. 1-4.
- [4] J. Pakdeeto, K.-N. Areerak, and K.-L. Areerak, "Modelling and Stability Analysis of AC-DC Power Systems Feeding a Speed Controlled DC Motor," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 1566-1577, 2018.
- [5] K. Areerak, S. V. Bozhko, G. M. Asher, L. D. Lillo, and D. W. P. Thomas, "Stability Study for a Hybrid AC-DC More-Electric Aircraft Power System," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 1, pp. 329-347, 2012.
- [6] A. Emadi, "Modelling and analysis of multi-converter DC power electronic systems using the generalized state space averaging method," in *Industrial Electronics Society, 2001. IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE*, 2001, vol. 2, pp. 1001-1007 vol.2.
- [7] K. Areerak, T. Wu, S. V. Bozhko, G. M. Asher, and D. W. P. Thomas, "Aircraft Power System Stability Study Including Effect of Voltage Control and Actuators Dynamic," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 47, no. 4, pp. 2574-2589, 2011.
- [8] K. Areerak, S. V. Bozhko, G. M. Asher, and D. W. P. Thomas, "DQ-transformation approach for modelling and stability analysis of AC-DC power system with controlled PWM rectifier and constant power loads," in *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2008, pp. 2049-2054.
- [9] A. Emadi, A. Khaligh, C. H. Rivetta, and G. A. Williamson, "Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 4, pp. 1112-1125, 2006.
- [10] J. Mahdavi, A. Emaadi, M. D. Bellar, and M. Ehsani, "Analysis of power electronic converters using the generalized state-space averaging approach," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 44, no. 8, pp. 767-770, 1997.
- [11] J. Pakdeeto, R. Chanpittayagit, K. Areerak, and K. Areerak, "The Optimal Controller Design of Buck-Boost Converter by using Adaptive Tabu Search Algorithm Based on State-Space Averaging Model," (in En), *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. Volume 12, no. 3, pp. 1146-1155, 05/01 2017.
- [12] K. Areerak et al., "The stability analysis of AC-DC systems including actuator dynamics for aircraft power systems," in *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2009, pp. 1-10.



ที่ อว 0604.8.1.3/1539

คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
เลขที่ 85 ถ.สกลมารค์
ต.เมืองศรีโค อ.วารินชำราบ
จ.อุบลราชธานี 34190

14 กันยายน 2565

เรื่อง ตอบรับบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

เรียน คุณกองพัน อารีรักษ์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัย เรื่อง “การระบุเอกลักษณ์ระบบสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบักที่มีการควบคุมต่อขนานกันด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์” โดยมีผู้เขียนร่วม คือ จักรกริช ภัคดีโต (ชื่อแรก), รัฐพล โพธิ์สังข์, อลิสา งามอมเมือง และ กองพล อารีรักษ์ เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ตามความทราบนั้น

บัดนี้ บทความดังกล่าวของท่าน ได้ผ่านการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว และกองบรรณาธิการ ได้พิจารณาเห็นชอบในการนำบทความของท่าน เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกรกฎาคม - กันยายน 2566 ประเภท บทความวิจัย และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ท่านจะให้ความสนใจในการส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ ในวารสารฯ ในโอกาสต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)

บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

สำนักงานกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
โทร. 045 -353319 อีเมลอิเล็กทรอนิกส์ : engj_assistant@ubu.ac.th



บทความวิจัย

การระบุเอกลักษณ์ระบบสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มี
โหลดวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคที่มีการควบคุมต่อขนานกันด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์
Identification for stability analysis of three-phase bridge rectifier feeding the
parallel controlled buck converters by artificial intelligence techniques

จักรกริช ภัคดีโต¹ รัฐพล โพธิ์สังข์² อลิสา ถนอมเมือง² กองพัน อารีรักษ์^{2*} กองพล อารีรักษ์²

¹ ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10800

² สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

Jakkrit Pakdeeto¹ Ratapon Phosung² Alisa Thanommuang² Kongpan Areerak^{2*} Kongpol Areerak²

¹ Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, KMUTNB Bangkok 10800

² School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima 30000

* Corresponding author.

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

บทคัดย่อ

วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานด้านวิศวกรรม บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์จำนวน 3 วิธี ได้แก่ วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม วิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค และวิธีการค้นหาแบบตาบุงเชิงปรับตัว มาประยุกต์ใช้เพื่อระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ที่ถูกต้องในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมขนานกัน เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อทราบถึงจุดการทำงานของระบบที่เกิดการขาดเสถียร อย่างไรก็ตามไม่เพียงแต่พฤติกรรมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเท่านั้นแต่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบก็ยังส่งผลกระทบต่อจุดเกิดการขาดเสถียรภาพของระบบด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์บางตัวไม่สามารถวัดค่าด้วยเครื่องมือวัดได้โดยตรง ดังนั้นบทความนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาใช้สำหรับค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ให้ผลการตอบสนองของระบบได้อย่างถูกต้อง หลังจากนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อคาดการณ์จุดเกิดการขาดเสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการทดสอบด้วยชุดทดสอบ

คำสำคัญ

การระบุเอกลักษณ์แบบจำลอง วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพ

Abstract

Artificial intelligent techniques are very popular in engineering works. This paper presents three techniques as follows: genetic algorithm, particle swarm optimization and adaptive tabu search to identify the accurate parameters in the mathematical model of AC-DC power system feeding the parallel controlled buck converters. The controlled power converters behave as the constant power loads in which they can significantly degrade the system stability. Hence, the stability analysis is necessary to predict the unstable point of the system. However, it is not only the behaviors of the controlled power converters but the parameters of the system also affect the system stability. Some parameters cannot be measured by the instrument directly. Therefore, the artificial intelligent techniques will be used to search the parameter values that correctly represent the system response. After these parameters are achieved, the dynamic model with accurate parameters will be used for the stability analysis by the eigenvalue theorem via the mathematical model. The stability analysis verification will be confirmed by the simulation and experimental results.

Keywords

model identification; artificial intelligent; mathematical model; stability analysis

1. บทนำ

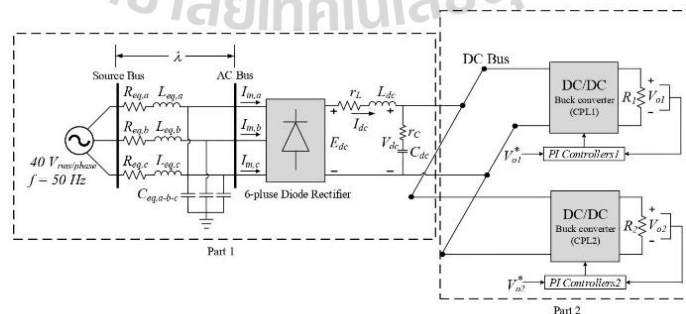
ปัจจุบันวงจรแปลงผันกำลังได้ถูกนำมาใช้กับระบบต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง อาทิเช่น ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน ระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก และระบบรางไฟฟ้า เป็นต้น โดยทั่วไปโหลดของระบบดังกล่าวมักจะมีช่วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมซึ่งจะเชื่อมต่อกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ จากงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันพบว่า โหลดวงจรแปลงผันดังกล่าวมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว [1-2] ซึ่งจะมีลักษณะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ สามารถลดทอนค่าความต้านทานของวงจรกรองได้ ส่งผลให้เกิดการกระเพื่อมของรูปสัญญาณที่เอาต์พุตของวงจรกรอง หรือกล่าวได้ว่าทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดการขาดเสถียรภาพ [3-4] จากสาเหตุดังกล่าวมีการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงมีความสำคัญ เพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานของระบบ ณ จุดที่ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยทั่วไปการ

วิเคราะห์เสถียรภาพจะถูกจำแนกออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีที่ 1 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นเป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน ยกตัวอย่างเช่น ทฤษฎีบทค่าเจาะจง [5-11] และเกณฑ์ของมิตเติลบลูร์ค [12] เป็นต้น แต่วิธีดังกล่าวจะมีข้อจำกัดคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพจะมีความถูกต้องในช่วงการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานแคบๆเท่านั้น นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น วิธีที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยตรง ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ระนาบเฟส [10] และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ [13] เป็นต้น แต่วิธีนี้จะมีข้อจำกัดคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพจะมีความยุ่งยาก หรือไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพได้หากระบบมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ดังนั้นในบทความนี้จึงได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเป็นเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายและสามารถพิจารณาแนวโน้มการขาดเสถียรภาพได้อย่างชัดเจน แต่ถึงอย่างไรก็ตาม

การวิเคราะห์เสถียรภาพจำเป็นอาศัยค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของระบบเพื่อทำให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากที่สุด ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่สามารถวัดค่าได้อย่างง่าย เช่น ค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ เป็นต้น และอีกกลุ่มหนึ่งคือค่าพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถวัดค่าได้จากเครื่องมือวัด เช่น ค่าความจุไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโพลตรงแปลงผันแบบบัพัคที่มีการควบคุมต่อขนานกันโดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งมีอยู่หลากหลายวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เช่น วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm, GA) [14] วิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization, PSO) [15] วิธีการค้นหาแบบตาบุงเชิงปรับตัว (adaptive tabu search, ATS) [11,16-18] อัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งเทียม [19] วิธีการค้นหาค่าตอบแบบอาณานิคมมด [20] เป็นต้น สำหรับในบทความนี้ได้เลือกใช้วิธี GA วิธี PSO และวิธี ATS มาพิจารณาค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลาที่ได้จากวิธีตีคว [5,7] เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวสามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับกรจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป [15], [17] การตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ที่ได้

จะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และชุดทดสอบจริง ซึ่งจะต้องแสดงให้เห็นว่ากระบวนการระบุเอกลักษณ์ที่นำเสนอในบทความนี้ สามารถระบุค่าพารามิเตอร์ของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธี GA วิธี PSO และวิธี ATS สามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพได้ในจุดปฏิบัติงานเดียวกัน รวมทั้งมีความถูกต้องแม่นยำ แม้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการทั้ง 3 จะมีค่าที่แตกต่างกัน

บทความนี้ประกอบด้วย 7 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 เป็นบทนำ ส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่ 3 ได้กล่าวถึงระบบที่จะใช้ในการพิจารณาค้นหาพารามิเตอร์ที่แท้จริงและชุดทดสอบ สำหรับหลักการค้นหาของวิธี GA วิธี PSO และวิธี ATS จะได้รับการอธิบายไว้ในส่วนที่ 4 ลำดับถัดมาส่วนที่ 5 เป็นการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ในส่วนที่ 6 ยังได้ดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา พร้อมทั้งยืนยันผลการวิเคราะห์ที่โดยอาศัยผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ร่วมกับผลจากชุดทดสอบจริง ในลำดับสุดท้าย ส่วนที่ 7 เป็นการสรุปและอภิปรายข้อดีของวิธีการที่ได้นำเสนอในบทความนี้



รูปที่ 1 ระบบส่งไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโพลตรงแปลงผันแบบบัพัคขนานกัน

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

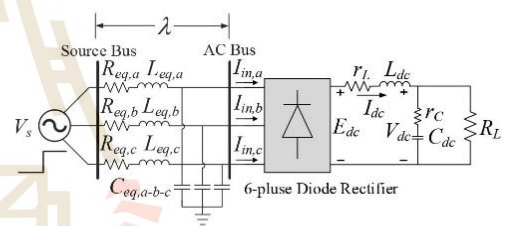
ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า สามารถพิจารณาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นวงจรทางฝั่งแหล่งจ่ายประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูล สายส่งกำลังทางฝั่งเอซี (R_{eq}, L_{eq}, C_{eq}) และวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับวงจรกรองสัญญาณดีซี (r_C, C_{dc}, r_L, L_{dc}) โดยค่าพารามิเตอร์ในสายส่งและวงจรกรองดังกล่าวจะทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดได้ยากในทางปฏิบัติ อีกทั้งยังส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง [4], [21] ดังนั้นในบทความนี้จึงได้นำส่วนที่ 1 ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเข้ามาสู่กระบวนการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อถัดไป สำหรับในส่วนที่ 2 เป็นวงจรทางฝั่งโหลดจะประกอบด้วย วงจรแปลงผันแบบบับค้กที่มีการควบคุมขนาดกัน โดยค่าพารามิเตอร์ในวงจรแปลงผันแบบบับค้กและตัวควบคุมจะไม่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพ [22] ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะนำระบบไฟฟ้าในส่วนที่ 2 มาใช้สำหรับการระบุเอกลักษณ์ แต่อย่างไรก็ตาม โหลดวงจรแปลงผันแบบบับค้กเมื่อมีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่สามารถลดทอนเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้โดยตรง [1-4] ดังนั้นในหัวข้อที่ 6 จะได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นลำดับถัดไป

3. ระบบที่ใช้พิจารณาค้นหาค่าพารามิเตอร์

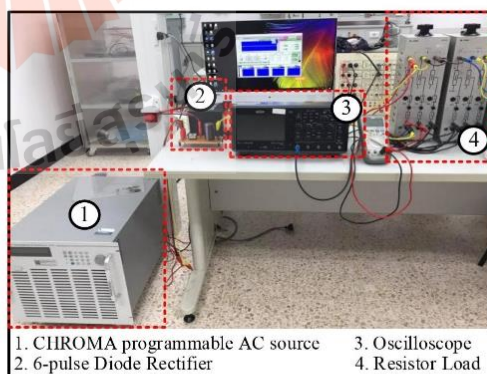
จากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรทางฝั่งแหล่งจ่ายในรูปที่ 1 (ส่วนที่ 1) จะมีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า $R_{eq}, L_{eq}, r_L, L_{dc}, r_C$ และ C_{dc} ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ในวงจรทางฝั่งโหลดจะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพแต่อย่างใด ดังนั้นระบบที่ใช้สำหรับการพิจารณาค้นหาค่าพารามิเตอร์ในบทความนี้จะนำตัวต้านทาน (R_L) มาเป็นโหลดของวงจรทางฝั่งแหล่งจ่ายแทน

วงจรแปลงผันแบบบับค้กที่มีการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2 และสามารถแสดงชุดทดสอบจริงของระบบดังกล่าวได้ดังรูปที่ 3

พิจารณาจากรูปที่ 2 และ 3 สามารถแบ่งการค้นหาค่าออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนที่ 1 จะเป็นการค้นหาค่า r_L และ L_{dc} โดยอาศัยการวัดค่าจากชุดทดสอบจริงด้วยเครื่องมือวัด LCR METER ซึ่งมีค่าเท่ากับ 39.0002 mH และ 0.5280 Ω ตามลำดับ ในส่วนที่ 2 จะดำเนินการค้นหาค่า R_{eq}, L_{eq}, r_C และ C_{dc} โดยใช้การระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งจะได้รับการนำเสนออย่างละเอียดในหัวข้อที่ 5 ต่อไป สำหรับค่า C_{eq} ในทางปฏิบัติถือว่าค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณาค่าในกระบวนการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2 nF



รูปที่ 2 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นตัวต้านทาน



รูปที่ 3 ชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2

4. วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์

สำหรับในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอหลักการค้นหาของวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ในกระบวนการระบุเอกลักษณ์ ซึ่งจะประกอบด้วย วิธี GA วิธี PSO และวิธี ATS โดยจะสรุปเป็นขั้นตอนเพื่ออธิบายหลักการค้นหาไว้พอสังเขปเท่านั้น

4.1 วิธี GA

วิธี GA เป็นอัลกอริทึมที่อาศัยแนวคิดการวิวัฒนาการทางสายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตเพื่อความอยู่รอดในระบบชีววิทยาทำการจำลองอยู่บนคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในกระบวนการค้นหาคำตอบของปัญหาที่ต้องการค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการค้นหาได้ดังนี้ [14]

ขั้นที่ 1 กำหนดจำนวนรอบของการค้นหา (*Generation*) และจำนวนรุ่น ประชากรสูงสุดของการค้นหา (*Generation_{max}*)

ขั้นที่ 2 สร้างประชากรเริ่มต้นจำนวน *m* โครโมโซม และกำหนดให้ *C_i* เป็นโครโมโซมตัวที่ 1 ถึง *m*

ขั้นที่ 3 ประเมินค่าความเหมาะสมของ *C_i* ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (*ε*) แล้วส่งค่ากลับให้ระบบการค้นหาแบบ GA

ขั้นที่ 4 ทำการคัดเลือกโครโมโซมเพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ให้กับรุ่นประชากรถัดไป

ขั้นที่ 5 นำต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ได้จากขั้นที่ 4 มาเข้ากระบวนการปฏิบัติการทางสายพันธุ์ เพื่อให้ได้ประชากรลูกหลานที่ดีขึ้น พร้อมทั้งประเมินค่าความเหมาะสมด้วย *ε*

ขั้นที่ 6 แทนที่ประชากรรุ่นเดิมด้วยประชากรลูกหลาน

ขั้นที่ 7 ถ้า *Generation > Generation_{max}* ให้หยุดการค้นหา โดยโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่สุดจะเป็นคำตอบของระบบการค้นหา มิฉะนั้นแล้วให้กลับไปขั้นที่ 4 ใหม่

4.2 วิธี PSO

วิธี PSO เป็นอัลกอริทึมการค้นหาเชิงประชากรโดยมีอนุภาคย่อย ๆ จำนวน *n* อนุภาค รวมกลุ่มกันเคลื่อนที่ไปใน

ปริภูมิการค้นหา เพื่อค้นหาคำตอบที่ต้องการ โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคจะแปรเปลี่ยนไปตามข้อมูลการค้นหาที่ผ่านมาของอนุภาคนั้น ๆ และข้อมูลการค้นหาจากอนุภาคที่พบคำตอบที่ดีที่สุดภายในกลุ่ม สำหรับขั้นตอนการค้นหาสามารถสรุปได้ดังนี้ [15]

ขั้นที่ 1 กำหนดจำนวนรอบของการค้นหา (*Count*) และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา (*Count_{max}*)

ขั้นที่ 2 ทำการสุ่มค่าเวกเตอร์ตำแหน่ง (*P_j*) และเวกเตอร์ความเร็ว (*V_j*) ของอนุภาคตัวที่ 1 ถึง *n*

ขั้นที่ 3 ทำการประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละอนุภาคด้วย *ε* ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี **กรณีที่ 1** ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใดมีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาค หรือค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง (*gbest*) จะกำหนดให้ *gbest = f(P_j)* และ *P_{gbest} = P_j*

กรณีที่ 2 ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคใดมีค่าดีกว่าค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของอนุภาคตัวเดียวกัน (*pbest*) ที่เคยพบมาก่อน จะกำหนดให้ *pbest = f(P_j)* และ *P_{pbest,j} = P_j*

ขั้นที่ 4 ทำการปรับค่าความเร็วของอนุภาคด้วยสมการที่ (1)

$$\vec{V}_j(\text{new}) = \vec{V}_j(\text{old}) + \rho_p (\vec{P}_{pbest,j} - \vec{P}_j(\text{old})) + \rho_g (\vec{P}_{gbest,j} - \vec{P}_j(\text{old})) \quad (1)$$

โดยที่ *C_p* คือ ค่าคงที่ความเร่งขององค์ประกอบเชิงปริมาตร *C_g* คือ ค่าคงที่ความเร่งขององค์ประกอบทางสังคม *ρ_p* คือ ตัวประกอบแบบสุ่มขององค์ประกอบเชิงปริมาตร และ *ρ_g* คือ ตัวประกอบแบบสุ่มขององค์ประกอบทางสังคม

ขั้นที่ 5 ทำการปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคสำหรับรอบการค้นหาต่อไปโดยใช้สมการที่ (2)

$$\vec{P}_i(\text{new}) = \vec{P}_i(\text{old}) + \vec{V}_i(\text{new}) \quad (2)$$

ขั้นที่ 6 ถ้า $Count > Count_{max}$ ให้หยุดการค้นหา โดยคำตอบที่ดีที่สุดแบบ $gbest$ จะเป็นคำตอบของระบบการค้นหา มิฉะนั้นแล้วให้กลับไปขั้นที่ 3 ใหม่

4.3 วิธี ATS

วิธี ATS เป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบ โดยทำการเพิ่มกลไกการเดินย้อนรอยและการปรับลดค่ารัศมี เพื่อแก้ปัญหาการติดอยู่ในคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่นและเพิ่มสมรรถนะในการค้นหา [11,16] ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการค้นหาได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดพื้นที่การค้นหา รัศมีการค้นหา ($radius$) จำนวนรอบของการค้นหา ($Round$) และจำนวนรอบสูงสุดของการค้นหา ($Round_{max}$)

ขั้นที่ 2 ทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น (S_0) ภายใต้อพื้นที่การค้นหา และให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น

ขั้นที่ 3 ทำการสุ่มเลือกคำตอบจำนวน N คำตอบรอบ ๆ S_0 ภายใต้อพื้นที่รัศมีการค้นหา R และกำหนดให้เซต $S(R)$ เป็นเซตของคำตอบ N คำตอบ

ขั้นที่ 4 ทำการประเมินคำตอบของแต่ละสมาชิกใน $S(R)$ ด้วย ε โดยกำหนดให้ S_1 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดใต้อ $S(R)$

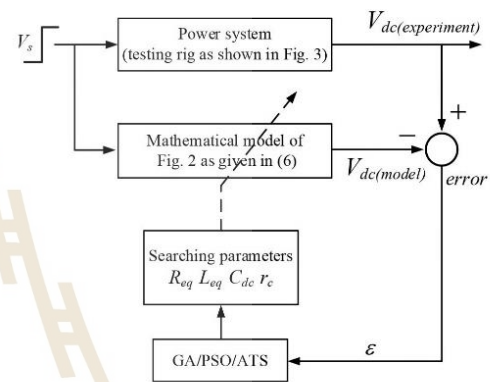
ขั้นที่ 5 ถ้า $S_1 < S_0$ จะกำหนดให้ $S_0 = S_1$

ขั้นที่ 6 ถ้า $Round < Round_{max}$ จะหยุดกระบวนการค้นหา โดยที่ค่า S_0 คือ คำตอบที่ดีที่สุดไม่เช่นนั้นจะกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 หลังจากนั้นกลไกการเดินย้อนรอยจะถูกใช้เพื่อให้หลุดออกจากคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น พร้อมทั้งดำเนินการปรับลดค่า $radius$ ลงเรื่อย ๆ ด้วยอัตราการปรับลดรัศมี DF ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (3) ซึ่งจะเรียกกลไกนี้ว่า “กลไกการปรับลดค่ารัศมี”

$$radius_{new} = \frac{radius_{old}}{DF} \quad (3)$$

5. การระบุเอกลักษณ์ของวิธี GA วิธี PSO และวิธี ATS

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางประดิษฐ์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2 จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ ผลการตอบสนองจากชุดทดสอบจริง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และอัลกอริทึมการค้นหาด้วยวิธี GA, PSO และ ATS ดังแสดงได้ในโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมของรูปที่ 4



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการค้นหาพารามิเตอร์

พิจารณาจากรูปที่ 4 สามารถแสดงขั้นตอนในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่แท้จริงของระบบได้ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 ทำงานการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต (V_s) ทั้งหมด 2 ย่านการทำงานคือ V_s เปลี่ยนแปลงจาก $30 V_{rms}$ เป็น $40 V_{rms}$ และจาก $45 V_{rms}$ เป็น $55 V_{rms}$

ขั้นที่ 2 นำผลตอบสนองแรงดันเอาต์พุตดีซีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ($V_{dc(model)}$) มาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองแรงดันเอาต์พุตดีซีของชุดทดสอบ ($V_{dc(experiment)}$) เพื่อคำนวณหาค่าความผิดพลาดแบบอาร์เอ็มเอสของแต่ละข้อมูล (W_x) ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$W_x = \sqrt{\frac{\sum error^2}{n_d}} \quad (4)$$

โดยที่ $error = |V_{dc(experiment)} - V_{dc(model)}|$, n_d คือ จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด และ x มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 2 เพื่อพิจารณาบล็อกโคแกรมของระบบค่า W_1 และ W_2 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากข้อมูลชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ตามลำดับ บทความนี้จะใช้ค่าวัตถุประสงค์ (ε) ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณค่า ε ได้จากการนำค่า W_1 และ W_2 มาหาค่าเฉลี่ยตามจำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการค้นหา (β) ซึ่งมีทั้งหมด 2 ชุด ดังแสดงได้ในสมการที่ (5)

$$\varepsilon = \sum_{x=1}^{\beta} \frac{W_x}{\beta} \quad (5)$$

ขั้นที่ 3 นำค่า ε ส่งให้อัลกอริทึมการค้นหา GA PSO และ ATS ทำการค้นหา R_{eq} , L_{eq} , r_c และ C_{dc} จนกระทั่งได้ค่า ε ที่น้อยที่สุด โดยจะกำหนดให้ขอบเขตการค้นหา R_{eq} , L_{eq} , r_c และ C_{dc} มีค่าเท่ากับ $[0.01 \Omega, 0.1 \Omega]$, $[100 \mu H, 300 \mu H]$, $[800 \mu F, 1500 \mu F]$ และ $[0.1 \Omega, 4 \Omega]$ ตามลำดับ

จากการระบุเอกลักษณ์ข้างต้น จำเป็นต้องอาศัยผลตอบสนอง $V_{dc(model)}$ ที่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้คำนวณหาค่า ε ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปแบบจำลองของวงจรแปลงผันกำลังจะเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาอันเนื่องมาจากผลการสวิตซ์ในวงจร [5-11,15,17] ซึ่งจะทำให้การประมวลผลเกิดความล่าช้า ดังนั้นบทความนี้จะได้นำวิธีตีคิว [5], [7] มาใช้พิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2 ซึ่งจะช่วยให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงได้ในสมการที่ (6)

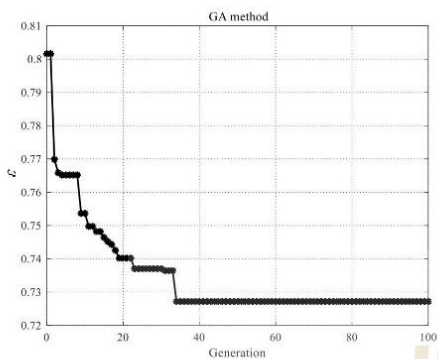
การใช้อัลกอริทึม GA PSO และ ATS ในการค้นหา R_{eq} , L_{eq} , r_c และ C_{dc} ในบทความนี้จะดำเนินการค้นหาค่าพารามิเตอร์ 5 ครั้ง ครั้งละ 100 รอบ การพิจารณาหา

ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจะใช้เพียง 1 ชุดคำตอบผ่านเงื่อนไขค่า ε น้อยที่สุดของแต่ละวิธี โดยกำหนดให้ขอบเขตการค้นหา R_{eq} , L_{eq} , r_c และ C_{dc} อยู่ในช่วง $[0.01, 0.1]$, $[1 \times 10^{-4}, 3 \times 10^{-4}]$, $[0.1, 4]$ และ $[8 \times 10^{-4}, 15 \times 10^{-4}]$ ตามลำดับ สำหรับขอบเขตดังกล่าวได้มาจากการทดลองสุ่มหาค่าตอบ ซึ่งค่าคำตอบที่ได้ต้องไม่ชนกับขอบเขตบนหรือขอบเขตล่างที่กำหนดไว้ หากค่าคำตอบที่ได้ชนกับขอบเขตบนหรือขอบเขตล่าง จะต้องกำหนดขอบเขตของคำตอบใหม่ ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในบทความนี้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 นอกจากนี้ผลการเข้าสู่คำตอบของแต่ละวิธีแสดงได้ดังรูปที่ 5 ถึง 7

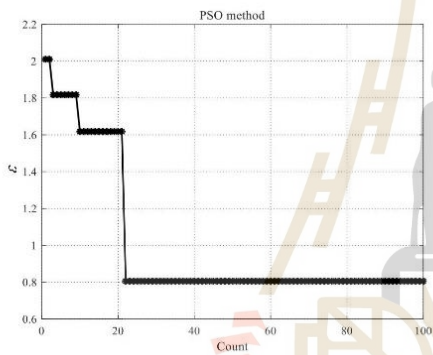
$$\begin{cases} \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\ \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\ \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega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

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจากวิธี GA, PSO และ ATS

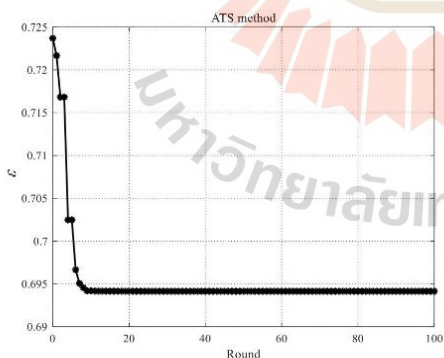
วิธี	ค่าพารามิเตอร์					เวลาเฉลี่ย (วินาที)
	R_{eq} (Ω)	L_{eq} (μH)	C_{dc} (μF)	r_c (Ω)	ε	
GA	0.0324	143.59	1258.02	0.5871	0.7271	181.1548
PSO	0.0665	149.91	1220.73	0.5912	0.8058	521.6432
ATS	0.0765	121.37	1276.31	0.5530	0.6941	439.2930



รูปที่ 5 การลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธี GA



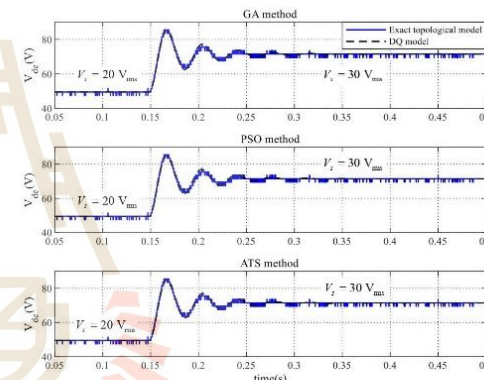
รูปที่ 6 การลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธี PSO



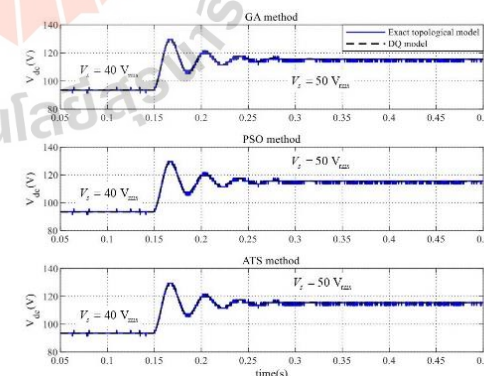
รูปที่ 7 การลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธี ATS

จากผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 1 พบว่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการค้นหาทั้ง 3 วิธี มีค่าแตกต่างกัน

เล็กน้อย สำหรับวิธีการค้นหาแบบ GA จะใช้เวลาในการค้นหาน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามวิธีการค้นหาแบบ ATS จะให้ค่า ε น้อยที่สุดในขณะที่วิธีการค้นหาแบบ PSO จะใช้เวลาในการค้นหานานที่สุด อีกทั้งยังมีค่า ε มากที่สุด สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาในบทความนี้จะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของแรงดันบัลติซึ (V_{dc}) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และชุดทดสอบจริงซึ่งเป็นระดับแรงดันที่ไม่ได้ใช้สำหรับการค้นหา โดยกำหนดให้ V_s เปลี่ยนแปลงแบบขั้นที่ขึ้นจาก $20 V_{rms}$ เป็น $30 V_{rms}$ และ V_s เปลี่ยนแปลงจาก $40 V_{rms}$ เป็น $50 V_{rms}$ ดังแสดงได้ในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ



รูปที่ 8 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการระบุค่าพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลง I_s จาก $20 V_{rms}$ ไปเป็น $30 V_{rms}$



รูปที่ 9 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการระบุค่าพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลง I_s จาก $40 V_{rms}$ ไปเป็น $50 V_{rms}$

จากรูปที่ 8 และ 9 จะสังเกตเห็นว่า ผลตอบสนอง V_{dc} ที่ได้ จากแบบจำลองและผลตอบสนอง V_{dc} จากชุดทดสอบจริงมี ลักษณะรูปสัญญาณที่สอดคล้องกันในสภาวะชั่วคราวและสภาวะ อยู่ตัว ดังนั้นจึงถือได้ว่าพารามิเตอร์ของระบบที่ได้จากการระบุ เอกลักษณะด้วยอัลกอริทึม GA PSO และ ATS เป็นพารามิเตอร์ ที่ถูกต้อง เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในกรณีศึกษาที่เสถียรภาพ ในหัวข้อถัดไป

6. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเอซี เป็นดีซีที่มีโหลดวงจรแปลงผันแบบบัก์คที่มีการควบคุมทั้ง 2 ชุดจะอาศัยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการระบุเอกลักษณ์ ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6,8-9,11,23] โดย แบบจำลองดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (7) [6,24]

$$\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}} V_{sd} \\
 \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} \\
 \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_c K_{pv,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1}^2 - \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} V_{o1} + \frac{r_c K_{iv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} X_{v1} + \frac{r_c K_{ii,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} X_{i1} \\
 + \frac{r_c K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* - \frac{r_c K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2}^2 - \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} V_{o2} + \frac{r_c K_{iv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} X_{v2} + \frac{r_c K_{ii,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} X_{i2} + \frac{r_c K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \\
 \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1}^2 + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} V_{o1} - \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} X_{v1} - \frac{K_{ii,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} X_{i1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} C_{dc}} I_{L1} V_{o1}^* + \frac{K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2}^2 \\
 + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} V_{o2} - \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} X_{v2} - \frac{K_{ii,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} X_{i2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} C_{dc}} I_{L2} V_{o2}^* \\
 \dot{I}_{L1} = -\frac{K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} I_{L1} - \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} V_{o1} - \frac{1}{L_1} V_{o1} + \frac{K_{iv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} X_{v1} + \frac{K_{ii,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} X_{i1} + \frac{K_{pv,1} K_{pi,1}}{A_{r,1} L_1} V_{dc} V_{o1}^* \\
 \dot{V}_{o1} = \frac{1}{C_1} I_{L1} - \frac{1}{R_1 C_1} V_{o1} \\
 \dot{X}_{v1} = -V_{o1} + V_{o1}^* \\
 \dot{X}_{i1} = -I_{L1} - K_{pv,1} V_{o1} + K_{iv,1} X_{v1} + K_{pv,1} V_{o1}^* \\
 \dot{I}_{L2} = -\frac{K_{pi,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} I_{L2} - \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} V_{o2} - \frac{1}{L_2} V_{o2} + \frac{K_{iv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} X_{v2} + \frac{K_{ii,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} X_{i2} + \frac{K_{pv,2} K_{pi,2}}{A_{r,2} L_2} V_{dc} V_{o2}^* \\
 \dot{V}_{o2} = \frac{1}{C_2} I_{L2} - \frac{1}{R_2 C_2} V_{o2} \\
 \dot{X}_{v2} = -V_{o2} + V_{o2}^* \\
 \dot{X}_{i2} = -I_{L2} - K_{pv,2} V_{o2} + K_{iv,2} X_{v2} + K_{pv,2} V_{o2}^*
 \end{cases} \quad (7)$$

พิจารณาจากสมการที่ 7 พบว่าเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง [6,24] แสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)_{14 \times 14} \delta \mathbf{x}_{14 \times 1} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)_{14 \times 3} \delta \mathbf{u}_{3 \times 1} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)_{3 \times 14} \delta \mathbf{x}_{14 \times 1} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o)_{3 \times 3} \delta \mathbf{u}_{3 \times 1} \end{cases} \quad (8)$$

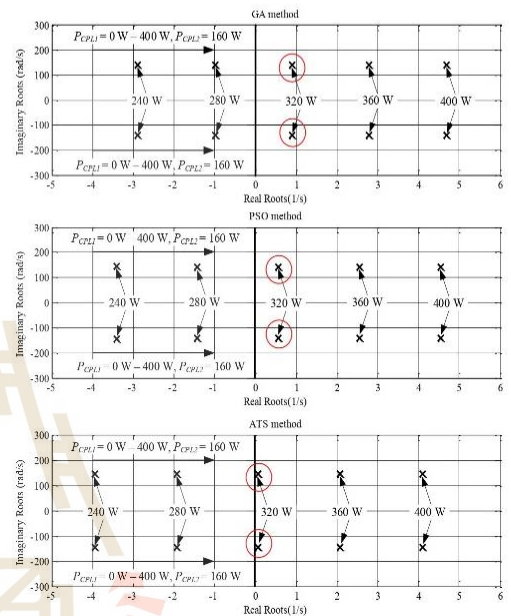
โดยที่ เมทริกซ์ **A**, **B**, **C** และ **D** คือเมทริกซ์จาโคเบียนแบบจำลองในสมการที่ (8) เป็นแบบจำลองเชิงเส้นที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาเหมาะสำหรับใช้วิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีค่าเจาะจงตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอไว้ใน [6] การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถคำนวณหาค่าเจาะจงของระบบที่จุดการทำงานต่างๆได้จากสมการที่ (9)

$$\det[\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}] = 0 \quad (9)$$

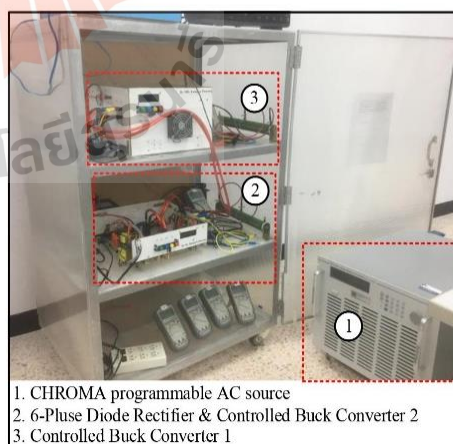
จากสมการที่ (9) สามารถหาค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ทั้งหมด 14 ค่า โดยที่ค่าพหามิตอรีนเมทริกซ์ A เป็นพหามิตอรีนที่ได้มาจากการค้นหาด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทความนี้จะพิจารณาค่าเจาะจงที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเท่านั้นซึ่งเป็นค่าเจาะจงที่อยู่ใกล้แกน *jw* มากที่สุดหรือคูโพลเด่น (dominant poles) มาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพแสดงได้ดังในรูปที่ 10 โดยการยืนยันผลการวิเคราะห์จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ร่วมกับผลจากชุดทดสอบในรูปที่ 11 ดังแสดงในรูปที่ 12

จากรูปที่ 10 และ 12 เมื่อกำหนดให้โหลดวงจรแปลงผันแบบบuckชุดที่ 2 (P_{CPL2}) มีค่าคงที่เท่ากับ 160 W (40 V) จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มโหลดวงจรแปลงผันแบบบuckชุดที่ 1 (P_{CPL1}) ให้มีค่าเท่ากับ 160 W (40 V) ผลรวมของโหลดวงจรแปลงผันแบบบuckทั้ง 2 ชุด ($P_{CPL1} + P_{CPL2}$) จะมีค่าเท่ากับ 320 W ซึ่งทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยสามารถดูได้จากคูโพลเด่นของระบบที่เคลื่อนจากขอบเขตการมีเสถียรภาพ (stable region) ซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายมือของระนาบเอส (s-plane) มายังขอบเขตการ

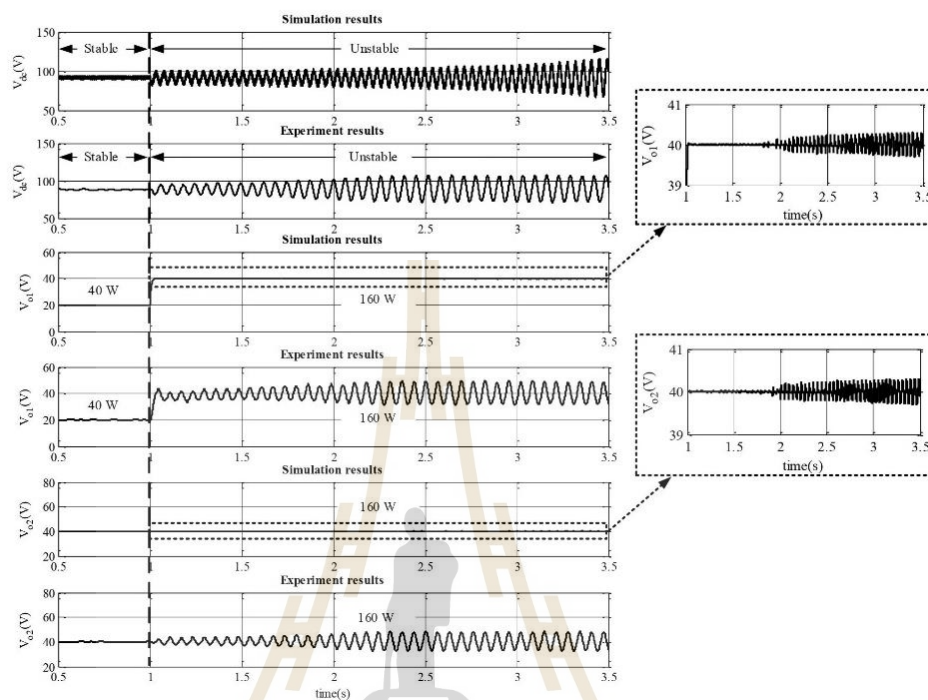
ขาดเสถียรภาพ (unstable region) ที่อยู่ทางด้านขวาของระนาบเอส (คูโพลในวงกลมสีแดง) นอกจากนี้การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 10 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 11 ชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 12 ผลการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พิจารณาจากรูปที่ 12 สังเกตได้ว่าเมื่อผลรวมของโหลดคงจรรแปลงผันแบบบัตักทั้ง 2 ชุด มีการเปลี่ยนแปลงจาก 200 W ไปเป็น 320 W ที่เวลา 1 วินาที แรงดัน V_{dc} จะมีการสั่นไหวเพิ่มขึ้นเป็นผลให้แรงดัน V_{o1} และ V_{o2} เกิดการสั่นไหวด้วยเช่นเดียวกัน จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากอัลกอริทึม GA, PSO และ ATS สามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้อง ณ จุดปฏิบัติงานเดียวกัน ถึงแม้ว่าพารามิเตอร์ที่ได้จากอัลกอริทึมการค้นหาทั้ง 3 จะมีค่าที่แตกต่างกัน

7. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกัน การระบุ

เอกลักษณ์ในบทความนี้อาศัยอัลกอริทึมการค้นหา GA, PSO และ ATS เพื่อระบุค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของชุดทดสอบทางฝั่งแหล่งจ่ายของระบบ โดยอัลกอริทึมการค้นหาทั้ง 3 วิธีมีกลไกการค้นหาค่าตอบที่แตกต่างกัน สำหรับอัลกอริทึม GA มีกลไกในการสร้างกลุ่มประชากรโดยอาศัยการถ่ายทอดพันธุกรรมจากกลุ่มประชากรต้นแบบในรุ่นแรกสู่รุ่นถัดไปในขณะที่อัลกอริทึม PSO มีกลไกในการปรับค่าความเร่งและตำแหน่งเพื่อให้ได้ค่าอนุภาคใหม่ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าค่าอนุภาคใหม่ที่ได้จะแตกต่างไปจากค่าอนุภาคเก่าเสมอ ส่วนอัลกอริทึม ATS มีกลไกในการสุ่มคำตอบเริ่มต้นและทำการปรับลดค่าการค้นหาเพื่อให้กลุ่มคำตอบแคบลงในแต่ละรอบการค้นหา นอกจากนี้ยังมีกลไกการเดินย้อนรอยเพื่อแก้ไขปัญหาค้างติดอยู่ในคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local solution) จากผลการตรวจสอบความถูกต้องที่อาศัยการ

เปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และชุดทดสอบจริง จะเห็นได้ว่า รูปสัญญาณทั้ง 2 มีลักษณะที่สอดคล้องและคล้ายตามกันอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงถือได้ว่าวิธีการที่นำเสนอในบทความนี้ทั้ง 3 วิธีสามารถระบุค่าพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เมื่อนำพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงพบว่าสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้อง แม้ว่าพารามิเตอร์ที่ได้จากอัลกอริทึม GA, PSO และ ATS จะมีค่าที่แตกต่างกัน โดยอัลกอริทึม ATS จะให้ค่า ε น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม GA และ PSO

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUT) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (TSRI) กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (NSRF) และกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงานเครื่องจักรกล และการควบคุม (PEMC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย รวมทั้งสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Grigore V., Hatonen J., Kyyra J., Suntio T. Dynamics of a buck converter with a constant power load. *IEEE Power Electronics Specialists Conference*. 1998. p. 72–78.
- [2] Jusoh A.B. The instability effect of constant power loads. *Nat. Power Energy Conf*. 2004. p. 175–179.
- [3] Emadi A., Khaligh A., Rivetta C. H., Williamson G. A. Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: Definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2006. 55(4): 1112–1125.
- [4] Rahimi A.M., Emadi A. An analytical investigation of DC/DC power electronic converters with constant power loads in vehicular power systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2009. 58(6): 2689–2702.
- [5] Areerak K-N., Wu T., Bozhko S.V., Asher G.M., Thomas D.W.P. Aircraft power system stability study including effect of voltage control and actuators dynamic. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2011. 47(7): 2574–2589.
- [6] Sopapirm T., Areerak K-N., Areerak K-L. Stability analysis of AC distribution system with six-pulse diode rectifier and multi-converter power electronic loads. *International Review of Electrical Engineering*. 2011. 6(7): 2919–2928.
- [7] Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M., Delillo L., Thomas D.W.P. Stability study for a hybrid AC-DC more-electric aircraft power system. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2012. 48(1): 329–347.
- [8] Areerak K-N., Sopapirm T., Bozhko S., Hill C.I., Suyapan A., Areerak K-L. Adaptive stabilization of uncontrolled rectifier based AC-DC power systems feeding constant power loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. 33(10): 8927–8935.
- [9] Pakdeeto J., Areerak K-N., Bozhko S., Areerak K-L. Stabilization of DC microgrid systems using the loop-cancellation technique. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2021. 9(3): 2652–2663.

- [10] Suyapan A., Areerak K-N., Bozhko S., Yeoh S.S., Areerak K-L. Adaptive stabilization of a permanent magnet synchronous generator-based DC electrical power system in more electric aircraft. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2021. 7(4): 2965–2975.
- [11] Phosung R., Areerak K-N., Sopapirm T., Areerak K-L. 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.
- [12] Riccobono A., Santi E. Comprehensive review of stability criteria for DC Power distribution systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014. 50(5): 3525–3535.
- [13] Griffo A., Wang J. Large signal stability analysis of more electric aircraft power system with constant power loads. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2012. 48(1): 477–489.
- [14] Narongrit T., Areerak K-L., Areerak K-N. Design of an active power filter using genetic algorithm technique. *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Artificial Intelligent, Knowledge Engineering and Data Bases*. 2010. p. 46–50.
- [15] Chonsatidjamroen S., Areerak K-N., and Areerak K-L. The optimal cascade PI controller design of buck converters. *International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. 2012. p. 1-4.
- [16] Puansdownreong D., Areerak K-N., Srikaew A., Sujitjorn S., Totarong P. System Identification via Adaptive Tabu Search. *IEEE International Conference on Industrial Technology*. 2002. p. 915-920.
- [17] Pakdeeto J., Chanpittayagit R., Areerak K-N., Areerak K-L. The optimal controller design of buck-boost converter by using adaptive tabu search algorithm based on state-space averaging model. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2017. 12(3): 1146–1155.
- [18] Udomsuk S., Areerak K-N., Areerak T., Areerak K-L. Power loss identification of three-phase induction motor using adaptive tabu search. *International Electrical Engineering Congress*. 2017. p. 337–340.
- [19] Shen L., Li J., Wu Y., Tang Z., Wang Y. Optimization of artificial bee colony algorithm based load balancing in smart grid cloud. *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia*. 2019. p. 1131–1134.
- [20] Lirui G., Limin H., Liguoz Z., Liguoz L., Jie H. Reactive power optimization for distribution systems based on dual population ant colony optimization. *Chinese Control Conference*. 2008. p. 89–93.
- [21] Cespedes M., Xing L., Sun J. Constant-power loads system stabilization by passive damping. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2011. 26(7): 1832–1836.
- [22] Pakdeeto J., Thanommuang A., Chaicharoenudomrung K., Areerak K-N., Areerak K-L. The effect of parameter variations of system stability for AC-DC power system feeding controlled buck converter.

International Conference on Power, Energy and Innovations. 2021. p. 61–64.

- [23] Sopapirm T., Areerak K-N., Areerak K-L. The identification of AC-DC power system parameter using an adaptive tabu search technique. *International Review of Electrical Engineering*. 2012. 7(4): 4655–4662.
- [24] Sopapirm T., Areerak K-N., Areerak K-L. The averaging model of a six-pulse diode rectifier feeding paralleled buck converters. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. 2012. 6(1): 58–65.



ประวัติผู้เขียน

นางสาวอลิสสา ถนอมเมือง เกิดเมื่อวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2541 เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนมารีย์วิทยา ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนสุนารีวิทยา ระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า นครราชสีมา สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุนารีวิทยา จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2563 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเดิม

ในการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุนารีวิทยา ได้รับทุนกิตติบัณฑิตซึ่งเป็นทุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุนารีวิทยา รวมถึงได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจำนวน 4 รายวิชา ดังนี้ (1) ELECTRICAL ENGINEERING LABORATORY (2) POWER ELECTRONICS AND DRIVES LABORATORY (3) ELECTRICAL CIRCUIT AND BASIC ELECTRONICS LABORATORY (4) CONTROL SYSTEMS LABORATORY สำหรับผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มีจำนวน 2 บทความดังที่ได้รวบรวมไว้แล้ว

