

การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชไอเป็นดีซี  
ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2558

**LARGE SIGNAL STABILITY ANALYSIS OF  
AC-DC POWER SYSTEMS FEEDING  
CONSTANT POWER LOADS**



**Apichai Suyapan**

**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 2015**

การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซียเป็นดีซี  
ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

\_\_\_\_\_

(รศ. ดร.กมล อารีรักษ์)

ประธานกรรมการ

\_\_\_\_\_

(รศ. ดร.กมล อารีรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

\_\_\_\_\_

(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

กรรมการ

\_\_\_\_\_

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

\_\_\_\_\_

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อภิษฐ์ สุธะพันธ์ : การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซี เป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (LARGE SIGNAL STABILITY ANALYSIS OF AC-DC POWER SYSTEMS FEEDING CONSTANT POWER LOADS)  
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ทองพัน อารีรักษ์, 193 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม ซึ่งวงจรแปลงผันดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การวิเคราะห์เสถียรภาพจะเริ่มต้นด้วยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก ผ่านแบบจำลองที่ทำให้เป็นเชิงเส้น และอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง หลังจากนั้นจะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ที่อาศัยการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลงบนระนาบของตัวแปรสถานะที่ทรงอิทธิพล มาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ และนอกจากนั้นแล้วจะใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟที่อาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ระบบที่ศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเริ่มต้นด้วยระบบอย่างง่ายที่ไม่ซับซ้อนซึ่งมีตัวแปรสถานะ 2 ตัว จากนั้นจะศึกษาระบบที่มีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้นคือ ระบบ 6x6 และในลำดับสุดท้ายคือระบบ 10x10 ที่เป็นแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นที่อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้อง ทั้งในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก และภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ระนาบเฟสจะวิเคราะห์เสถียรภาพได้ที่จุดเริ่มต้นการทำงานหรือที่จุดการเปลี่ยนแปลงของโหลดเท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติจุดดังกล่าวมีมากมายหลากหลายจุด กว่าจะวิเคราะห์ได้ครบทุกจุด จะต้องใช้เวลานาน ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน ซึ่งข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างมากของขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับคือ การเริ่มต้นการทำงานหรือการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด ด้วยจุดใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ ซึ่งผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งหมดได้รับการตรวจสอบ



ความถูกต้องด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง  
ร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB



สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

APICHAI SUYAPAN : LARGE SIGNAL STABILITY ANALYSIS OF AC-DC  
POWER SYSTEMS FEEDING CONSTANT POWER LOADS. THESIS  
ADVISOR : ASSOC. PROF. KONGPAN AREERAK, Ph.D., 193 PP.

STABILITY ANALYSIS/CONTROL THEORY/POWER ELECTRONICS/  
MODELING AND SIMULATION.

The thesis presents the large signal stability analysis of AC-DC power systems feeding a controlled buck converters behaving as a constant power load. The small signal stability analysis is firstly used via the linearized model with Eigenvalue theorem. After that the large signal stability analysis called phase-plane analysis is applied to analyze the stability via the phase portrait of the dominant state variables. Moreover, The Lyapunov function derived from Takagi-Sugeno is used to determine region of asymptotic stability (RAS). The studied system is started with the simple system having 2 state variables. The 6x6 system is then analyzed. Finally, the full 10x10 systems is studied in which the AC-DC power systems feeding a controlled buck converter is considered as the proposed power system. The analytical results show that the stability analysis using the linearized model with Eigenvalue theorem cannot provide an accurate result for both small-signal and large-signal condition. Otherwise, the phase-plane analysis can provide an accurate result with a good oscillation prediction of DC-link filter. However, the phase-plane technique requires a lot of computation time in which various initial values for this analysis can be used. Hence, the thesis also presents the Lyapunov function based on Takagi-Sugeno to determine RAS. The useful informations of RAS is that any CPLs immediately

changed within RAS will not affect to the system stability. All stability results are verified by the intensive simulation of MATLAB and SIMULINK.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไข รายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดี ในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่กรุณา ให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบุคลากร ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์บรรณสารและ สื่อการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

อภิชัย สุยะพันธ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 การจัดรูปแบบรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	4
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>7</b>
2.1 บทนำ.....	7
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	7
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	10
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	13
2.5 สรุป.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>3</b>	<b>การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่าย</b>	
	<b>ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ.....</b>	<b>18</b>
3.1	บทนำ.....	18
3.2	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	18
3.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา .....	19
3.3.1	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น .....	20
3.3.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส.....	23
3.3.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ .....	30
3.3.4	การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ .....	43
3.4	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส .....	46
3.5	การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ.....	54
3.5.1	การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์.....	55
3.5.2	การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน .....	61
3.6	สรุป .....	75
<b>4</b>	<b>การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์</b>	
	<b>ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ.....</b>	<b>78</b>
4.1	บทนำ.....	78
4.2	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	79
4.2.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา .....	79

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีตีควิ.....	80
4.2.3	การคำนวณมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและ บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ .....	85
4.2.4	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	88
4.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา .....	91
4.3.1	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น .....	91
4.3.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส.....	95
4.3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ .....	102
4.4	การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจร เรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ.....	107
4.5	สรุป .....	120
5	<b>การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม.....</b>	<b>123</b>
5.1	บทนำ.....	123
5.2	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	124
5.2.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา .....	124
5.2.2	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ด้วยวิธีการผสมผสานกัน ระหว่างวิธีตีควิและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป.....	125
5.2.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	135
5.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา .....	139
5.3.1	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น .....	139
5.3.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส.....	142
5.3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ .....	147

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4	การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม .....	152
5.5	สรุป .....	158
<b>6</b>	<b>สรุปและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>160</b>
6.1	สรุป .....	160
6.2	ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	166
	รายการอ้างอิง .....	167
	ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB.....	170
ภาคผนวก ข.	โปรแกรมการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดย เบรย์ทันและมอเซอร์ .....	172
ภาคผนวก ค.	โปรแกรมการแก้สมการเมตริกซ์เชิงเส้นสำหรับการคำนวณ หาฟังก์ชันเลียปูนอฟและการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพ แบบเชิงเส้นกำกับด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน .....	175
ภาคผนวก ง.	โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณ ค่าในสภาวะคงตัวด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและราฟสัน .....	179
ภาคผนวก จ.	บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ในระหว่างศึกษา.....	183
	ประวัติผู้เขียน .....	193



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง .....	10
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น .....	13
3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 .....	20
3.2 รายละเอียดของจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด.....	47
3.3 ค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ .....	56
3.4 ค่าเมตริกซ์ $M$ , $x_{1,\min}$ , $x_{2,\min}$ , $V(\mathbf{x}_{\min})$ ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ.....	68
4.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 .....	88
4.2 ค่าเมตริกซ์ $M$ , $x_{1,\min}$ , $x_{2,\min}$ , $V(\mathbf{x}_{\min})$ ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ.....	115
5.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 .....	136
5.2 ค่าเมตริกซ์ $M$ , $x_{1,\min}$ , $x_{2,\min}$ , $V(\mathbf{x}_{\min})$ ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ.....	153

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ..... 15
3.1	วงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ..... 19
3.2	ค่าเจาะจงของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ..... 23
3.3	แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ..... 24
3.4	รูปแบบการเคลื่อนที่ของการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ ..... 25
3.5	วงรอบขีดจำกัด ..... 27
3.6	การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ที่ $P_{CPL} = 5 \text{ W}$ ..... 28
3.7	การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ที่ $P_{CPL} = 14.4 \text{ W}$ ..... 29
3.8	การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ที่ $P_{CPL} = 14.5 \text{ W}$ ..... 29
3.9	แนวคิดเกี่ยวกับเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ..... 31
3.10	ความหมายทางเรขาคณิตของทฤษฎีเซตยี่นยง..... 33
3.11	แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการ โดยตรงของเลียปูนอฟ..... 34
3.12	เส้นกราฟโครงร่างของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาที่ $P_{CPL} = 5 \text{ W}$ ..... 42
3.13	เส้นกราฟโครงร่างของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาที่ $P_{CPL} = 14.4 \text{ W}$ ..... 42
3.14	เส้นกราฟโครงร่างของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาที่ $P_{CPL} = 14.5 \text{ W}$ ..... 43
3.15	การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์..... 44
3.16	สัญญาณ $i_L$ และ $v_o$ จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่ $P_{CPL} = 5 \text{ W}$ ..... 44
3.17	สัญญาณ $i_L$ และ $v_o$ ที่ $P_{CPL} = 0 \text{ W}$ เมื่อ $i_L(0) = 0 \text{ A}$ และ $v_o(0) = 0 \text{ V}$ ..... 47
3.18	การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลง แบบทันทีทันใดจาก $0 \text{ W}$ ไปเป็น $10 \text{ W}$ ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 ..... 48
3.19	การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลง แบบทันทีทันใดจาก $0 \text{ W}$ ไปเป็น $10 \text{ W}$ ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 2 ..... 49
3.20	การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลง แบบทันทีทันใดจาก $0 \text{ W}$ ไปเป็น $10 \text{ W}$ ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 3 ..... 49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4 .....	50
3.22 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 .....	50
3.23 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 2 .....	51
3.24 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 3 .....	51
3.25 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4 .....	52
3.26 ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ $P_{CPL} = 5 \text{ W } 10 \text{ W } 13 \text{ W } \text{ และ } 14 \text{ W}$ .....	56
3.27 สัญญาณ $i_L$ และ $v_o$ ที่ $P_{CPL} = 0 \text{ W}$ เมื่อ $i_L(0) = 0 \text{ A}$ $v_o(0) = 0 \text{ V}$ และมี RAS ที่ $P_{CPL} = 10 \text{ W}$ .....	58
3.28 Actual RAS และ Estimated RAS ที่ $P_{CPL} = 10 \text{ W}$ .....	60
3.29 ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากวิธีการที่นำเสนอ โดยทาคากิและซุจิโน เมื่อ $P_{CPL} = 5 \text{ W } 10 \text{ W } 13 \text{ W } \text{ และ } 14 \text{ W}$ .....	68
3.30 Actual RAS, RAS from Takagi-Sugeno และ RAS from Brayton-Moser ที่ $P_{CPL} = 10 \text{ W}$ .....	70
3.31 สัญญาณ $i_L$ และ $v_o$ ที่ $P_{CPL} = 0 \text{ W}$ เมื่อ $i_L(0) = 0 \text{ A}$ $v_o(0) = 0 \text{ V}$ และมี RAS from Takagi-Sugeno ที่ $P_{CPL} = 10 \text{ W}$ .....	71
3.32 ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 .....	72
3.33 ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 2 .....	72

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.34 ผลการขึ้นชันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 3.....	73
3.35 ผลการขึ้นชันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4.....	73
3.36 ผลการขึ้นชันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 5.....	74
3.37 ผลการขึ้นชันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 6.....	74
4.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ .....	79
4.2 วงจรสมมูลของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดิกิว .....	82
4.2 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดิกิว .....	82
4.4 วงจรสมมูลของไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่อยู่บนแกนหมุนดิกิว .....	83
4.5 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดิกิว.....	84
4.6 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส .....	85
4.7 สัญญาณ $V_{dc}$ เมื่อ $P_{CPL}$ เปลี่ยนแปลงจาก 10 kW ไปเป็น 15 kW ที่เวลา 2 วินาที .....	90
4.8 สัญญาณ $V_{dc}$ เมื่อ $P_{CPL}$ เปลี่ยนแปลงจาก 20 kW ไปเป็น 15 kW ที่เวลา 2 วินาที .....	90
4.9 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ $P_{CPL} = 15$ kW .....	93
4.10 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ .....	94
4.11 trajectory บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ต่าง ๆ เมื่อ $P_{CPL} = 15$ kW .....	96
4.12 trajectory เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW .....	99
4.13 trajectory เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW .....	99
4.14 trajectory เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW .....	101
4.15 trajectory เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW .....	101
4.16 การขึ้นชันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก .....	103

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ผลการขึ้นชันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW.....	103
4.18 ผลการขึ้นชันการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW.....	104
4.19 วงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ.....	108
4.20 RAS เมื่อ $P_{CPL}$ มีค่าเท่ากับ 5 kW 10 kW 15 kW และ 20 kW .....	115
4.21 สัญญาณ $I_{dc}$ และ $V_{dc}$ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้า คงตัวแบบอุดมคติ เมื่อ $P_{CPL} = 25$ kW และมี RAS ที่ $P_{CPL} = 20$ kW .....	117
4.22 ผลการขึ้นชันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 .....	118
4.23 ผลการขึ้นชันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 2 .....	118
4.24 ผลการขึ้นชันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 3 .....	119
4.25 ผลการขึ้นชันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4 .....	119
5.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม .....	124
5.2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว.....	126
5.3 สัญญาณการสวิตซ์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์.....	128
5.4 สัญญาณ $V_{dc}$ และ $V_o$ เมื่อ $V_o^*$ เปลี่ยนแปลงจาก 100 V ไปเป็น 250 V ที่เวลา 1 วินาที .....	138

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5	สัญญาณ $V_{dc}$ และ $V_o$ เมื่อ $V_o^*$ เปลี่ยนแปลงจาก 300 V ไปเป็น 200 V ที่เวลา 1 วินาที ..... 138
5.6	ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ $P_{CPL} = 15$ kW ( $V_o^* = 273.86$ V)..... 141
5.7	ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ ..... 142
5.8	trajectory เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW ..... 144
5.9	trajectory เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW ..... 144
5.10	trajectory เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW ..... 146
5.11	trajectory เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW ..... 147
5.12	การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ..... 148
5.13	ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW..... 149
5.14	ผลการยืนยันการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW..... 150
5.15	วงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ..... 153
5.16	RAS เมื่อ $P_{CPL}$ มีค่าเท่ากับ 5 kW 10 kW 15 kW และ 20 kW ..... 154
5.17	สัญญาณ $I_{dc}$ และ $V_{dc}$ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจร แปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม เมื่อ $P_{CPL} = 25$ kW และมี RAS ที่ $P_{CPL} = 20$ kW ..... 155
5.18	ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 ..... 156
5.19	ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 2 ..... 156

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.20 ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 3 .....	157
5.21 ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4 .....	157
6.1 แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยองค์ความรู้และแนวทาง ที่สรุปได้จากงานวิจัยวิทยานิพนธ์ .....	165
ก.1 วงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ.....	171
ก.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ .....	171
ก.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม.....	171

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน โหลดของระบบไฟฟ้ากำลังโดยส่วนใหญ่จะเป็นวงจรแปลงผันกำลัง เช่น วงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี และเอซีเป็นเอซี ที่มีการควบคุมสัญญาณขาออกให้ เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังมีประสิทธิภาพสูง การดูแล บำรุงรักษาต่ำ และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย จึงทำให้ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่าง แพร่หลาย แต่วงจรแปลงผันกำลังเมื่อมีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดที่มี กำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power loads) ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็น ค่าตัวต้านทาน ติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม และอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบได้ (R.D. Middlebrook, 1997; A. Emadi, B. Fahimi, and M. Ehsani, 1999; A. Emadi, A. Khaligh, C.H. Rivetta, and G.A. Williamson, 2006; K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G. Asher, and D.W.P. Thomas, 2008) ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นแบบกำลังไฟฟ้า คงตัวจึงเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณา เนื่องจากถ้าระบบไฟฟ้ากำลังขาดเสถียรภาพอาจส่งผลให้เกิด ความเสียหายต่อระบบได้ และโหลดในลักษณะนี้นอกจากจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบดังที่ กล่าวไปในข้างต้นแล้ว ยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearities) เกิดขึ้น กล่าวคือ เป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear systems) จากงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบัน การวิเคราะห์ เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) ซึ่งเป็นวิธีการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในระบบให้มีความเป็นเชิงเส้นโดย อาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง จากนั้นใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) วิเคราะห์ เสถียรภาพของระบบ (R. Matousek, I. Svare, P. Pivonka, P. Osmera, and M. Seda, 2009; K-N. Areerak, S.V. Bozhko, G. Asher, D.W.P. Thomas, A. Watson, and T. Wu, 2009; T. Sopapirm, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2011; K. Chaijarumudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2011) โดยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด แต่มีข้อจำกัดคือ ถ้าค่าเจาะจงอยู่บนแกนจินตภาพจะไม่สามารถสรุปได้ว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นมีเสถียรภาพหรือขาดเสถียรภาพ (J.J. Slotine, and W. Li, 1991; H.K. Khalil, 1996) ซึ่งความไม่ชัดเจนดังกล่าวอาจทำให้การวิเคราะห์ เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้ และนอกจากนั้นแล้ววิธีการนี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณ



ขนาดเล็ก (small-signal stability analysis) ซึ่งทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพมีความถูกต้องเฉพาะในช่วงการทำงานที่แคบ (small range operating) ถ้าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด อาจทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้เช่นกัน นอกจากนี้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นแล้ว จากงานวิจัยเพียงบางส่วนในอดีตจนถึงปัจจุบัน การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นยังสามารถทำได้โดยอาศัยวิธีการแบบไม่เป็นเชิงเส้น หรือวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ (large-signal stability analysis) ซึ่งมีหลากหลายวิธี เช่น วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase plane analysis) วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method) วิธีฟังก์ชันพรรณนา (describing function) เกณฑ์ของโปพอฟ (Popov's criterion) และเกณฑ์วงกลม (circle criterion) เป็นต้น (J.J. Slotine, and W. Li, 1991; H.K. Khalil, 1996; A. Griffo, J. Wang, and D. Howe, 2008; R. Matousek, I. Svare, P. Pivonka, P. Osmera, and M. Seda, 2009; Du. Weijing, Junming Zhang, Yang Zhang, and Zhaoming Qian, 2011; A. Griffo, J.Wang, 2012; Didier Marx, Pierre Magne, Babak Nahid-Mobarakeh, Serge Pierfederici, and Bernard Davat, 2012) โดยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่นี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยตรง จึงสามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพได้ในช่วงการทำงานที่กว้าง และให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและโหลดของระบบมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ด้วยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ และนำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ เพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าว และทำให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณามีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งการยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

1.2.2 เพื่อหาแนวทางในการเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้อง ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด

1.2.3 เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการ พิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สำหรับงานวิจัยที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

1.3.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

1.3.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน จะใช้วิธีการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

1.3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ด้วยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ จะใช้วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ

1.3.5 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสเป็นแบบสมดุล และไม่พิจารณาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

1.3.6 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์จะอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (SimPower System Block, PSB) ของโปรแกรม MATLAB

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะต้องมีขั้วเด่น (โพลเด่น : dominant pole) 2 ตัว เท่านั้น

1.4.2 การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังในระบบ จะพิจารณาในย่านโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง (continuous conduction mode) เท่านั้น

1.4.3 การทำให้เป็นเชิงเส้นจะอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง

1.4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์เสถียรภาพ จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง ร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

1.5.2 ได้แนวทางในการเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้อง ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด

1.5.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สำหรับงานวิจัยที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท แต่ละบทมีรายละเอียดที่นำเสนอต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้นและขอบเขตของการวิจัย รวมถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงการสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งเป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์ระนาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟจะอาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟจากวิธีการที่แตกต่างกันสามวิธี คือ วิธีการของคราซอฟสกี (Krasovskii's method) วิธีการที่นำเสนอโดยเบร์ย์ทันและ

มอเซอร์ (Brayton-Moser) และวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน (Takagi-Sugeno) รวมถึงการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (region of asymptotic stability or domain of attraction) จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ และเนื้อหาในส่วนสุดท้ายของบทจะเป็นการอภิปรายและสรุปเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในบทถัดไป

**บทที่ 4** นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งในบทนี้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีการเพิ่มความซับซ้อนทางด้านสัญญาณขาเข้าของระบบให้มีความใกล้เคียงกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ นั่นคือจะพิจารณาพลวัตของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลและไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์เพิ่มเติมจากบทที่ 3 ในขณะที่ฝั่งสัญญาณขาออกยังคงพิจารณาเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติเหมือนเดิม เนื้อหาในเบื้องต้นของบทนี้จะกล่าวถึงการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีดิกัว เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์หระนาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟจะมุ่งเน้นไปที่การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้โดยอาศัยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน ซึ่งการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทนี้จะดำเนินการประมาณจากวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบแทนการประมาณจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทนี้โดยตรง เพื่อลดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

**บทที่ 5** นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยจะมีการพิจารณาพลวัตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานแทนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เพิ่มเติมจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 4 ซึ่งเนื้อหาในบทที่ 5 นี้จะมีรายละเอียดเช่นเดียวกับเนื้อหาในบทที่ 4 แต่จะแตกต่างกันตรงที่การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดิกัวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปของการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ พร้อมทั้งนำเสนอปัญหาและข้อเสนอแนะ เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต

ภาคผนวกมี 5 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ภาคผนวก ข. แสดงรายละเอียดของโปรแกรมการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์ ภาคผนวก ค. แสดงรายละเอียดของโปรแกรมการแก้สมการเมตริกซ์เชิงเส้นสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟและการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน ภาคผนวก ง. แสดงรายละเอียดของโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณค่าในสภาวะคงตัวด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและราฟสัน ภาคผนวก จ. แสดงรายการบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันสัญญาณขาออกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งในอดีตที่ผ่านมา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ ได้มีผู้ทำการค้นคว้าวิจัย และพัฒนามาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในแต่ละหัวข้อได้นำเสนอโดยเรียงลำดับตามปีที่ตีพิมพ์ อธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป รวมถึงสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรม เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปัจจุบัน วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้รับความนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน แต่เมื่อนำวงจรดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรอง จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถแสดงเป็นปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1976	R.D. Middlebrook.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อระบบไฟฟ้าโดยรวม ซึ่งโหลดในลักษณะนี้จะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งนอกจากจะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบแล้ว ยังส่งผลทำให้ระบบเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่มีโหลดลักษณะดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ เพื่อหลีกเลี่ยงการขาดเสถียรภาพที่อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบได้
1999	A. Emadi, B. Fahimi, and M. Ehsani.	บทความนี้นำเสนอการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีเพิ่มมากขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ
2004	A.B. Jusoh.	บทความนี้นำเสนอการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่มีวงจรกรองกำลังไฟฟารวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูก และนำเสนอการออกแบบวงจรพาสซีฟเพื่อช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น
2005	C. Rivetta., A. Emadi, and G.A. Williamsom.	บทความนี้เสนอพฤติกรรมพลวัตของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีที่มีการควบคุมในระบบไฟฟ้าของเรือดำน้ำ ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าของเรือดำน้ำ

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2006	A. Emadi., A. Khaligh., C.H. Rivetta., and G.A. Williamson.	บทความนี้แนะนำเสนอการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวของระบบไฟฟ้าในรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังและวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าในระบบ รวมถึงนำเสนอแนวทางในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังในระบบไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้า
2008	K-N. Areerak., S.V. Bozhko., G. Asher., and D.W.P. Thomas.	บทความนี้แนะนำเสนอการขาดเสถียรภาพของอิมพีแดนซ์เชิงลบ ด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีเพิ่มมากขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นที่อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ดังตารางที่ 2.1 พบว่า โหลดของระบบไฟฟ้ากำลังที่เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน ในสภาวะคงตัว โหลดดังกล่าวจะมีค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับจุดสมดุลของระบบ ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็น ค่าอิมพีแดนซ์ติดลบต่อระบบโดยรวม และโดยทั่วไปโหลดที่เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่าน วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบของโหลดชนิดนี้จะไปลดค่าความต้านทานของวงจรกรอง (damping) ซึ่งปกติค่าความต้านทานของวงจรกรองจะมีค่าเป็นบวก การลดลงของค่าความต้านทานของวงจรกรองจะทำให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณขึ้น ถ้าระบบมีค่าอิมพีแดนซ์ติดลบมากพอ นั่นคือปริมาณโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากพอ จะทำให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณเป็นอย่างมาก หรือทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดเป็นแบบกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก เพราะถ้าระบบไฟฟ้ากำลังขาดเสถียรภาพ



อาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ และนอกจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบดังที่กล่าวไปในข้างต้นแล้ว ยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้น นั่นคือทำให้ระบบเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วย

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ เมื่อพิจารณาในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ ในวงจรแปลงผันกำลัง ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ ดังกล่าว และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยสามารถแสดงเป็นปริศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1997	J. Mahdavi., A. Emadi., M.D. Bellar., and M. Ehsano.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2004	M.M. Jalla., A. Emadi., G.A. Williamson., and B. Fahimi.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ-ทั่วไป พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจากชุดทดสอบจริง

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2007	Liqu Han., D. Howe., and Jiabin Wang.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสแบบ 6 และ 12 พัลส์ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
2008	K-N. Areerak., S.V. Bozhko., G.M. Asher., and D.W.P. Thomas	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นสามเฟสแบบบริดจ์ด้วยวิธีดีคิว และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นที่อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ
2009	K-N. Areerak., S.V. Bozhko., L. de Lillo., G.M. Asher., D.W.P. Thomas., A. Watson., and T. Wu	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน โดยคำนึงถึงพลวัตที่เกิดขึ้นเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีดีคิว รวมถึงวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นที่อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้และการวิเคราะห์เสถียรภาพ ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจากชุดทดสอบจริง
2011	K. Chaijarunudomrung., K-N. Areerak., and K-L. Areerak.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีการควบคุม และมีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ด้วยวิธีดีคิว รวมถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นที่อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	T. Sopapirm., K-N. Areerak., and K-L. Areerak.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม ด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2014	R. Chanpittayagit., K-N. Areerak., and K-L. Areerak.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์-บูสต์ที่มีการควบคุม ด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังดังตารางที่ 2.2 พบว่า การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี นิยมใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้จะมีความถูกต้องแม่นยำ และไม่ซับซ้อน ในขณะที่การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ทั้งแบบที่มีการควบคุมแรงดันบัคไฟตรงหรือแบบที่ไม่มีการควบคุมแรงดันบัคไฟตรง นิยมใช้วิธีดีคิว ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้จะมีความยืดหยุ่นสูง และไม่ซับซ้อนมากนัก ดังนั้นสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกร้อมตัวต้านทานด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ สามารถพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นและอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านวิธีการพื้นฐานของทฤษฎีบทควบคุมที่เป็นเชิงเส้น เช่น ทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด แต่มีข้อจำกัดคือ ถ้าค่าเจาะจงอยู่บนแกนจินตภาพจะไม่สามารถสรุปได้ว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นมีเสถียรภาพหรือขาดเสถียรภาพ (J.J. Slotine, and W. Li, 1991; H.K. Khalil, 1996) ซึ่งความไม่ชัดเจนดังกล่าวอาจทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้ และนอกจากนั้นแล้ววิธีการนี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก ซึ่งทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพมีความถูกต้องเฉพาะในช่วงการทำงานที่แคบ ถ้าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด อาจทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้เช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการอื่นๆ ที่นอกเหนือจากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

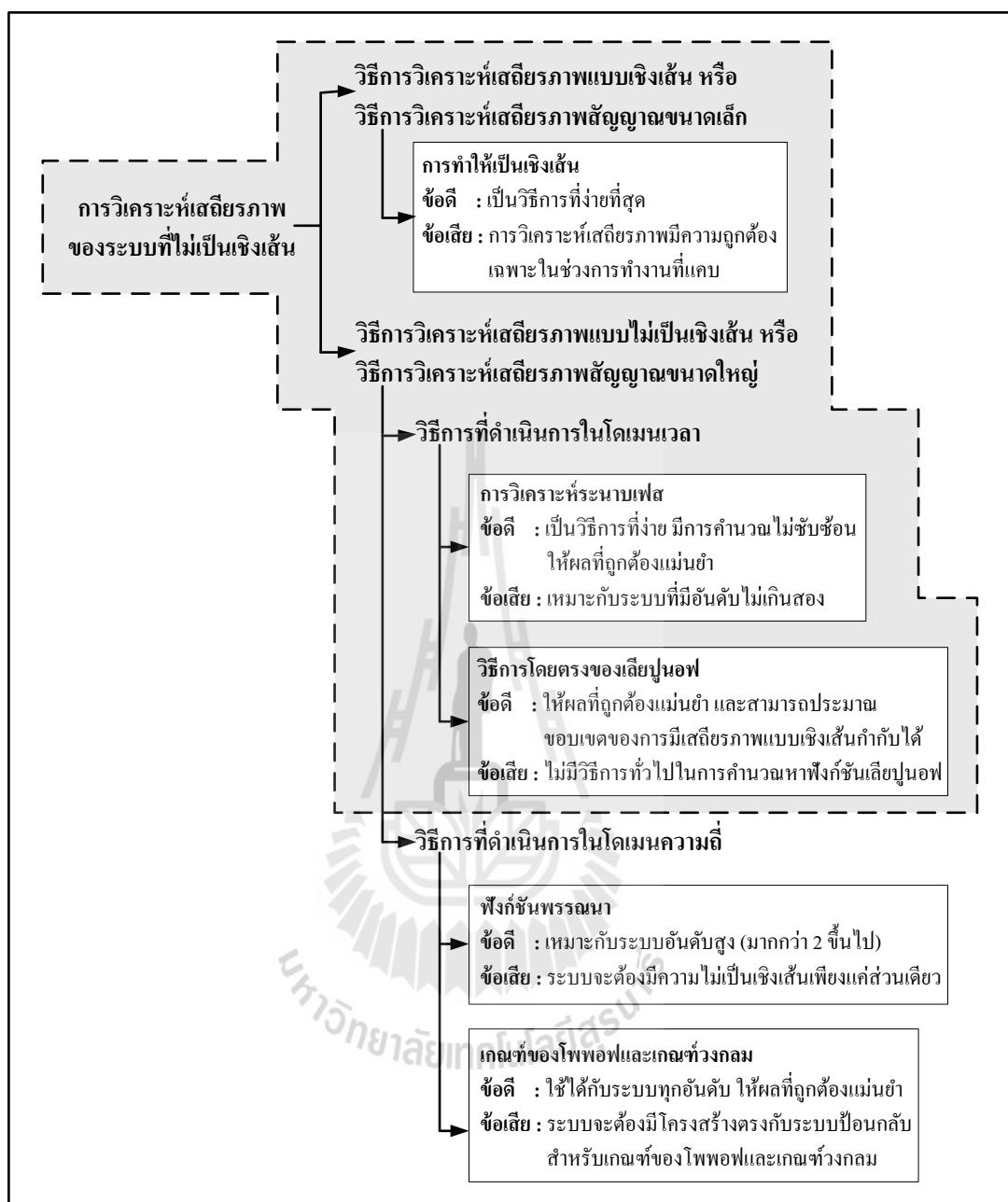
ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2008	A. Griffo., J. Wang., and D. Howe.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ พร้อมทั้งประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้โดยอาศัยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์
2009	R. Matousek., I. Svare., P. Pivonka., P. Osmera., and M. Seda.	บทความนี้เสนอวิธีการสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟและเกณฑ์ของโพพอฟ พร้อมทั้งเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีที่นำเสนอ

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Weijing Du., Junming Zhang., Yang Zhang., and Zhoamong Qian.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้าในรถยนต์ไฟฟ้า ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ พร้อมทั้งประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟกำลังสอง
2012	Didier Marx., Pierre Magne., Babak Nahid-Mobarakeh., Serge Pierfederici., and Bernard Davat.	บทความนี้เสนอวิธีการสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและโหลดกำลังไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยมุ่งเน้นการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้โดยอาศัยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน
2012	A. Griffo., and J. Wang.	บทความนี้เสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอชไอเป็นดีซีในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน ภายใต้การรบกวนขนาดใหญ่ โดยมุ่งเน้นการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้โดยอาศัยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังตารางที่ 2.3 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

จากแผนภาพในรูปที่ 2.1 จะพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากวิธีการทำให้เป็นเชิงแล้ว ยังมีวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีการที่ดำเนินการในโดเมนเวลา และวิธีการที่ดำเนินการในโดเมนความถี่ โดยวิธีการที่ดำเนินการในโดเมนเวลา ประกอบด้วย การวิเคราะห์ระนาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเล็ปปูโนฟ ซึ่ง

การวิเคราะห์ระนาบเฟส เป็นวิธีการทางกราฟิกที่จะสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ (state variables) สองตัว วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่าย มีการคำนวณไม่ซับซ้อนและให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ แต่เหมาะกับระบบที่มีอันดับไม่เกินสอง ถ้าอันดับของระบบเกินสองอาจทำการแปลงรูปแบบให้เป็นกลุ่มของระบบอันดับสองได้ แต่จะเกิดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบและการตีความผล ซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้ วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟเป็นวิธีการที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพราะนอกจากจะให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถที่จะประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ต้องคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณา จากนั้นนำฟังก์ชันที่คำนวณได้ไปตรวจสอบเสถียรภาพตามทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ซึ่งไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ และในทางปฏิบัติการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความยุ่งยากและซับซ้อน ในขณะที่วิธีการที่ดำเนินการในโดเมนความถี่ ประกอบด้วย วิธีฟังก์ชันพหุนาม เกณฑ์ของโพพอฟ และเกณฑ์วงกลม ซึ่งวิธีฟังก์ชันพหุนาม เป็นวิธีการประมาณค่า โดยพิจารณาถึงรูปร่างของความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในระบบ ซึ่งจะพิจารณาเป็นอัตราขยายสมมูล และคำนวณได้โดยอาศัยอนุกรมฟูรีเยร์ วิธีการนี้เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับระบบอันดับสูง (มากกว่าอันดับ 2 ขึ้นไป) ให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำเมื่อเทียบกับระบบที่มีอันดับต่ำกว่า แต่การนำไปใช้งานต้องคำนึงถึงข้อจำกัดหรือสมมติฐานของวิธีการเป็นอย่างดี จึงจะได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ ทำให้มีข้อจำกัดของระบบที่สามารถใช้วิธีการนี้ได้ เช่น ระบบจะต้องมีความไม่เป็นเชิงเส้นเพียงแค่ส่วนเดียว เป็นต้น เกณฑ์ของโพพอฟและเกณฑ์วงกลม เป็นวิธีการที่รากฐานของทฤษฎีได้รับการพัฒนามาจากวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ ใช้ได้กับระบบทุกอันดับ ให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ แต่ระบบที่พิจารณาจะต้องมีโครงสร้างเป็นไปตามโครงสร้างระบบป้อนกลับสำหรับเกณฑ์ของโพพอฟและเกณฑ์วงกลม หากโครงสร้างของระบบที่พิจารณามีความแตกต่างจากโครงสร้างระบบป้อนกลับดังกล่าว จะต้องทำการปรับโครงสร้างก่อนการวิเคราะห์เสถียรภาพซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน จากที่กล่าวมาข้างต้นจะสังเกตได้ว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการที่ดำเนินการในโดเมนความถี่ มีข้อจำกัดของระบบที่สามารถใช้วิธีการนี้ได้ อยู่ค่อนข้างมาก และนอกจากนั้นแล้ว การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการที่ดำเนินการในโดเมนความถี่นี้ โดยทั่วไปจะพิจารณาระบบที่อยู่ในรูปแบบของแผนภาพบล็อก (block diagrams) ซึ่งถ้าระบบที่พิจารณาไม่ได้อยู่ในรูปแบบดังกล่าวจะต้องสร้างแผนภาพบล็อกของระบบก่อนการวิเคราะห์เสถียรภาพ และถ้าระบบที่พิจารณามีโครงสร้างที่ซับซ้อน การสร้างแผนภาพบล็อกของระบบจะทำได้ยากมากด้วยเช่นกัน ซึ่งทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการที่ดำเนินการ

ในโดเมนความถี่ที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ที่ดำเนินการในโดเมนเวลา และนำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ เพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าว และทำให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณามีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพไม่ว่าจะอาศัยวิธีการใดที่ได้กล่าวมาแล้ว จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ดังนั้นรายละเอียดการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพจะได้รับการอธิบายไว้ในแต่ละส่วนที่เหมาะสมของวิทยานิพนธ์นี้ด้วยเช่นกัน

## 2.5 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ ได้กล่าวถึง ปรัชญาวิศวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งถือเป็นองค์ความรู้พื้นฐานและเป็นแนวทางสำหรับการทำวิทยานิพนธ์นี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นแนวทางในการเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว



## บทที่ 3

### การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่าย ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

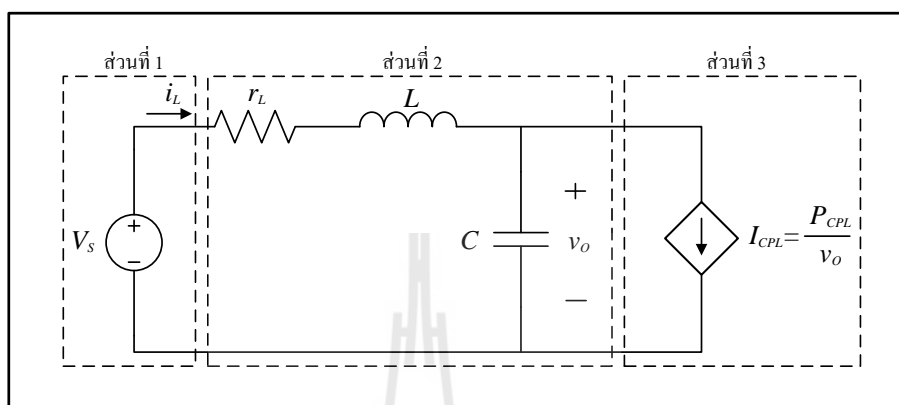
#### 3.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เริ่มต้นจากการศึกษาวิธีการสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น จากนั้นนำวิธีการที่ได้ศึกษามาวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังอย่างง่ายที่ไม่ซับซ้อน เพื่อสร้างองค์ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับแนวคิดพื้นฐานและทฤษฎีบทที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของแต่ละวิธี และใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในบทที่ 3 จึงนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งเป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์ระนาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ ซึ่งจะมีการแทรกแนวคิดพื้นฐานและทฤษฎีบทที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของแต่ละวิธีไว้ในเนื้อหาด้วย สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟจะอาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟจากวิธีการที่แตกต่างกันสามวิธี คือ วิธีการของคราซอว์สกี วิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์ และวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและชุงิโน รวมถึงนำเสนอการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้

#### 3.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 3 นี้คือ วงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งเป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอิสระ  $V_S$  ซึ่งใช้แทนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์และสมมติให้มีค่าคงที่ ส่วนที่ 2 วงจรกรอง (LC filter) โดยที่  $L$  คือความเหนี่ยวนำ  $C$  คือความจุไฟฟ้า และ  $r_L$  คือความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง ซึ่งความต้านทาน ความเหนี่ยวนำและ

ความจุไฟฟ้า จะสมมติให้มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นและมีค่าคงที่ และส่วนที่ 3 แหล่งจ่ายกระแสไม่อิสระแบบอุดมคติซึ่งใช้แทนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่ต่อขนานกับระบบผ่านวงจรกรอง



รูปที่ 3.1 วงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ สมการพลวัต (dynamic equations) ของวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 3.1 คือ

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{r_L}{L}i_L - \frac{1}{L}v_o + \frac{V_s}{L} \\ \frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{P_{CPL}}{Cv_o} \end{cases} \quad (3-1)$$

โดยที่  $i_L$  คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

$v_o$  คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

จากสมการที่ (3-1) จะสังเกตได้ว่าเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือ  $\frac{P_{CPL}}{Cv_o}$  ซึ่งปรากฏอยู่ในสมการ  $\frac{dv_o}{dt}$  ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้จึงเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

### 3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ จะอาศัยสมการที่ (3-1) และกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับ

การวิเคราะห์เสถียรภาพ แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการพิจารณาวงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม จากบทความทางวิชาการของ เทพพนม โสภานัม กองพันธ์ อารีรักษ์ และ กงพล อารีรักษ์ (T. Sopapirm, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2011)

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_s$	120 V	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
$r_L$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$L$	50 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$C$	500 $\mu\text{F}$	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$i_L(0)$	0 A	ค่าเริ่มต้นของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
$v_o(0)$	120 V	ค่าเริ่มต้นของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

### 3.3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จะเริ่มต้นจากการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในระบบให้มีความเป็นเชิงเส้น โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) อันดับหนึ่ง จากนั้นจะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านวิธีการพื้นฐานของทฤษฎีบทควบคุมที่เป็นเชิงเส้น นั่นคือ ทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

พิจารณาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (autonomous system) ซึ่งแทนด้วยแบบจำลองตัวแปรสถานะ (state-variable models) ดังสมการที่ (3-2)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (3-2)$$

โดยที่  $\mathbf{x}$  คือ ตัวแปรสถานะของระบบ

$\mathbf{f}(\mathbf{x})$  คือ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะของระบบ

กำหนดให้  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  เป็นฟังก์ชันที่สามารถหาอนุพันธ์ได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นสามารถกระจายฟังก์ชัน  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  รอบ ๆ จุดปฏิบัติงาน  $\mathbf{x}_0$  ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ได้สมการที่ (3-3)

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \mathbf{f}_{\text{h.o.t.}}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (3-3)$$

โดยที่  $\mathbf{f}_{\text{h.o.t.}}$  คือ พจน์อันดับสูง (higher-order terms)

กรณีที่พิจารณาเฉพาะการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง พจน์อันดับสูงจะถูกตัดออกไป และจากการใช้การกระจายอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งกับชุดสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยพิจารณารอบ ๆ จุดปฏิบัติการ  $\mathbf{x}_0$  ดังนั้นจะสามารถประมาณระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ (3-2) ให้เป็นระบบที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแทนด้วยแบบจำลองตัวแปรสถานะได้ดังสมการที่ (3-4) ดังนี้

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (3-4)$$

โดยที่  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ,  $\mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ,  $\mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  และ  $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  คือ เมตริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรสถานะ  $\mathbf{x}_0$  และค่าตัวแปรขาเข้า  $\mathbf{u}_0$  ที่จุดปฏิบัติการที่พิจารณา โดยจุดปฏิบัติการของระบบ (operating points or equilibrium points) คำนวณได้จาก  $\dot{\mathbf{x}} = 0$

สมการที่ (3-4) คือ แบบจำลองของระบบที่เป็นเชิงเส้น หรืออาจมีชื่อเรียกว่าแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่พิจารณาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในรูปของการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยรอบ ๆ จุดปฏิบัติการ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น สามารถอาศัยวิธีการพื้นฐานของทฤษฎีบทควบคุมที่เป็นเชิงเส้น นั่นคือ ทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยจะพิจารณาค่าเจาะจง (eigenvalues) ของเมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  ซึ่งค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-5)

$$\det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0 \quad (3-5)$$

โดยที่  $\lambda$  คือ ค่าเจาะจงของระบบ

ดังนั้นระบบจะมีเสถียรภาพ ถ้าส่วนจริงของค่าเฉพาะจะมีค่าน้อยกว่าศูนย์ เงื่อนไขดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (3-6)

$$\operatorname{Re}(\lambda_i) < 0 \quad (3-6)$$

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

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จะได้ว่า

จากสมการที่ (3-1) ซึ่งเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ดังนั้นจะได้แบบจำลองของระบบซึ่งเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ดังสมการที่ (3-4) โดยที่เมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-7)

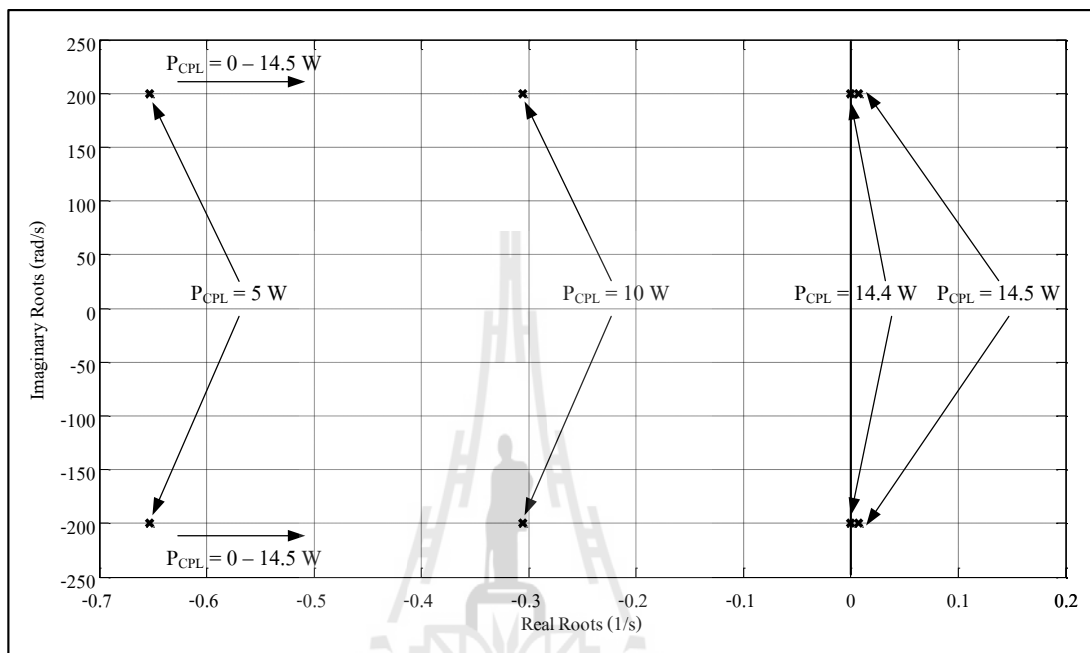
$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \frac{\partial i_L}{\partial i_L} & \frac{\partial i_L}{\partial v_o} \\ \frac{\partial v_o}{\partial i_L} & \frac{\partial v_o}{\partial v_o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{P_{CPL}}{Cv_{o,0}^2} \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

และจุดปฏิบัติงานของระบบสามารถคำนวณได้ โดยกำหนดให้  $\dot{i}_L$  และ  $\dot{v}_o$  ในสมการที่ (3-1) ให้มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นจะได้สมการที่ใช้คำนวณหาจุดปฏิบัติงานของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงได้ดังสมการที่ (3-8)

$$\begin{cases} i_{L,0} = \frac{2P_{CPL}}{V_S + \sqrt{V_S^2 - 4r_L P_{CPL}}} \\ v_{o,0} = \frac{V_S + \sqrt{V_S^2 - 4r_L P_{CPL}}}{2} \end{cases} \quad (3-8)$$

จากเมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  และจุดปฏิบัติงานของระบบดังสมการที่ (3-7) และ (3-8) ตามลำดับ สามารถคำนวณหาค่าเฉพาะของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลด

กำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ( $P_{CPL}$ ) มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 – 14.5 W ผ่านคำสั่ง “eig(A)” ของโปรแกรม MATLAB ได้ โดยเส้นทางเดินของค่าเจาะจงเมื่อแปรเปลี่ยนค่า  $P_{CPL}$  แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



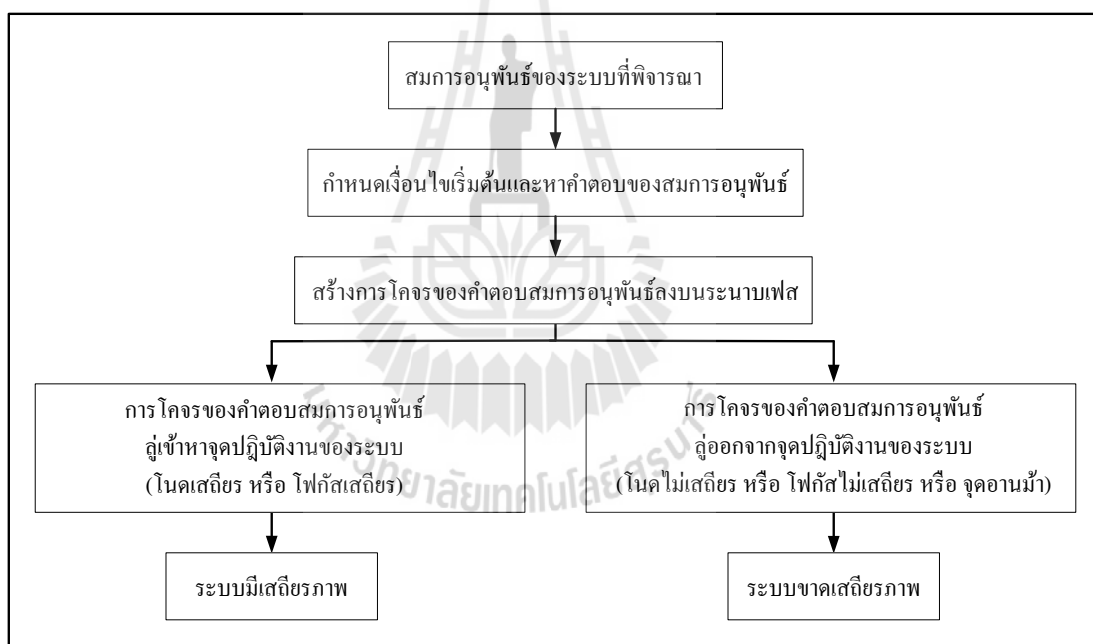
รูปที่ 3.2 ค่าเจาะจงของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

จากรูปที่ 3.2 จะสังเกตได้ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่ามากกว่า 14.4 W และในขณะที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 14.4 W ตามเงื่อนไขของสมการที่ (3-6) จะถือว่าระบบขาดเสถียรภาพ แต่การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นกล่าวไว้ว่า ถ้าค่าเจาะจงอยู่บนแกนจินตภาพจะยังสรุปไม่ได้ว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นมีเสถียรภาพหรือขาดเสถียรภาพ (J.J. Slotine, and W. Li, 1991; H.K. Khalil, 1996) ซึ่งความไม่ชัดเจนดังกล่าวถือเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งของการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น

### 3.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

การวิเคราะห์ระนาบเฟสเป็นวิธีการทางกราฟิกสำหรับศึกษาพฤติกรรมของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นอันดับสอง (second-order nonlinear system) ซึ่งนำเสนอโดย อองรี ปวงกาเร (Henri Poincare) นักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส แนวคิดพื้นฐานของวิธีการนี้คือ การสร้างวิถีการโคจร

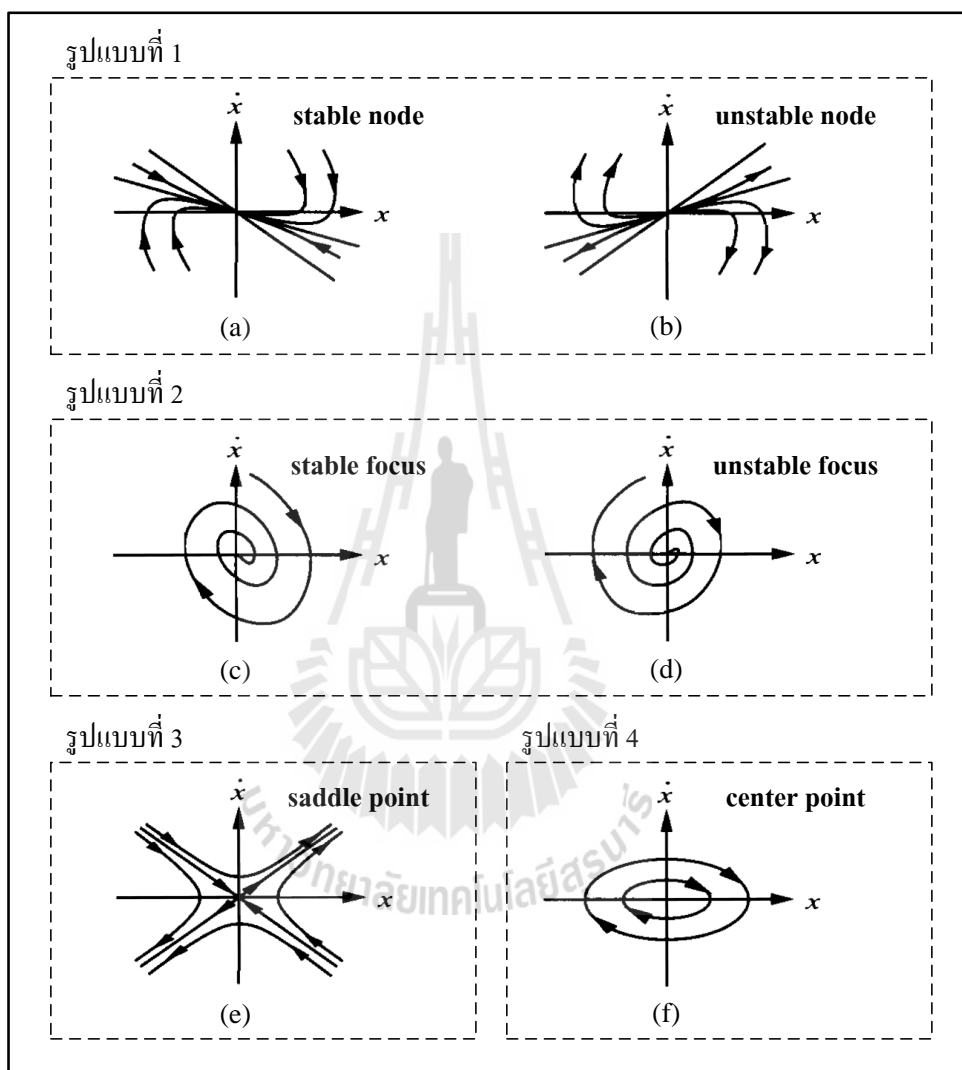
(motion trajectory) ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขเริ่มต้น (initial conditions) ต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน โดยแต่ละวิธีการ โจรนั้น ได้มาจากการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ของระบบจากเงื่อนไขเริ่มต้นที่พิจารณา และมีชื่อเรียกว่า การโคจรระนาบเฟส (phase plane trajectory) หรือการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ (trajectory) ลงบนปริภูมิสถานะ (state space) ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะของระบบสองตัว ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ระนาบเฟส (phase plane) จากนั้นจะตรวจสอบคุณลักษณะสมบัติของระบบรวมถึงข้อมูลเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบจากวิธีการ โจรบนระนาบเฟสที่ได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส จะพบว่า เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง ซึ่งอาศัยทฤษฎีบทควบคุมของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น หรืออาจเรียกว่า เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสสามารถแสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 3.3 ดังนี้



รูปที่ 3.3 แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

จากแผนภาพในรูปที่ 3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส จะตั้งต้นจากสมการพลวัตหรือสมการอนุพันธ์ของระบบที่พิจารณา จากนั้นจะกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานให้กับระบบ และหาคำตอบของสมการอนุพันธ์จากเงื่อนไขเริ่มต้นที่ได้กำหนดไว้ นำคำตอบของสมการอนุพันธ์ที่หาได้ไปสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบเฟส จากนั้นจะตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาจากการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์

บนระนาบเฟสสร้างที่ได้ ซึ่งรูปแบบการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพของระบบ แบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.4 รูปแบบการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์

(J.J. Slotine, and W. Li, 1991)

กำหนดให้ จุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิด (origin)

รูปแบบที่ 1 คือ โหนดเสถียรหรือโหนดไม่เสถียร (stable or unstable node) ลักษณะการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในรูปแบบนี้ จะไม่มีการสั่นไหว (oscillation) โดย



ถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์เข้าสู่หาจุดปฏิบัติงาน ดังนั้นจุดปฏิบัติงานดังกล่าวจะถูกเรียกว่า โหนดเสถียร (stable node) ดังแสดงในรูปที่ 3.4(a) ซึ่งแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพ ในทางกลับกัน ถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลู่ออกจากจุดปฏิบัติงาน ดังนั้นจุดปฏิบัติงานดังกล่าวจะถูกเรียกว่า โหนดไม่เสถียร (unstable node) ดังแสดงในรูปที่ 3.4(b) ซึ่งแสดงว่าระบบขาดเสถียรภาพ

รูปแบบที่ 2 คือ โฟกัสเสถียรหรือโฟกัสไม่เสถียร (stable or unstable focus) ลักษณะการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในรูปแบบนี้ จะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานอย่างน้อยหนึ่งรอบก่อนที่จะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานดังกล่าว นั่นคือ เป็นการเคลื่อนที่แบบมีการสั่นไหว โดยถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์เคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานและเข้าหาจุดปฏิบัติงานในเวลาต่อมา ดังนั้นจุดปฏิบัติงานดังกล่าวจะถูกเรียกว่า โฟกัสเสถียร (stable focus) ดังแสดงในรูปที่ 3.4(c) ซึ่งแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพ ในทางกลับกัน ถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์เคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานและออกห่างจากจุดปฏิบัติงานมากยิ่งขึ้นอย่างไม่มีการสิ้นสุดเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นจุดปฏิบัติงานดังกล่าวจะถูกเรียกว่า โฟกัสไม่เสถียร (unstable focus) ดังแสดงในรูปที่ 3.4(d) ซึ่งแสดงว่าระบบขาดเสถียรภาพ

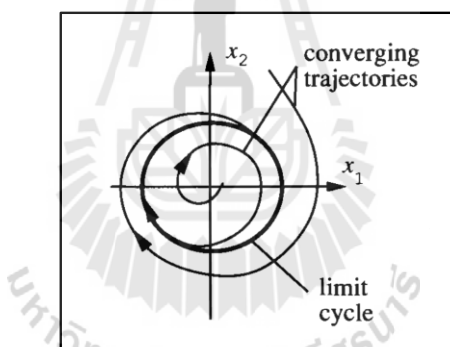
รูปแบบที่ 3 คือ จุดอานม้า (saddle point) เมื่อพิจารณาวิถีการโคจรบนระนาบเฟสของการเคลื่อนที่ในรูปแบบนี้ จะพบว่า มีลักษณะคล้ายกับอานม้า โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของแต่ละการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์นั้น จะไม่มีการสั่นไหว ดังแสดงในรูปที่ 3.4(e) ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า มีการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ 2 เส้น ซึ่งเป็นเส้นตรงและพาดผ่านจุดปฏิบัติงานของระบบ โดยเส้นที่หนึ่งจะลู่เข้าหาจุดปฏิบัติงาน ในขณะที่อีกเส้นหนึ่งจะลู่ออกจากจุดปฏิบัติงาน และการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในการเคลื่อนที่อื่น ๆ ที่นอกเหนือจากเส้นตรงทั้งสองเส้นดังกล่าวข้างต้น จะมีการเคลื่อนที่ลู่ออกจากจุดปฏิบัติงานของระบบทั้งหมด ดังนั้นจุดปฏิบัติงานดังกล่าวจึงถูกเรียกว่า จุดอานม้า ซึ่งระบบที่มีจุดปฏิบัติงานในลักษณะนี้ ส่วนใหญ่ระบบจะไม่มีเสถียรภาพ

รูปแบบที่ 4 คือ จุดศูนย์กลาง (center point) ลักษณะการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในรูปแบบนี้ จะมีการเคลื่อนที่เป็นรูปร่างวงรี โดยมีจุดปฏิบัติงานของระบบเป็นจุดศูนย์กลางของวงรี ดังนั้นจุดปฏิบัติงานนี้จึงถูกเรียกว่า จุดศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 3.4(f) ซึ่งระบบที่มีจุดปฏิบัติงานในลักษณะนี้ จะมีเสถียรภาพแบบไร้ส่วนเพื่อ แต่การมีเสถียรภาพแบบไร้ส่วนเพื่อนั้น ระบบจะมีการสั่นไหวของสัญญาณที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับจุดปฏิบัติงานของระบบ ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ให้เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ เพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อส่วนประกอบหรือโครงสร้างของระบบ หรืออาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงาน

ของตัวควบคุมได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาให้การมีเสถียรภาพแบบไร้ส่วนเพื่อเป็นการไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งแสดงว่าระบบที่มีจุดปฏิบัติงานเป็นแบบจุดศูนย์กลาง จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ

ดังนั้นจากรูปแบบการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ทั้ง 4 รูปแบบ จะสามารถสรุปได้ว่า ถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์เข้าสู่หาจุดปฏิบัติงานของระบบ ไม่ว่าจะเป็นจุดปฏิบัติงานแบบโนดเสถียรหรือโฟกัสเสถียร ระบบจะมีเสถียรภาพ ในขณะที่ถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ออกจากจุดปฏิบัติงานของระบบ ไม่ว่าจะเป็นจุดปฏิบัติงานแบบโนดไม่เสถียร หรือโฟกัสไม่เสถียร หรือจุดอานม้า ระบบจะขาดเสถียรภาพ

นอกจากนี้แล้วระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะมีปรากฏการณ์ (phenomenon) หรือลักษณะสมบัติที่สำคัญคือ การสั่นไกวที่ขนาด (amplitude) และคาบ (period) มีค่าคงที่ ซึ่งการสั่นไกวในลักษณะนี้มีชื่อเรียกว่า วงรอบขีดจำกัด (limit cycle) โดยวงรอบขีดจำกัดนี้เป็นลักษณะเฉพาะที่พบได้ในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น

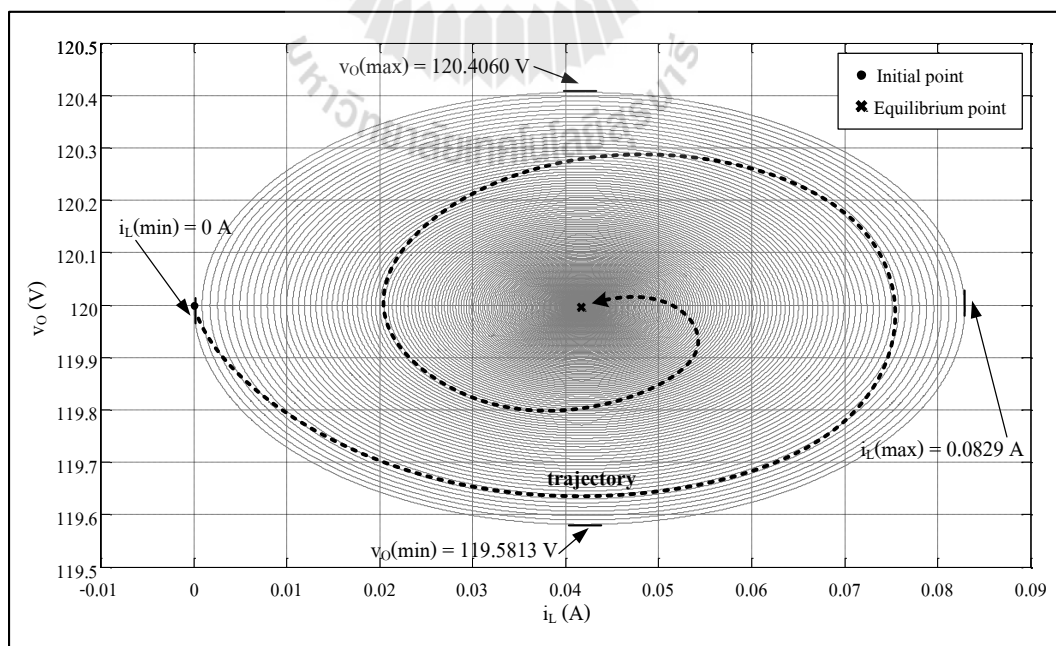


รูปที่ 3.5 วงรอบขีดจำกัด (J.J. Slotine, and W. Li, 1991)

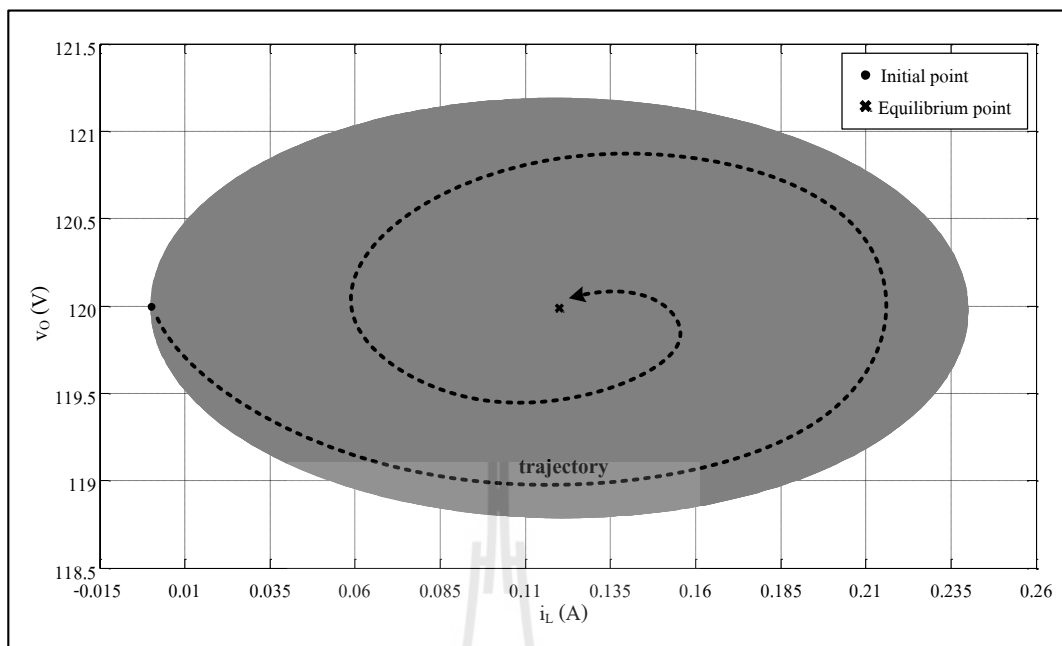
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีวงรอบขีดจำกัดสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสได้เช่นกัน โดยที่วงรอบขีดจำกัดของระบบจะปรากฏเป็นเส้นโค้งปิด (close curve) บนระนาบเฟส ซึ่งทุก ๆ การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์จะเคลื่อนที่จากเงื่อนไขเริ่มต้นที่พิจารณาจากนั้นจะเข้าสู่เส้นโค้งปิดนี้ และจะเคลื่อนที่ตามเส้นโค้งปิดดังกล่าวเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 3.5 การเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ตามวงรอบขีดจำกัดนี้ จะทำให้เกิดลักษณะของการสั่นไกวที่ขนาดและคาบมีค่าคงที่

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส จะได้ว่า จาก

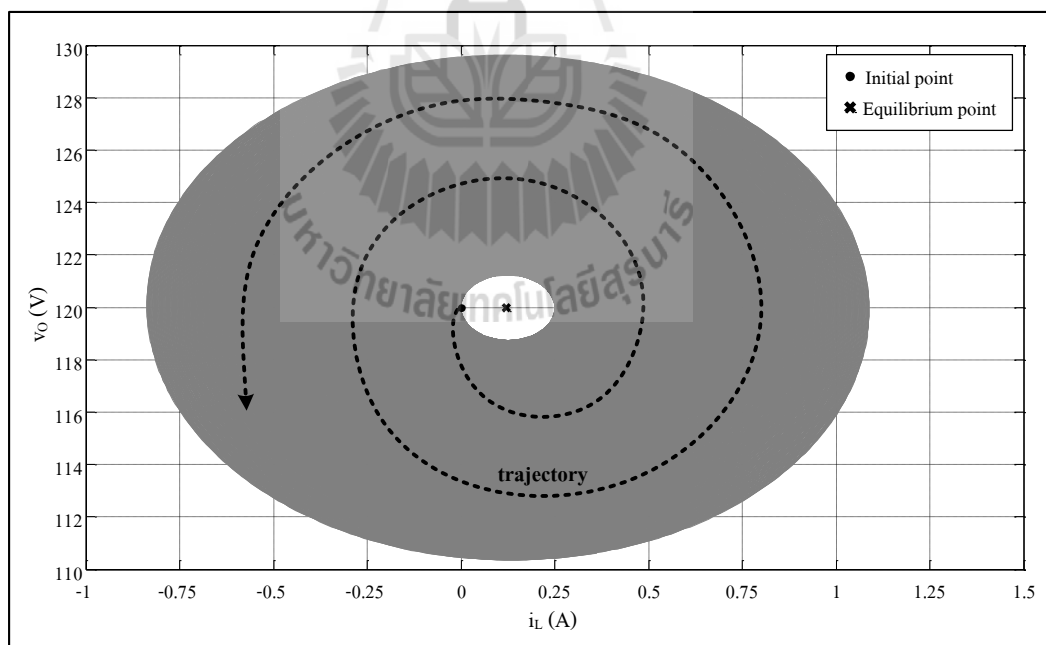
สมการที่ (3-1) สามารถสร้างการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 5 W 14.4 W และ 14.5 W ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ถึงรูปที่ 3.8 ตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่าในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มจากจุดเริ่มต้นและจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานก่อนที่จะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่า จุดปฏิบัติงานดังกล่าวเป็นแบบโพกัสเสถียร ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพ ในขณะที่รูปที่ 3.8 นั้นการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มจากจุดเริ่มต้น โดยจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานและออกห่างจากจุดปฏิบัติงานของระบบมากยิ่งขึ้นอย่างไม่มีการสิ้นสุดเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่า จุดปฏิบัติงานดังกล่าวเป็นแบบโพกัสไม่เสถียร ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 จะมีเสถียรภาพเมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 14.4 W และจะขาดเสถียรภาพเมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่ามากกว่า 14.4 W แต่อย่างไรก็ตามข้อสรุปดังกล่าวจะเป็นจริงสำหรับค่าเริ่มต้น  $i_L(0) = 0$  A และ  $v_O(0) = 120$  V เท่านั้น ซึ่งค่าเริ่มต้นการทำงานดังกล่าวนี้ คำนวณได้จากการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในสถานะอยู่ตัว โดยการลัดวงจร (short circuit) ที่ตัวเหนี่ยวนำ และเปิดวงจร (open circuit) ที่ตัวเก็บประจุ ดังนั้นถ้าค่าเริ่มต้นของระบบมีการเปลี่ยนแปลงจะต้องทำการวิเคราะห์เสถียรภาพใหม่ตามหลักการที่ได้นำเสนอไว้ในข้างต้น



รูปที่ 3.6 การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ที่  $P_{CPL} = 5$  W



รูปที่ 3.7 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ที่  $P_{CPL} = 14.4$  W



รูปที่ 3.8 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ที่  $P_{CPL} = 14.5$  W

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้แล้ว หากรูปแบบการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการ

อนุพันธ์เป็นการเคลื่อนที่แบบมีการสั่นไกว จะสามารถประมาณการสั่นไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 5 W จากกราฟการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในรูปที่ 3.6 จะสังเกตเห็นว่าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบมีการสั่นไกว ดังนั้นจะสามารถประมาณการสั่นไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้ดังนี้ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง ( $i_L$ ) จะมีการสั่นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง 0 – 0.0829 A และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ( $v_o$ ) จะมีการสั่นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง 119.5813 – 120.4060 V ก่อนที่การสั่นไกวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบ

### 3.3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ

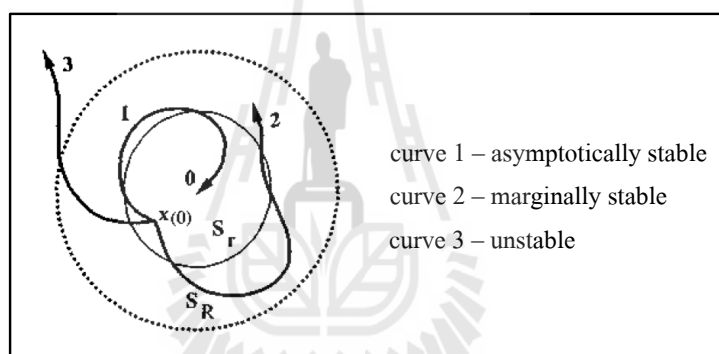
วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟเป็นวิธีการที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยวิธีการนี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยตรง ซึ่งอาศัยทฤษฎีบทควบคุมของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น หรืออาจเรียกว่า เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ ซึ่งนำเสนอโดย อเล็กซานเดอร์ มิกอิลโลวิช เลียปูนอฟ (Alexandr Mikhailovich Lyapunov) นักคณิตศาสตร์ชาวรัสเซีย แนวคิดพื้นฐานของวิธีการนี้ได้มาจากการสังเกตลักษณะพฤติกรรมทางกายภาพของระบบทางกล นั่นคือ ถ้าพลังงานรวมทั้งหมดของระบบมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง ท้ายที่สุดแล้วระบบจะเข้าสู่จุดสมดุลหรือจุดปฏิบัติงานของระบบ ซึ่งแสดงว่า ระบบมีเสถียรภาพ ดังนั้นหลักการพื้นฐานในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีการ โดยตรงของเลียปูนอฟคือ การสร้างฟังก์ชันพลังงาน (energy-like function) หรือฟังก์ชันเลียปูนอฟ (Lyapunov function) สำหรับระบบที่พิจารณา จากนั้นจะตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่สร้างได้ ซึ่งในขณะนี้ยังไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ และในทางปฏิบัติการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความยุ่งยากซับซ้อน โดยรายละเอียดและทฤษฎีบทที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการ โดยตรงของเลียปูนอฟแสดงได้ดังนี้

**บทนิยามที่ 3.1** กำหนดให้ จุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิด  $S_r$  คือ ขอบเขตของเงื่อนไขเริ่มต้นที่อยู่ใกล้กับจุดปฏิบัติงานของระบบ  $S_R$  คือ ขอบเขตของการมีเสถียรภาพตามแนวคิดของเลียปูนอฟ การมีเสถียรภาพตามแนวคิดของเลียปูนอฟ แบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

1. เสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (asymptotically stable) การมีเสถียรภาพในรูปแบบนี้ ระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มต้นที่อยู่ภายในขอบเขต  $S_r$  จนกระทั่งเข้าสู่จุดสมดุลหรือจุดปฏิบัติงานของระบบเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงด้วยเส้นโค้งที่ 1 ในรูปที่ 3.9

2. เสถียรภาพแบบไร้ส่วนเพื่อ (marginally stable) การมีเสถียรภาพในรูปแบบนี้ ระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มต้นที่อยู่ภายในขอบเขต  $S_r$  เมื่อเวลาผ่านไป ระบบจะไม่เข้าสู่จุดสมดุลหรือจุดปฏิบัติงาน แต่จะยังคงอยู่ในขอบเขตของการมีเสถียรภาพ  $S_r$  ดังแสดงด้วยเส้นโค้งที่ 2 ในรูปที่ 3.9

3. ไม่มีเสถียรภาพ (unstable) การไม่มีเสถียรภาพตามแนวคิดของเลียปูนอฟคือ การที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มต้นที่อยู่ภายในขอบเขต  $S_r$  และออกจากขอบเขตของการมีเสถียรภาพ  $S_r$  เมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงด้วยเส้นโค้งที่ 3 ในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แนวคิดเกี่ยวกับเสถียรภาพของเลียปูนอฟ (J.J. Slotine, and W. Li, 1991)

จากบทนิยามที่ 3.1 จะพบว่า การมีเสถียรภาพตามแนวคิดของเลียปูนอฟจะมี 2 แบบ คือ การมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับและการมีเสถียรภาพแบบไร้ส่วนเพื่อ แต่การมีเสถียรภาพแบบไร้ส่วนเพื่อนั้น ระบบจะมีการสั่นไหวของสัญญาณที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับจุดปฏิบัติงานของระบบ หรือการสั่นไหวนี้อาจนำไปสู่การเข้าหาวงรอบจิดจำกัดของระบบ ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ให้เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ เพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อส่วนประกอบหรือโครงสร้างของระบบ หรืออาจส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของตัวควบคุมได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะพิจารณาให้  $S_r$  มีค่าเท่ากับ  $S_R$  ซึ่งแสดงว่าการมีเสถียรภาพแบบไร้ส่วนเพื่อจะถูกพิจารณาให้เป็นการไม่มีเสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการ โดยตรงของเลียปูนอฟจำเป็นต้องอาศัยฟังก์ชันพลังงานหรือฟังก์ชันเลียปูนอฟ ซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวจะมีคุณสมบัติดังบทนิยามที่ 3.2 ดังนี้

**บทนิยามที่ 3.2** พิจารณาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังสมการที่ (3-2)

กำหนดให้  $V(\mathbf{x})$  คือ ฟังก์ชันสเกลาร์ (scalar function) ที่มีความต่อเนื่องและสามารถหาอนุพันธ์ได้

$\dot{V}(\mathbf{x})$  คือ อนุพันธ์ของฟังก์ชัน  $V(\mathbf{x})$  เทียบกับเวลา นั่นคือ

$$\dot{V}(\mathbf{x}) = \frac{dV(\mathbf{x})}{dt} = \frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \cdot \dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x})$$

ถ้า  $V(\mathbf{x})$  เป็นฟังก์ชันบวกแน่นอน (positive definite function) นั่นคือ

$$V(0) = 0$$

$$V(\mathbf{x}) > 0 \text{ เมื่อ } \mathbf{x} \neq 0$$

และ  $\dot{V}(\mathbf{x})$  เป็นฟังก์ชันกึ่งลบแน่นอน (negative semi definite function) นั่นคือ

$$\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0$$

ดังนั้น  $V(\mathbf{x})$  คือ ฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (3-2)

จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ได้สามารถนำไปตรวจสอบเสถียรภาพของระบบตามทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ (Lyapunov theorems) ได้ดังทฤษฎีบทที่ 3.1 ดังนี้

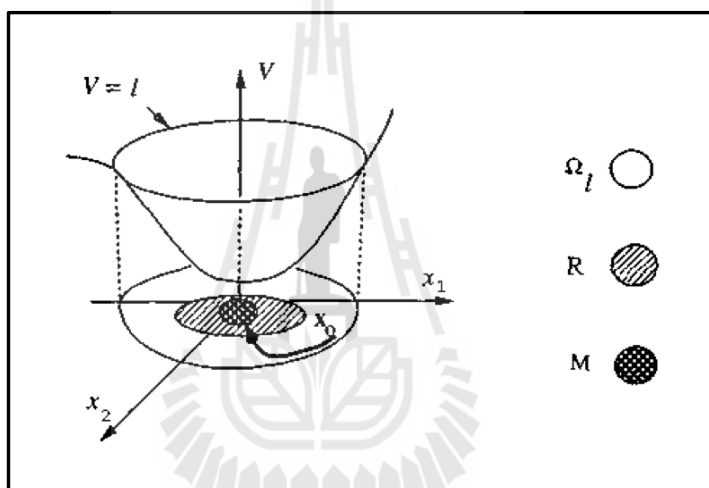
**ทฤษฎีบทที่ 3.1** ทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ

กำหนดให้  $V(\mathbf{x})$  คือ ฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณา

ถ้า  $V(\mathbf{x})$  เป็นฟังก์ชันบวกแน่นอน และ  $\dot{V}(\mathbf{x})$  เป็นฟังก์ชันกึ่งลบแน่นอน ดังนั้นระบบที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพ

แต่ถ้า  $\dot{V}(\mathbf{x})$  เป็นฟังก์ชันลบอย่างแน่นอน (negative definite function) ดังนั้นระบบที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ

จากทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ดังทฤษฎีบทที่ 3.1 ระบบจะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้นั้น อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาจะต้องเป็นฟังก์ชันลบแน่นอน ( $\dot{V}(\mathbf{x}) < 0$ ) เท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงและในทางปฏิบัติแล้ว มีระบบที่มีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ที่ให้อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาเป็นฟังก์ชันกึ่งลบแน่นอน ( $\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0$ ) ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดข้อจำกัดและความผิดพลาดของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟขึ้น ดังนั้นจึงนำไปสู่การพัฒนาเป็น ทฤษฎีเซตยีนง (invariant set theorems) ซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบที่มีอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาเป็นฟังก์ชันกึ่งลบแน่นอน โดยทฤษฎีเซตยีนงแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 3.10 ความหมายทางเรขาคณิตของทฤษฎีเซตยีนง (J.J. Slotine, and W. Li, 1991)

### ทฤษฎีบทที่ 3.2 ทฤษฎีเซตยีนง

พิจารณาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังสมการที่ (3-2) ซึ่งมี  $V(\mathbf{x})$  เป็นฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบ

จากรูปที่ 3.10 กำหนดให้  $\Omega_l$  คือ ขอบเขตของเงื่อนไขเริ่มต้นที่  $\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0$

$R$  คือ จุดทั้งหมดที่อยู่ภายใน  $\Omega_l$  เมื่อ  $\dot{V}(\mathbf{x}) = 0$

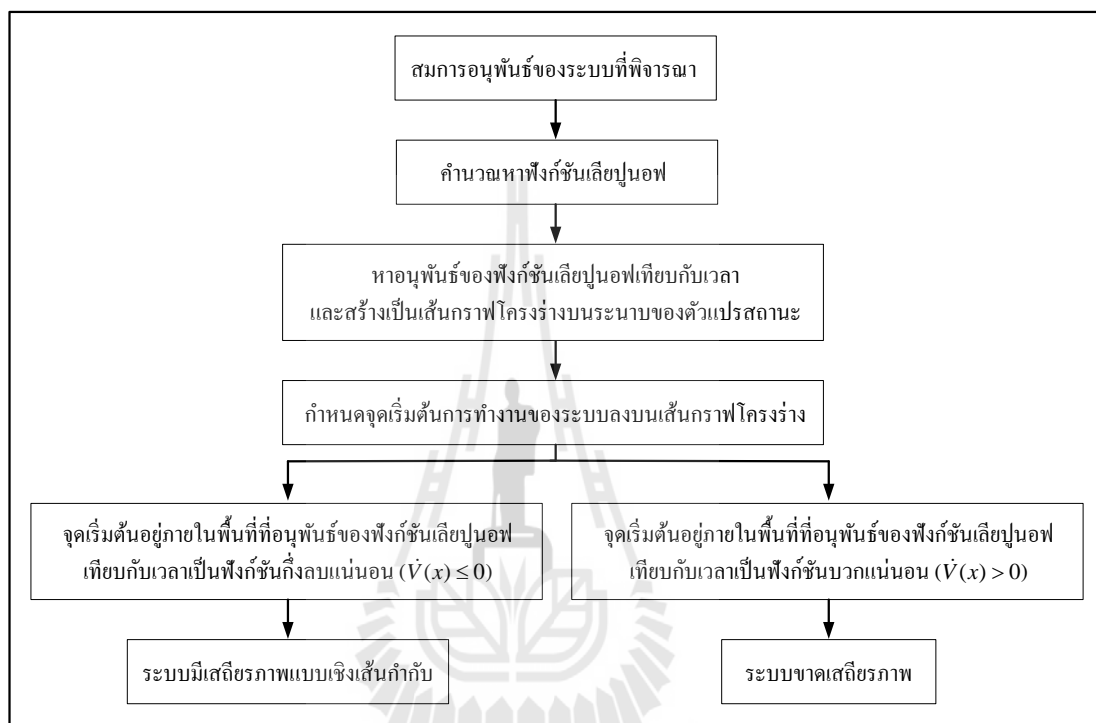
$M$  คือ เซตยีนง ซึ่งหมายถึง จุดปฏิบัติงานของระบบ

ถ้า  $l > 0$  ขอบเขต  $\Omega_l$  หาได้จาก  $V(\mathbf{x}) < l$

และ  $\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0$  สำหรับทุก ๆ ค่าของ  $\mathbf{x}$  ในขอบเขต  $\Omega_l$



จะได้ว่า ถ้าระบบมีจุดเริ่มต้นที่อยู่ภายในขอบเขต  $\Omega_1$  นี้ ระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มต้นดังกล่าวจนกระทั่งเข้าสู่เซตยี่นง  $M$  เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่า ระบบจะมีการลู่เข้าหาจุดปฏิบัติงาน ดังนั้นระบบที่มีอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาที่เพิ่มฟังก์ชันถึงลบแน่นอน จะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับตามทฤษฎีเซตยี่นง



รูปที่ 3.11 แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ

จากบทนิยามและทฤษฎีบททั้งหมดที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น ขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ สามารถสรุปเป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งจากรูปจะพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟจะตั้งต้นจากสมการอนุพันธ์ของระบบที่พิจารณา จากนั้นจะต้องคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟที่สัมพันธ์กับสมการอนุพันธ์ของระบบ ซึ่งในขณะนี้ยังไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษา ค้นคว้า หรืออาจจะลองผิดลองถูก (trial and error) โดยพิจารณาเป็นกรณี ๆ ไป เพื่อให้ได้วิธีการที่เหมาะสมและสามารถที่จะคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบได้ จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้จะถูกนำไปหาอนุพันธ์เทียบกับเวลา และสร้างเป็นเส้นกราฟโครงร่าง (contour plot) ของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาบนระนาบของตัวแปรสถานะของระบบ จากนั้นจะกำหนดจุดเริ่มต้นการทำงานให้กับระบบ

ลงบนเส้นกราฟโครงร่างของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาที่ได้ และจะพิจารณาเสถียรภาพของระบบตามทฤษฎีเซตยีนยง โดยถ้าจุดเริ่มต้นการทำงานของระบบอยู่ภายในพื้นที่ที่อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลามีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ นั่นคือ อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาเป็นฟังก์ชันกึ่งลบแน่นอน ( $\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0$ ) ระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มต้นดังกล่าวและจะเข้าสู่เซตยีนยง ซึ่งหมายถึง จุดปฏิบัติงานของระบบ เมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ ระบบจะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ในขณะที่ ถ้าจุดเริ่มต้นการทำงานของระบบอยู่ภายนอกพื้นที่ที่อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาเป็นฟังก์ชันกึ่งลบแน่นอน หรืออาจกล่าวได้ว่า จุดเริ่มต้นการทำงานของระบบอยู่ภายในพื้นที่ที่อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาเป็นฟังก์ชันบวกแน่นอน ( $\dot{V}(\mathbf{x}) > 0$ ) ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของทฤษฎีเซตยีนยง ดังนั้นจะถือว่าที่จุดปฏิบัติงานนี้ ระบบจะขาดเสถียรภาพ

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ เบื้องต้นจะต้องคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟที่สัมพันธ์กับสมการอนุพันธ์ของระบบในสมการที่ (3-1) ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยวิธีการของคราซอว์สกี โดยมีรายละเอียดดังนี้

### การคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการของคราซอว์สกี

วิธีการของคราซอว์สกีเป็นวิธีการพื้นฐานในการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟในรูปแบบอย่างง่ายสำหรับระบบไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่แทนด้วยแบบจำลองตัวแปรสถานะดังสมการที่ (3-2) โดยมีแนวคิดพื้นฐานคือ การตรวจสอบเงื่อนไขที่เป็นไปตามทฤษฎีบทของคราซอว์สกีนำไปสู่การสร้างฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณาได้ (J.J. Slotine, and W. Li, 1991; H.K. Khalil, 1996) ซึ่งทฤษฎีบทของคราซอว์สกี มีรายละเอียดดังนี้

### ทฤษฎีบทที่ 3.3 ทฤษฎีบทของคราซอว์สกี

พิจารณาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังสมการที่ (3-2)

กำหนดให้  $\mathbf{A}(\mathbf{x})$  คือ เมตริกซ์จาโคเบียนของระบบ นั่นคือ

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}$$

ถ้า  $\mathbf{F} = \mathbf{A} + \mathbf{A}^T$  เป็นเมตริกซ์กึ่งลบแน่นอน ดังนั้นระบบจะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ และฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณาสามารถคำนวณได้จาก

$$V(\mathbf{x}) = \mathbf{f}^T(\mathbf{x})\mathbf{f}(\mathbf{x})$$

การคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ด้วยวิธีการของคราซอว์สกี แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

จากสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (3-1) สามารถคำนวณหาเมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x})$  ได้ดังสมการที่ (3-7) ดังนี้จะได้

$$\mathbf{F} = \mathbf{A} + \mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} -\frac{2r_L}{L} & \frac{1}{C} - \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} - \frac{1}{L} & \frac{2P_{CPL}}{Cv_{o,0}^2} \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

เมตริกซ์  $\mathbf{F}$  จะเป็นเมตริกซ์กึ่งลบแน่นอนได้นั้น ค่าเจาะจงทุกตัวของเมตริกซ์จะต้องไม่มีค่าที่เป็นบวก (Erwin Krausz, Herbert Krausz, and Edward J. Norminton, 2011) แต่จากการตรวจสอบจะพบว่า มีค่าของ  $v_{o,0}^2$  ที่ทำให้ค่าเจาะจงของเมตริกซ์  $\mathbf{F}$  ในสมการที่ (3-9) มีค่าเป็นบวก ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติด้วยวิธีการของคราซอว์สกีได้ ซึ่งการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยทฤษฎีบทของคราซอว์สกีนี้ ถือเป็นวิธีการที่ง่ายและตรงไปตรงมา แต่ก็มีข้อจำกัดคือ ในทางปฏิบัติมีระบบอยู่เป็นจำนวนมากที่เมตริกซ์  $\mathbf{F}$  ไม่มีคุณสมบัติเป็นเมตริกซ์กึ่งลบแน่นอน ซึ่งทำให้ไม่สามารถคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการนี้ได้ และนอกจากนั้นแล้วถ้าระบบที่พิจารณามีความซับซ้อนหรือมีจำนวนตัวแปรสถานะของระบบหลายตัวแปร การตรวจสอบคุณสมบัติดังกล่าวของเมตริกซ์  $\mathbf{F}$  จะทำได้ยากมากด้วยเช่นกัน ซึ่งทำให้การคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการของคราซอว์สกีมีความยุ่งยากและซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟจำเป็นต้องอาศัยฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณา ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้พยายามศึกษาและค้นคว้าวิธีการสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ โดยมุ่งเน้นไปที่วิธีการที่สามารถจะนำมาใช้กับระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งจากการศึกษาและค้นคว้าพบว่า เบริย์ทันและมอเซอร์ได้นำเสนอวิธีการสำหรับการสร้างฟังก์ชันสเกลาร์ของระบบไฟฟ้า ซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวสามารถใช้สร้างเป็นฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ โดยการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอ โดยเบริย์ทันและมอเซอร์ แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

### การคำนวณหาฟังก์ชันเลียปนูฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์

เบรย์ทันและมอเซอร์ได้นำเสนอวิธีการสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันสเกลาร์ที่ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i$ ) และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ ( $v$ ) ของวงจรไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น ที่ประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ซึ่งฟังก์ชันสเกลาร์ดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า ฟังก์ชันศักย์ผสม (mixed potential function) โดยฟังก์ชันศักย์ผสมนี้สามารถนำไปสร้างเป็นฟังก์ชันเลียปนูฟสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปนูฟได้ (Dimitri Jeltsema, and Jacqueliën M. A. Scherpen, 2005; A. Griffo, J. Wang, and D. Howe, 2008; A. Griffo, and J. Wang, 2012) ดังแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ภายใต้กฎของเคอร์ชอฟฟ์ สมการพลวัตของระบบสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเกรเดียนต์ (gradient) ของฟังก์ชันศักย์ผสมได้ดังสมการที่ (3-10) ดังนี้

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = \frac{\partial P(i,v)}{\partial i} \\ C \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial P(i,v)}{\partial v} \end{cases} \quad (3-10)$$

โดยที่  $P(i,v)$  คือ ฟังก์ชันศักย์ผสม ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3-11) ดังนี้

$$P(i,v) = F(i) - G(v) + \langle i, \gamma \cdot v \rangle \quad (3-11)$$

โดยที่  $F(i)$  คือ ผลรวมศักย์กระแส (total current potential) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3-12)

$G(v)$  คือ ผลรวมศักย์แรงดัน (total voltage potential) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3-13)

$\gamma$  คือ ค่าคงที่ระหว่าง  $-1, 0, 1$  ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะการเชื่อมต่อของวงจร (circuit topology)

$$F(i) = \sum_{\rho \in N_i} \int v_{\rho} di \quad (3-12)$$

โดยที่  $N_i$  คือ พจน์ของแรงดันที่มีค่าขึ้นอยู่กับกระแส  $v_\rho = f(i_\rho)$  ซึ่งอาจจะ  
เป็น แหล่งจ่ายแรงดันแบบอิสระ (independent voltage source)  
หรือแหล่งจ่ายกระแสแบบอิสระ (independent current source)  
หรือตัวต้านทานที่ควบคุมด้วยกระแส (current controlled  
resistor)

$$G(v) = \sum_{\rho \in N_i} i_\rho dv \quad (3-13)$$

โดยที่  $N_v$  คือ พจน์ของกระแสที่มีค่าขึ้นอยู่กับแรงดัน  $i_\rho = f(v_\rho)$  ซึ่งก็คือ  
ตัวต้านทานที่ควบคุมด้วยแรงดัน (voltage controlled resistor)

จากนั้นใช้ผลคูณภายใน (inner product) ในรูปแบบทั่วไป นั่นคือ  $\langle x, y \rangle = x^T y$  กับ  
ฟังก์ชันสเกียล์สมที่คำนวณได้ดังสมการที่ (3-11) ดังนั้นจะสามารถสร้างเป็นฟังก์ชันเลียปูนอฟได้  
ดังสมการที่ (3-14)

$$V(i, v) = \frac{1}{2} \left\langle \frac{\partial P(i, v)}{\partial i}, L^{-1} \frac{\partial P(i, v)}{\partial i} \right\rangle + \frac{1}{2} \left\langle \frac{\partial P(i, v)}{\partial v}, C^{-1} \frac{\partial P(i, v)}{\partial v} \right\rangle + \alpha \cdot P(i, v) \quad (3-14)$$

โดยที่  $\alpha$  คือ ค่าคงที่ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3-15) ดังนี้

$$\alpha = \frac{\mu_1 - \mu_2}{2} \quad (3-15)$$

เมื่อ

$$\begin{cases} \mu_1 = \frac{\min K_1}{L} \\ \mu_2 = \frac{\min K_2}{C} \end{cases} \quad (3-16)$$

$$\text{และ} \quad \begin{cases} K_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 F(i)}{\partial i^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial i} \left[ \left( \frac{\partial F(i)}{\partial i} + \gamma \right) \cdot L^{-1} \right] \cdot L \\ K_2 = \frac{\partial^2 G(v)}{\partial v^2} \end{cases} \quad (3-17)$$

การคำนวณหาฟังก์ชันเลียบอนุพันธ์ของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์ สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

จากสมการพลวัตของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (3-1) สามารถคำนวณหาผลรวมศักย์กระแสและผลรวมศักย์แรงดันของระบบได้ ดังสมการที่ (3-18) และสมการที่ (3-19) ตามลำดับ ดังนี้

$$F(i) = -\int r_L i_L di_L + \int V_S di_L = -\frac{1}{2} r_L i_L^2 + V_S i_L \quad (3-18)$$

$$G(v) = \int_0^{v_o} \frac{P_{CPL}}{v_o} dv_o \quad (3-19)$$

จากสมการที่ (3-11) เมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีค่า  $\gamma = -1$  และผลรวมศักย์กระแสและผลรวมศักย์แรงดันมีค่าดังสมการที่ (3-18) และสมการที่ (3-19) ตามลำดับ ดังนั้นฟังก์ชันศักย์ผสมของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงได้ดังสมการที่ (3-20) ดังนี้

$$P(i_L, v_o) = -\frac{1}{2} r_L i_L^2 + \int_0^{v_o} \frac{P_{CPL}}{v_o} dv_o + (V_S - v_o) i_L \quad (3-20)$$

จากฟังก์ชันศักย์ผสมที่ได้ดังสมการที่ (3-20) จะพบว่า สมการพลวัตของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (3-1) ได้มาจากเกรเดียนต์ของฟังก์ชันศักย์ผสมดังกล่าว ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ (3-10)

จากสมการที่ (3-17) สามารถคำนวณหาค่า  $K_1$  และ  $K_2$  ได้ดังสมการที่ (3-21) ดังนี้

$$\begin{cases} K_1 = -r_L \\ K_2 = \frac{P_{CPL}}{v_o^2} \end{cases} \quad (3-21)$$

จากนั้นแทนค่า  $K_1$  และ  $K_2$  ที่คำนวณได้ลงในสมการที่ (3-16) จะได้

$$\begin{cases} \mu_1 = -\frac{r_L}{L} \\ \mu_2 = \frac{P_{CPL}}{Cv_{O,\min}^2} \end{cases} \quad (3-22)$$

หากระบบมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ จะได้ว่า  $\mu_1 + \mu_2 \geq 0$  ดังนั้นจะได้

$$v_{O,\min}^2 = \frac{P_{CPL} \cdot L}{C \cdot r_L} \quad (3-23)$$

แทนค่า  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  และ  $v_{O,\min}^2$  ที่คำนวณได้ตั้งสมการที่ (3-22) และสมการที่ (3-23) ลงในสมการที่ (3-15) จะได้

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{-P_{CPL}}{Cv_{O,\min}^2} \right) - \left( \frac{-r_L}{L} \right) \right] = \frac{r_L}{L} \quad (3-24)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3-14) สมการที่ (3-20) และสมการที่ (3-24) จะสามารถคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติได้ ดังแสดงในสมการที่ (3-25) ดังนี้

$$V(i_L, v_o) = \frac{r_L}{L} P(i_L, v_o) + \frac{1}{2L} (V_s - r_L i_L - v_o)^2 + \frac{1}{2C} \left( \frac{P_{CPL}}{v_o} - i_L \right)^2 \quad (3-25)$$

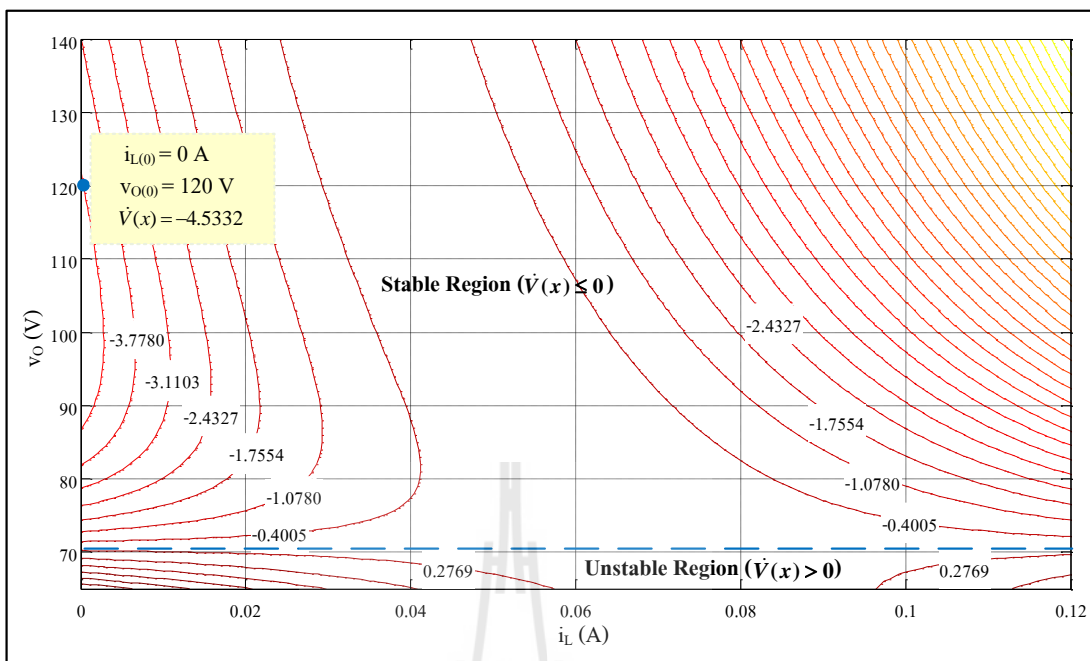
การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ จะอาศัยฟังก์ชันเลียปูนอฟ

ที่คำนวณได้จากวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์ดังสมการที่ (3-25) ซึ่งจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณจะถูกนำไปหาอนุพันธ์เทียบกับเวลา ดังนั้นจะได้ อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลา ดังแสดงในสมการที่ (3-26) ดังนี้

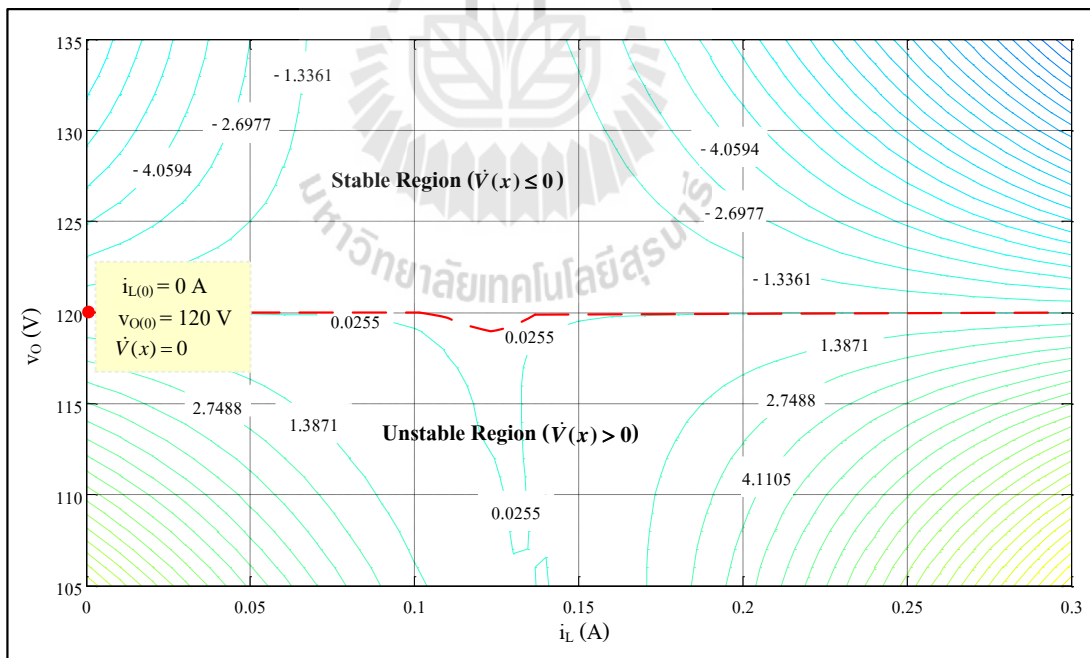
$$\begin{aligned} \dot{V}(i_L, v_o) = & \left( \frac{1}{C} i_L - \frac{P_{CPL}}{Cv_o} \right) \left( \frac{-r_L}{L} i_L - \frac{1}{L} v_o + \frac{V_S}{L} \right) \\ & + \left( \frac{1}{L} v_o - \frac{P_{CPL}^2}{Cv_o^3} - \frac{V_S}{L} + \frac{P_{CPL}}{Cv_o^2} i_L + \frac{r_L P_{CPL}}{L|v_o|} \right) \left( \frac{1}{C} i_L - \frac{P_{CPL}}{Cv_o} \right) \end{aligned} \quad (3-26)$$

จากอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาที่ได้ดังสมการที่ (3-26) สามารถสร้างเป็นเส้นกราฟโครงร่างบนระนาบของตัวแปรสถานะของระบบ นั่นคือ  $i_L$  และ  $v_o$  เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 5 W 14.4 W และ 14.5 W ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ถึงรูปที่ 3.14 ตามลำดับ และกำหนดให้ระบบมีค่าเริ่มต้น  $i_L(0) = 0$  A และ  $v_o(0) = 120$  V ตามทฤษฎีเซตยี่นง ถ้าจุดเริ่มต้นการทำงานของระบบอยู่ภายในพื้นที่ที่อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาเป็นฟังก์ชันกึ่งลบแน่นอน ( $\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0$ ) ระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มต้นดังกล่าวและจะเข้าสู่เซตยี่นง ซึ่งในที่นี้คือจุดปฏิบัติงานของระบบเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ ระบบจะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ และเมื่อพิจารณาเส้นกราฟโครงร่างที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 5 W และ 14.4 W ดังรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13 ตามลำดับ จะพบว่า เส้นกราฟโครงร่างปรากฏจุดเริ่มต้นการทำงานของระบบอยู่ภายในพื้นที่ที่อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาเป็นฟังก์ชันกึ่งลบแน่นอน ( $\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0$ ) ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของทฤษฎีเซตยี่นง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่สภาวะดังกล่าวนี้ระบบมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ในขณะที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 14.5 W เส้นกราฟโครงร่างแสดงดังรูปที่ 3.14 ปรากฏจุดเริ่มต้นการทำงานของระบบอยู่ภายในพื้นที่ที่อนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาเป็นฟังก์ชันบวกแน่นอน ( $\dot{V}(\mathbf{x}) > 0$ ) ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของทฤษฎีเซตยี่นง ระบบจึงขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 จะมีเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าอยู่ในช่วง 0 W ถึง 14.4 W และจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่ามากกว่า 14.4 W แต่อย่างไรก็ตามข้อสรุปดังกล่าวจะเป็นจริงสำหรับค่าเริ่มต้น  $i_L(0) = 0$  A และ  $v_o(0) = 120$  V เท่านั้น ถ้าค่าเริ่มต้นของระบบมีการเปลี่ยนแปลงจะต้องทำการวิเคราะห์เสถียรภาพใหม่ตามหลักการที่ได้นำเสนอไว้ในข้างต้น

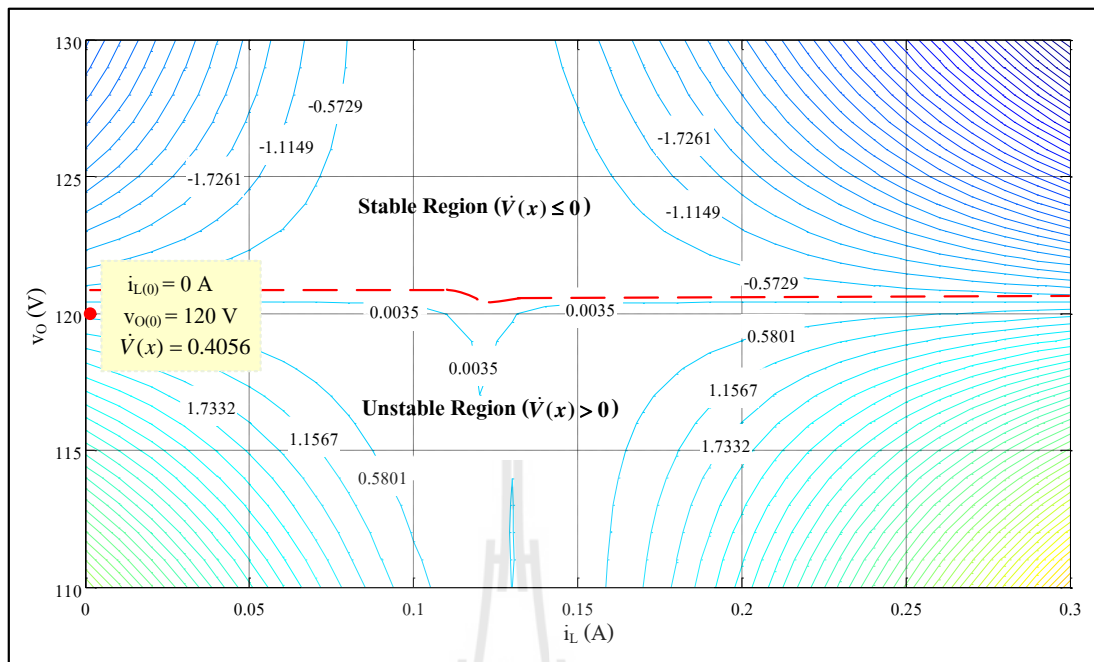




รูปที่ 3.12 เส้นกราฟโครงร่างของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาที่  $P_{CPL} = 5 \text{ W}$



รูปที่ 3.13 เส้นกราฟโครงร่างของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาที่  $P_{CPL} = 14.4 \text{ W}$

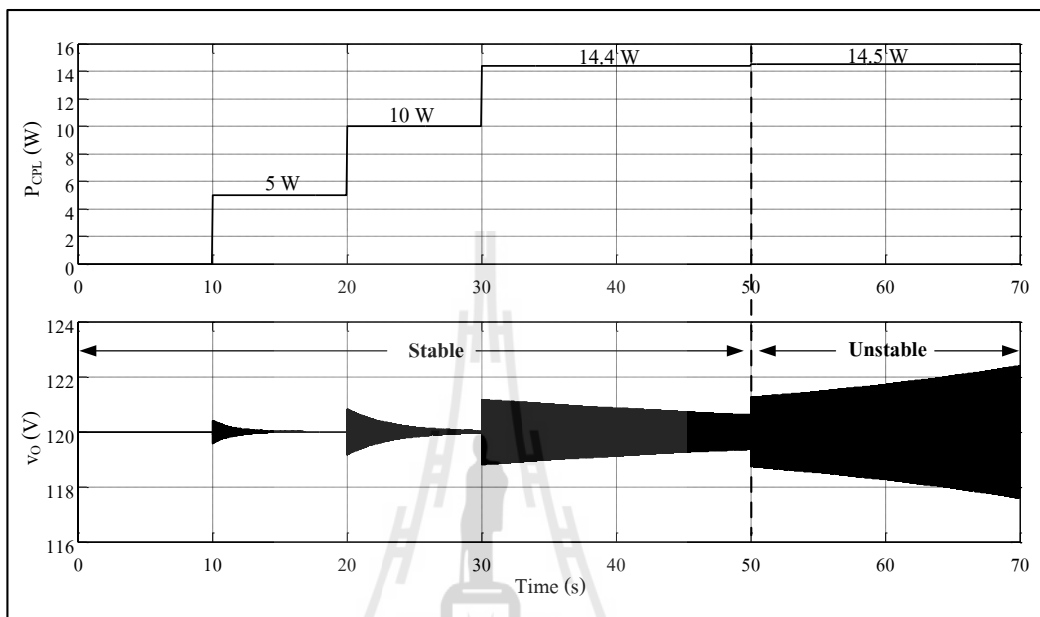


รูปที่ 3.14 เส้นกราฟโครงร่างของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาที่  $P_{CPL} = 14.5$  W

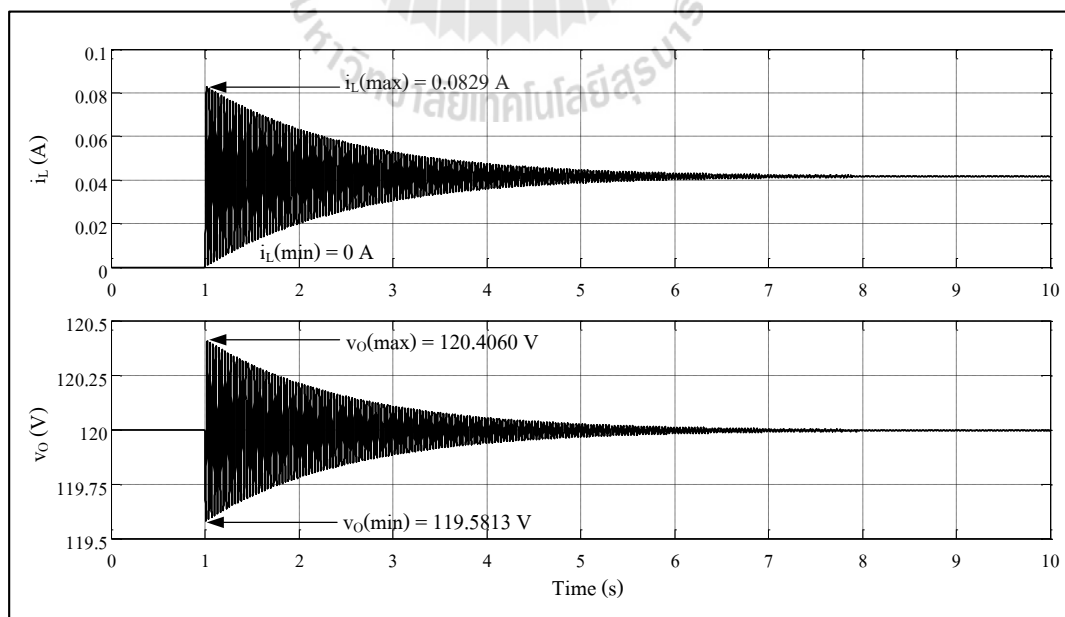
### 3.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ

การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ สามารถดูได้จากภาคผนวก ก.1 และผลการยืนยันการขาดเสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ แสดงได้ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งจากรูปที่จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 14.5 W ระบบจะขาดเสถียรภาพ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จะพบว่า มีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นนั้น ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่ามากกว่า 14.3 W ในขณะที่ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสและวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่ามากกว่า 14.4 W ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ จะพบว่า มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากความไม่ชัดเจนเมื่อค่าจะจอยู่บนแกนจินตภาพ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี

การวิเคราะห์ห้ระนาบเฟสและวิธีการโดยตรงของเล็ญนอฟ ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยตรง หรือเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ ให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ



รูปที่ 3.15 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.16 สัญญาณ  $i_L$  และ  $v_o$  จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่  $P_{CPL} = 5$  W

รูปที่ 3.16 เป็นการยืนยันการประมาณการสั้น ไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติการ ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 5 W จากรูปจะสังเกตได้ว่า กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง ( $i_L$ ) จะมีการสั้น ไกวสูงสุดอยู่ในช่วง  $0 - 0.0829$  A และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ( $v_C$ ) จะมีการสั้น ไกวสูงสุดอยู่ในช่วง  $119.5813 - 120.4060$  V ก่อนที่การสั้น ไกวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติการของระบบ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการวิเคราะห์หระนาบเฟสที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 พบว่าให้ผลที่ตรงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หระนาบเฟส นอกจากจะสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั้น ไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติการได้อย่างถูกต้องแม่นยำอีกด้วย ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีข้อหนึ่งของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หระนาบเฟส

เมื่อเปรียบเทียบความยากง่าย รวมทั้งข้อดีและข้อเสียของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หระนาบเฟสกับวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ จะพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟมีข้อจำกัดคือ ไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ และในทางปฏิบัติการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้นจึงทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นแล้วในหัวข้อที่ 3.3.3 ที่ผ่านมา ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หระนาบเฟส เป็นวิธีการที่ง่าย มีการคำนวณไม่ซับซ้อน แต่สามารถจะให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้องและแม่นยำเช่นเดียวกับผลที่ได้จากวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ และนอกจากนั้นแล้ว การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หระนาบเฟสเป็นวิธีการทางกราฟิก ดังนั้นจึงสามารถที่จะแสดงถึงรูปแบบการเคลื่อนที่หรือการตอบสนองทางพลวัตของระบบได้อีกด้วย ซึ่งรูปแบบการเคลื่อนที่บนระนาบเฟสที่ได้นี้สามารถใช้ตรวจสอบคุณลักษณะสมบัติของระบบ รวมถึงข้อมูลเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบ ซึ่งอาจจะเป็นการสั้น ไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติการ หรือวงรอบขีดจำกัดของระบบได้ ดังนั้นในหัวข้อถัดไป ซึ่งจะเป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หระนาบเฟส เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถดำเนินการวิเคราะห์ได้ง่ายกว่าวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ

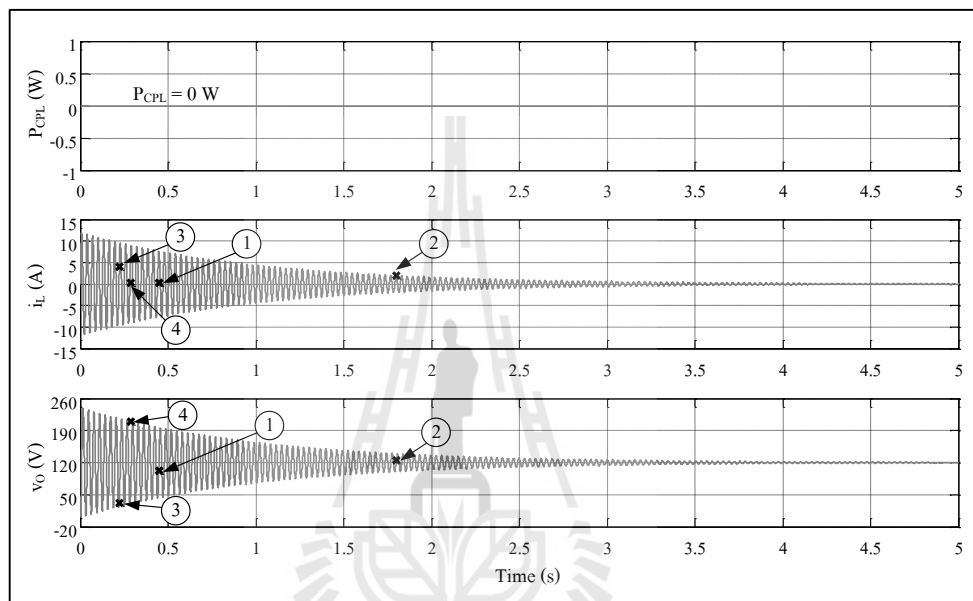
### 3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

เนื้อหาในหัวข้อที่ 3.4 นี้จะเป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ซึ่งจากขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ในหัวข้อที่ 3.3.2 และจากขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ในหัวข้อที่ 3.3.3 จะสังเกตได้ว่า สิ่งที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทั้งสองวิธีนี้คือ การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานให้กับระบบ ซึ่งการที่ต้องกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานให้กับระบบนี้ ทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทั้งสองวิธีดังกล่าวข้างต้น สามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดได้ และเนื่องจากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสเป็นวิธีการที่สามารถดำเนินการวิเคราะห์ได้ง่ายกว่าวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

หลักการของการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส คือ ในช่วงที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดนั้น จุดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานให้กับระบบ จากนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบสามารถดำเนินการ โดยอาศัยหลักการและขั้นตอนของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสที่ได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.3.2 ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

รูปที่ 3.17 เป็นสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง ( $i_L$ ) และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ( $v_o$ ) เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 0 W และกำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบคือ  $i_L(0) = 0$  A และ  $v_o(0) = 0$  V จากรูปจะสังเกตได้ว่า สัญญาณของ  $i_L$  และ  $v_o$  จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงสภาวะชั่วคราว (transient) เป็นช่วงที่สัญญาณเกิดการสั่นไหวก่อนที่จะมีการเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบในเวลาต่อมา และช่วงสภาวะอยู่ตัว (steady-state) เป็นช่วงที่ระบบเข้าสู่จุดปฏิบัติงานหรือจุดสมดุลของระบบแล้ว นั่นคือจุดที่  $i_L$  มีค่าเท่ากับ 0 A และ  $v_o$  มีค่าเท่ากับ 120 V โดยปกติการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด

จะเกิดขึ้นในช่วงสภาวะชั่วคราว ดังนั้นในหัวข้อนี้จะดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซิงอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจากค่าโหลด 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 จุดที่ 2 จุดที่ 3 และจุดที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งรายละเอียดของแต่ละจุดการเปลี่ยนแปลงแสดงไว้ดังตารางที่ 3.2



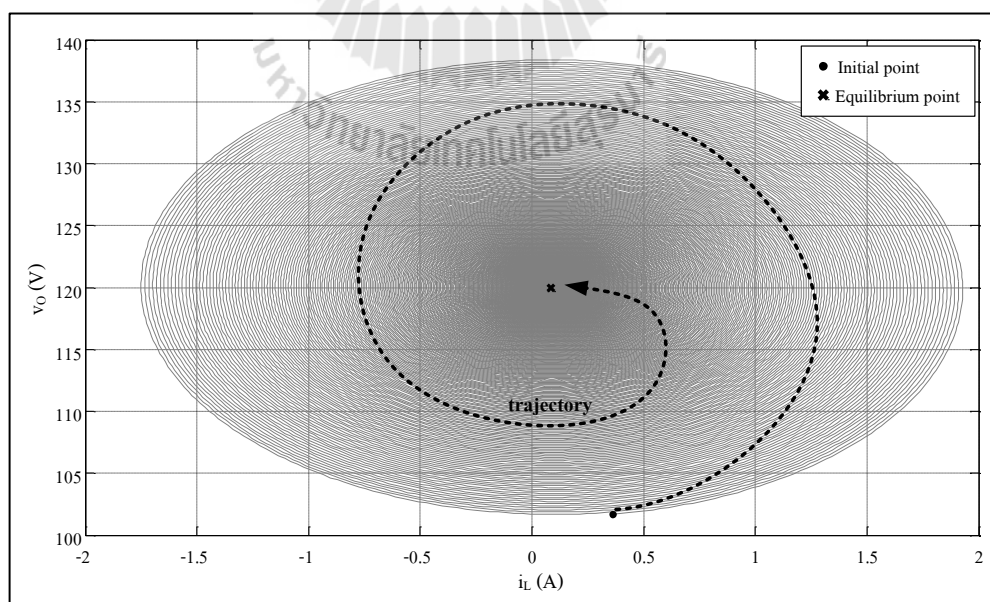
รูปที่ 3.17 สัญญาณ  $i_L$  และ  $v_o$  ที่  $P_{CPL} = 0$  W เมื่อ  $i_L(0) = 0$  A และ  $v_o(0) = 0$  V

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด

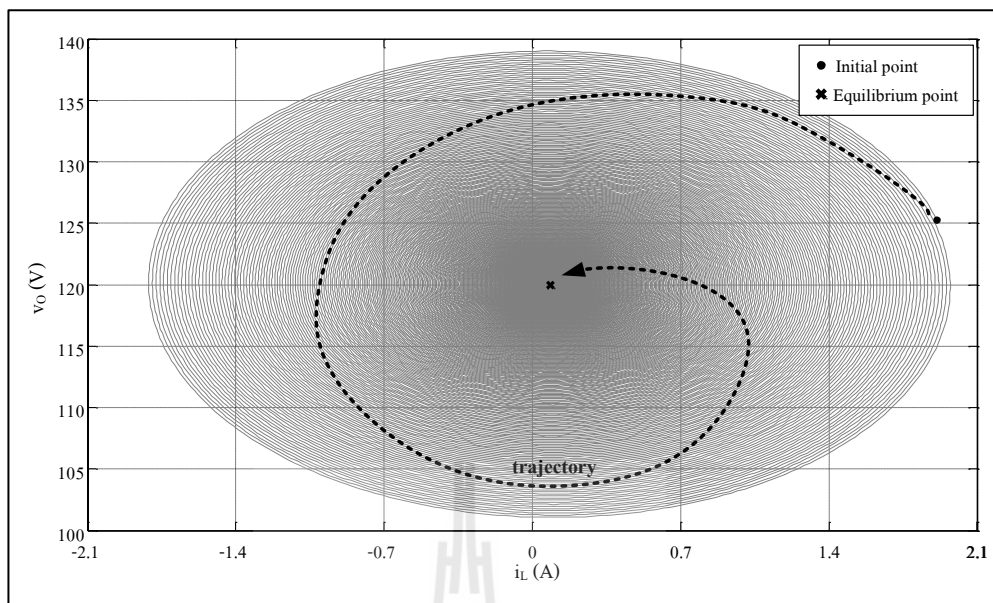
	Time (s)	$i_L$ (A)	$v_o$ (V)
จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1	0.45	0.360	101.70
จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 2	1.80	1.910	125.3
จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 3	0.22	3.978	32.31
จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4	0.29	0.303	209.00

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ค่าของ  $i_L$  และ  $v_o$  ที่จุดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานให้กับระบบ ดังนั้นจากสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาตั้งสมการที่ (3-1) และ

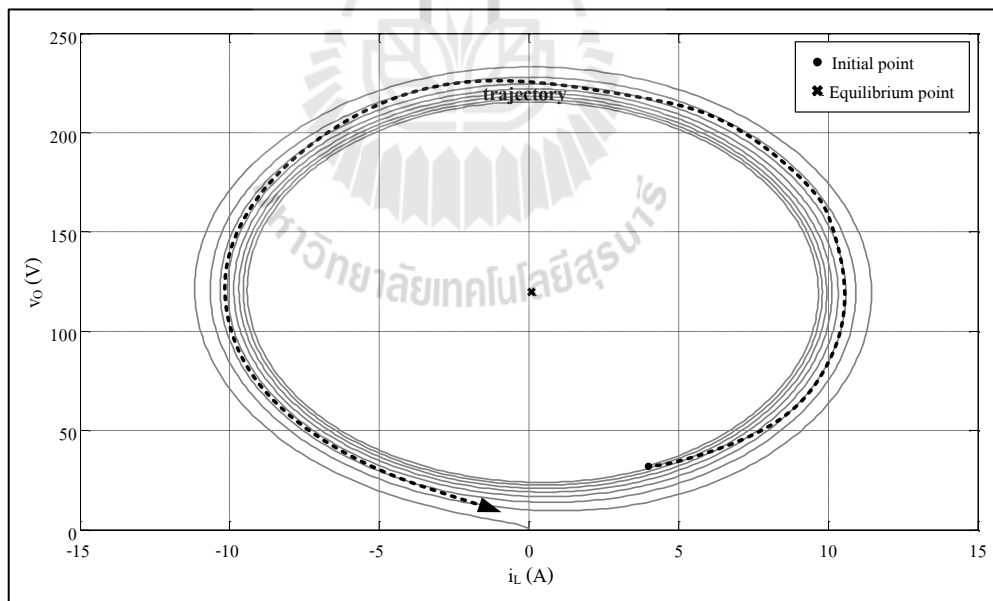
เงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานที่ได้ดังตารางที่ 3.2 สามารถสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบ เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 จุดที่ 2 จุดที่ 3 และจุดที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ถึงรูปที่ 3.21 ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ในรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มต้นจากจุดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว และจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานก่อนที่จะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานนี้เป็นแบบโพลัสเสถียร ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพที่จุดการเปลี่ยนแปลงนี้ ในขณะที่รูปที่ 3.20 และรูปที่ 3.21 นั้น การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มต้นจากจุดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว โดยจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานและออกห่างจากจุดปฏิบัติงานของระบบมากยิ่งขึ้นอย่างไม่มีการสิ้นสุดเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานนี้เป็นแบบโพลัสไม่เสถียร ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพที่จุดการเปลี่ยนแปลงนี้ การยืนยันการขาดเสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 ถึงจุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4 จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.22 ถึงรูปที่ 3.25 ดังนี้



รูปที่ 3.18 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1

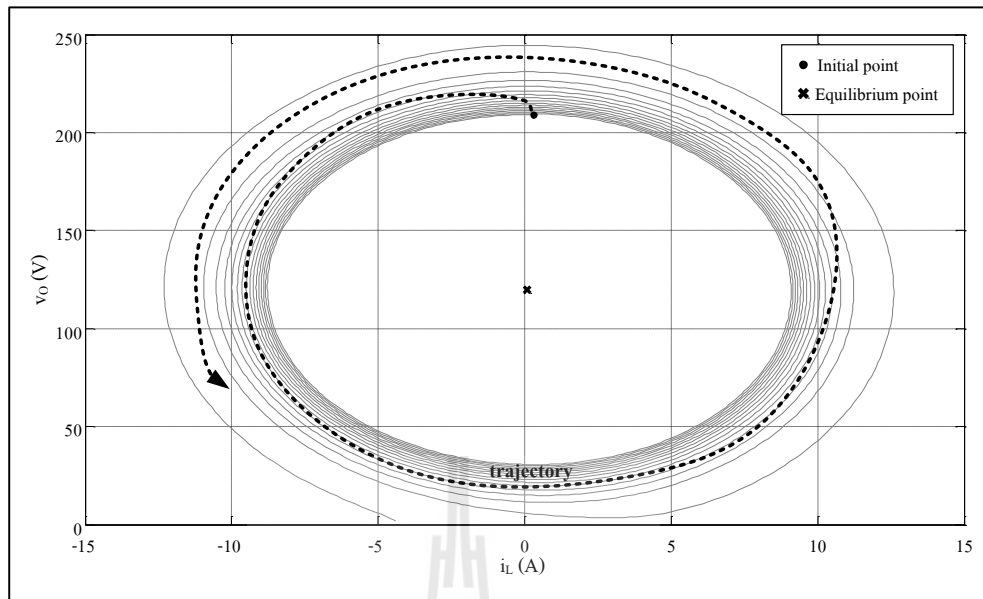


รูปที่ 3.19 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 2

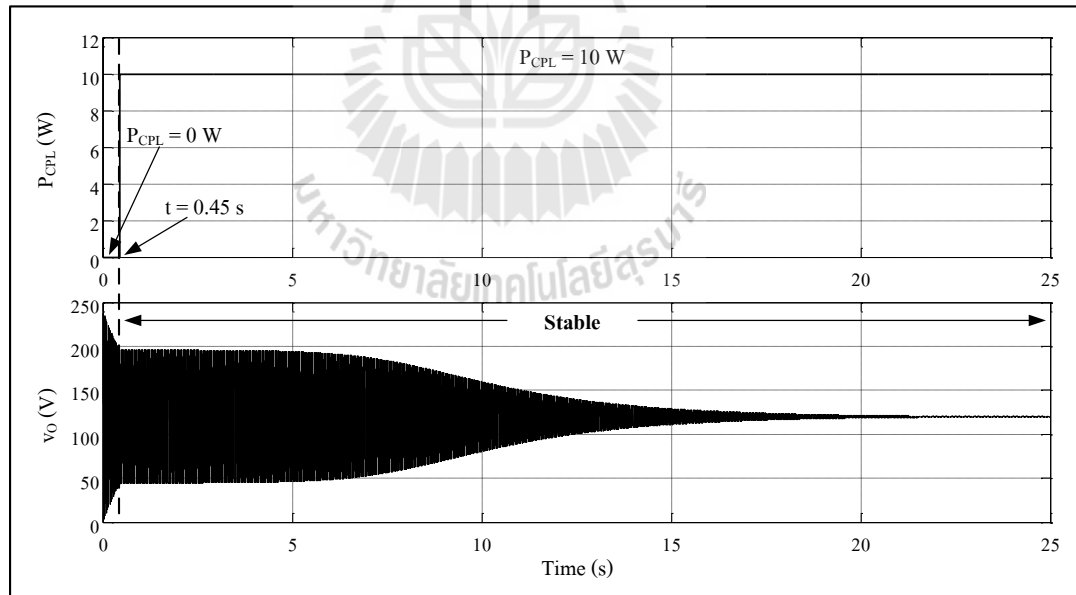


รูปที่ 3.20 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 3

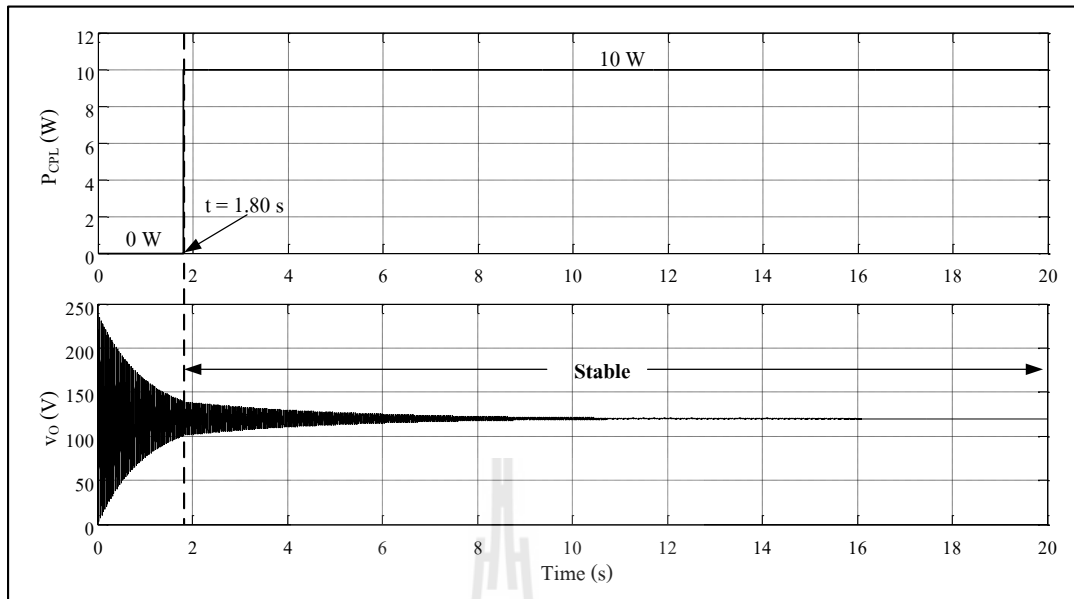




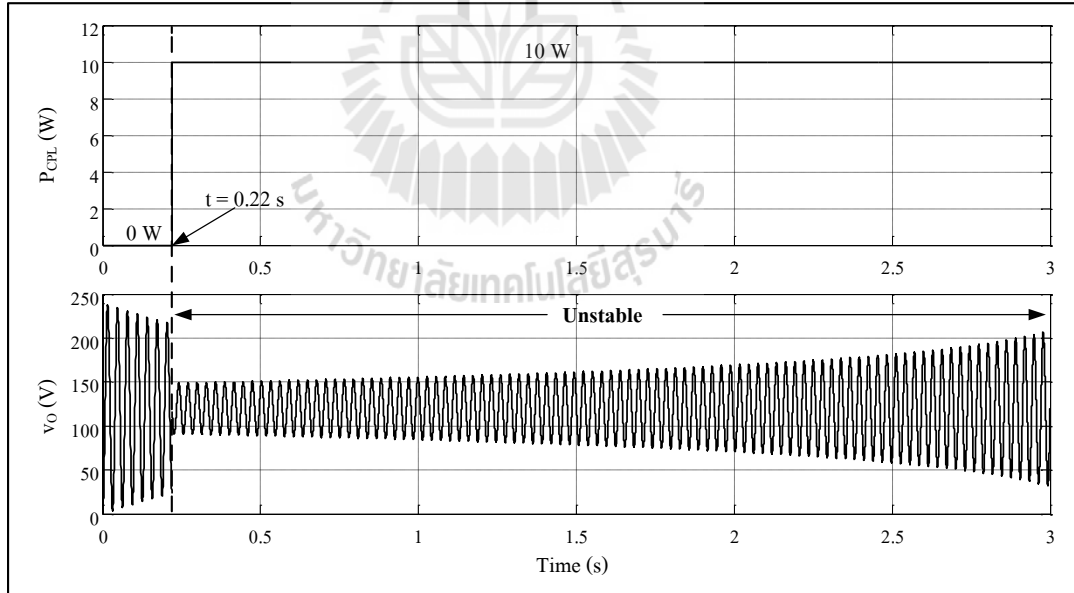
รูปที่ 3.21 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4



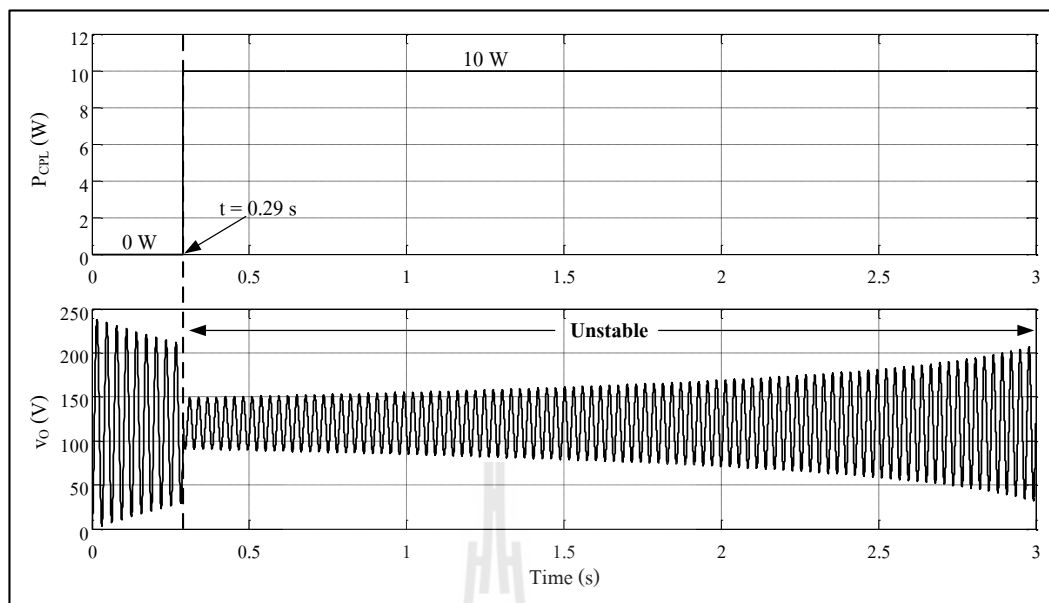
รูปที่ 3.22 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1



รูปที่ 3.23 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 2



รูปที่ 3.24 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 3



รูปที่ 3.25 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4

รูปที่ 3.22 ถึงรูปที่ 3.25 เป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 จุดที่ 2 จุดที่ 3 และจุดที่ 4 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.22 และจุดที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.23 เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ระบบจะเริ่มต้นจากจุดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวและจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบในเวลาต่อมา ซึ่งแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพ ในขณะที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.24 และจุดที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.25 เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ระบบจะเริ่มต้นจากจุดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวและออกห่างจากจุดปฏิบัติงานของระบบมากยิ่งขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งสังเกตได้จากการสั่นไหวของสัญญาณ  $v_o$  จะมีค่ามากยิ่งขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นที่จุดการเปลี่ยนแปลงนี้ ระบบจะขาดเสถียรภาพ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส พบว่ามีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ในหัวข้อที่ 3.3.1 จะพบว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้ระบุว่า ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบ

อุดมคติมีค่าเท่ากับ 10 W ระบบจะมีเสถียรภาพอย่างแน่นอน เนื่องจากส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่าเป็นลบ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วที่สภาวะดังกล่าว ระบบอาจจะขาดเสถียรภาพเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดได้ ซึ่งการขาดเสถียรภาพในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 10 W สามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ด้วยเหตุผลนี้จึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น นอกจากจะให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความคลาดเคลื่อน ซึ่งเกิดจากความไม่ชัดเจนเมื่อค่าเจาะจงของระบบอยู่บนแกนจินตภาพแล้ว การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นนี้จะมีความถูกต้องของการวิเคราะห์ในช่วงการทำงานที่แคบ หรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดได้อีกด้วย

ในทางปฏิบัติจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดนั้น สามารถเกิดขึ้นได้อย่างมากมายหลากหลายจุด ถ้าหากต้องการหลีกเลี่ยงการขาดเสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดได้นั้น จะต้องใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส มาวิเคราะห์โดยพิจารณาที่ละจุดการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปได้ทั้งหมด จนกระทั่งครบทุกจุดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งกว่าจะวิเคราะห์ได้ครบทุกจุดนั้นจะต้องใช้เวลานาน ดังนั้นคำถามที่ตามมาก็คือ จะสามารถใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการใดได้บ้าง ที่สามารถหาขอบเขตหรือพื้นที่ของจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดที่จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ซึ่งตรงนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ จะเข้ามามีบทบาทและเป็นประโยชน์อย่างมาก เพราะจากทฤษฎีเซตยีนยง ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้ในวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่อยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ สามารถที่จะประยุกต์ใช้เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้ โดยขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับคือ ขอบเขตที่รับประกันว่า ไม่ว่าระบบจะเริ่มต้นจากจุดเริ่มต้นใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตนี้ หรือระบบอาจจะถูกรบกวนแต่ยังคงอยู่ภายในขอบเขตนี้ ท้ายที่สุดแล้วระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มต้นดังกล่าวจนกระทั่งเข้าสู่จุดสมดุลหรือจุดปฏิบัติงานของระบบอีกครั้ง ซึ่งแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ดังนั้นจึงสามารถที่จะพิจารณาให้ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับคือ ขอบเขตของจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดที่จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เพื่อใช้สำหรับการหลีกเลี่ยงการขาดเสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด แสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 3.5 ดังนี้

### 3.5 การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรไฟฟ้ากำลังที่เรียบง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

จากทฤษฎีเซตยีนยง ดังทฤษฎีบทที่ 3.2 ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ( $\Omega_1$  หรือ RAS) คำนวณได้ดังสมการที่ (3-27) ดังนี้

$$RAS = \{ \mathbf{x} : V(\mathbf{x}) \leq l, \dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0 \} \quad (3-27)$$

จากสมการที่ (3-27) จะพบว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับคือ ขอบเขตของจุดเริ่มต้นการทำงานหรือจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด ( $\mathbf{x}$ ) ที่ทำให้  $V(\mathbf{x}) \leq l$  โดยที่  $l$  คือขอบเขตที่รับประกันว่าระบบจะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับอย่างแน่นอน ( $\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0$ ) ดังนั้นการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับคือ การหาค่า  $l$  ที่มากที่สุด ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ซึ่งจุดเริ่มต้นการทำงานหรือจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดที่อยู่ภายในขอบเขตที่ทำให้  $V(\mathbf{x}) \leq l$  นี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน

การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับด้วยทฤษฎีเซตยีนยง เป็นการวิเคราะห์ที่อยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยฟังก์ชันลียปูนอฟของระบบที่พิจารณา ดังนั้นการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรไฟฟ้ากำลังที่เรียบง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ จะอาศัยฟังก์ชันศักย์ผลสมและฟังก์ชันลียปูนอฟของระบบที่คำนวณได้จากวิธีการที่นำเสนอ โดยเบรย์ตันและมอเซอร์ดังสมการที่ (3-20) และสมการที่ (3-25) ตามลำดับ โดยรายละเอียดจะได้รับการอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.5.1 แต่อย่างไรก็ตามฟังก์ชันลียปูนอฟที่คำนวณได้จากวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ตันและมอเซอร์จะมีความตึง (conservatism) ในแง่ของเสถียรภาพเป็นอย่างมาก ซึ่งทำให้ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ค่อนข้างจำกัดวงแคบ เมื่อเทียบกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริง (actual region of asymptotic stability or Actual RAS) ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้มีความตึงน้อยลง โดยรายละเอียดแสดงได้ในหัวข้อที่ 3.5.2

### 3.5.1 การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์

ภายใต้เงื่อนไขดังสมการที่ (3-28) ระบบที่มีฟังก์ชันศักย์ผสมและฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้จากวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์ จะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (Dimitri Jeltsema, and Jacquelen M. A. Scherpen, 2005)

$$\mu_1 + \mu_2 \geq 0 \quad (3-28)$$

เมื่อ  $\mu_1$  และ  $\mu_2$  คำนวณได้จากสมการที่ (3-22) ดังนั้นเงื่อนไขของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แสดงได้ดังสมการที่ (3-29) ดังนี้

$$v_o > v_{o,\min} = \sqrt{\frac{L \cdot P_{CPL}}{C \cdot r_L}} \quad (3-29)$$

จากฟังก์ชันศักย์ผสมและฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (3-20) และสมการที่ (3-25) ตามลำดับ และจากเงื่อนไขของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ได้ดังสมการที่ (3-29) ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ คำนวณได้ดังสมการที่ (3-30) ดังนี้

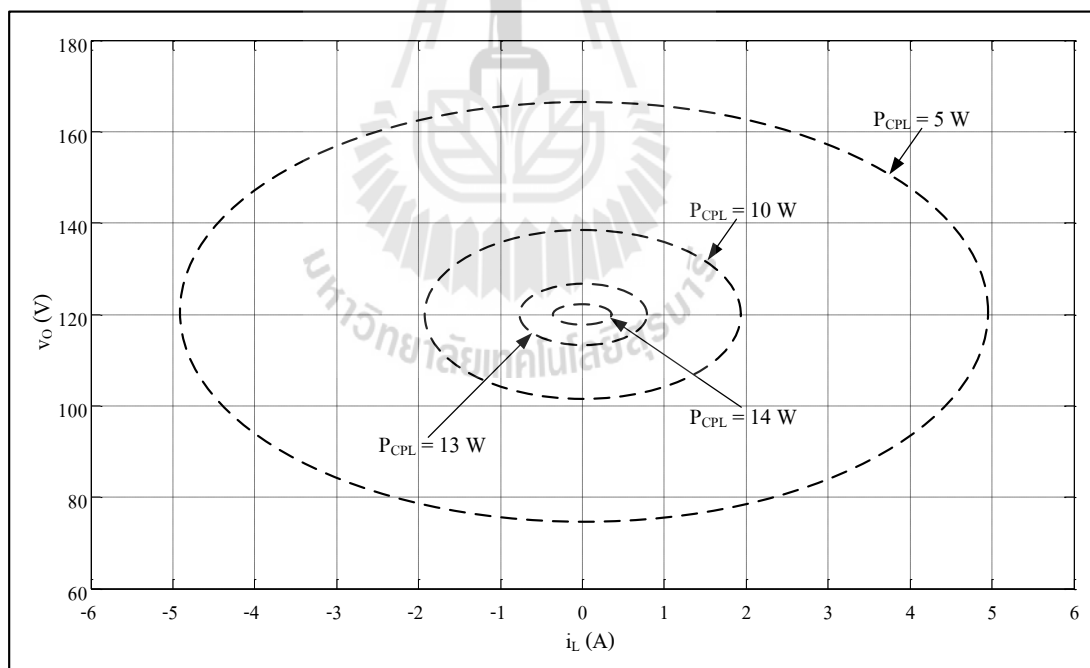
$$RAS = \{ (i_L, v_o) : V(i_L, v_o) \leq \max V(i_L, v_{o,\min}) \} \quad (3-30)$$

จากสมการที่ (3-30) สามารถเขียนเป็นโปรแกรมสำหรับการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับด้วย M-file บนโปรแกรม MATLAB ได้ โดยรายละเอียดของโปรแกรมสามารถดูได้จากภาคผนวก ข. ซึ่งการทำงานของโปรแกรมจะเริ่มต้นจากการคำนวณหาค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ( $\max V(i_L, v_{o,\min})$ ) ด้วยการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical computation) โดยกำหนดให้  $v_o$  มีค่าเท่ากับ  $v_{o,\min}$  ซึ่งเป็นเงื่อนไขของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา จากนั้นจะเปลี่ยนแปลงค่า  $i_L$  พร้อมกับคำนวณหาค่าของฟังก์ชันเลียปูนอฟไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ จากค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่คำนวณได้ จะถูกนำไปสร้าง

เส้นกราฟโครงร่างบนระนาบของตัวแปรสถานะ เพื่อสร้างเป็นขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรม จะได้ค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 5 W 10 W 13 W และ 14 W ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 5 W 10 W 13 W และ 14 W ดังแสดงในรูปที่ 3.26

ตารางที่ 3.3 ค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ

$P_{CPL}$ (W)	5	10	13	14
$v_{O,\min}$ (V)	70.71	100.00	114.02	118.32
$\max V(i_L, v_{O,\min})$	24338.48	4092.10	481.05	161.83



รูปที่ 3.26 ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่  $P_{CPL} = 5$  W 10 W 13 W และ 14 W

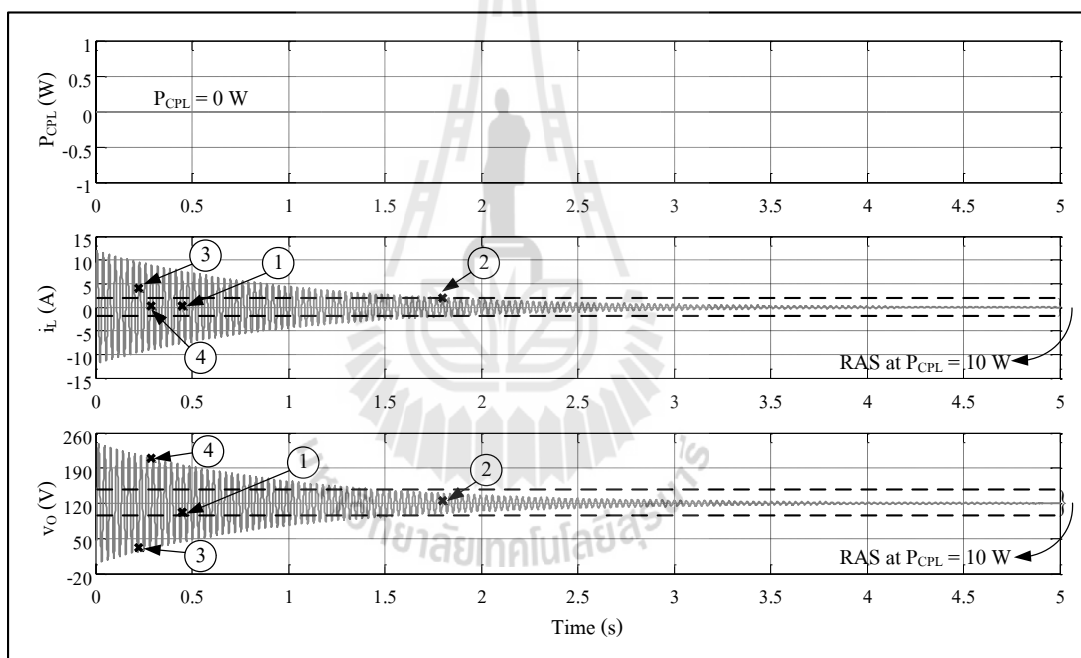
จากรูปที่ 3.26 จะพบว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเพิ่มมากขึ้น ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจะลดลง ซึ่งทำให้จำนวนของจุดเริ่มต้นการทำงาน

หรือจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดที่อยู่ภายในขอบเขตที่รับประกันว่าจะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอนมีอยู่ไม่มากนัก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด หรือการรบกวนระบบ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ ในขณะที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าน้อย ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จะกว้างขึ้น ซึ่งทำให้จำนวนของจุดเริ่มต้นการทำงานหรือจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดที่อยู่ภายในขอบเขตที่รับประกันว่าจะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอนมีอยู่มากมายหลากหลายจุด ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด หรือการรบกวนระบบในกรณีนี้ จะต้องอยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ถึงจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 ถึงจุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ร่วมกับการพิจารณาขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 10 W ที่ประมาณได้ดังแสดงในรูป 3.26 จะสามารถสร้างขอบเขตของจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอนได้ โดยขอบเขตดังกล่าวแทนด้วยเส้นประ ในรูปที่ 3.27 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า จุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W จุดที่ 1 และจุดที่ 2 อยู่ภายในขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ซึ่งจากนิยามของขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับตามทฤษฎีเซตยูเนียนที่กล่าวไว้ว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับคือ ขอบเขตของจุดเริ่มต้นการทำงานหรือจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด ที่รับประกันว่าระบบจะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับอย่างแน่นอน ดังนั้นที่จุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดจุดที่ 1 และจุดที่ 2 นี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน นั่นคือระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.22 และรูปที่ 3.23 พบว่ามีความสอดคล้องกัน นั่นคือระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพที่จุดการเปลี่ยนแปลงนี้ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 10 W ที่ประมาณได้ สามารถรับประกันได้ว่า การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่าง



แน่นอน ในขณะที่จุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W จุดที่ 3 และจุดที่ 4 นั้น อยู่ภายนอกขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ แต่ก็ไม่สามารถจะสรุปได้ว่า ที่จุดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ระบบจะขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน เนื่องจากนิยามของขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับตามทฤษฎีเซตยีนง ไม่ได้ระบุไว้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสเข้ามาช่วย ซึ่งจากการใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ดังแสดงในรูปที่ 3.20 และรูปที่ 3.21 และจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 จะพบว่า จุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W จุดที่ 3 และจุดที่ 4 นี้ จะทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาขาดเสถียรภาพได้



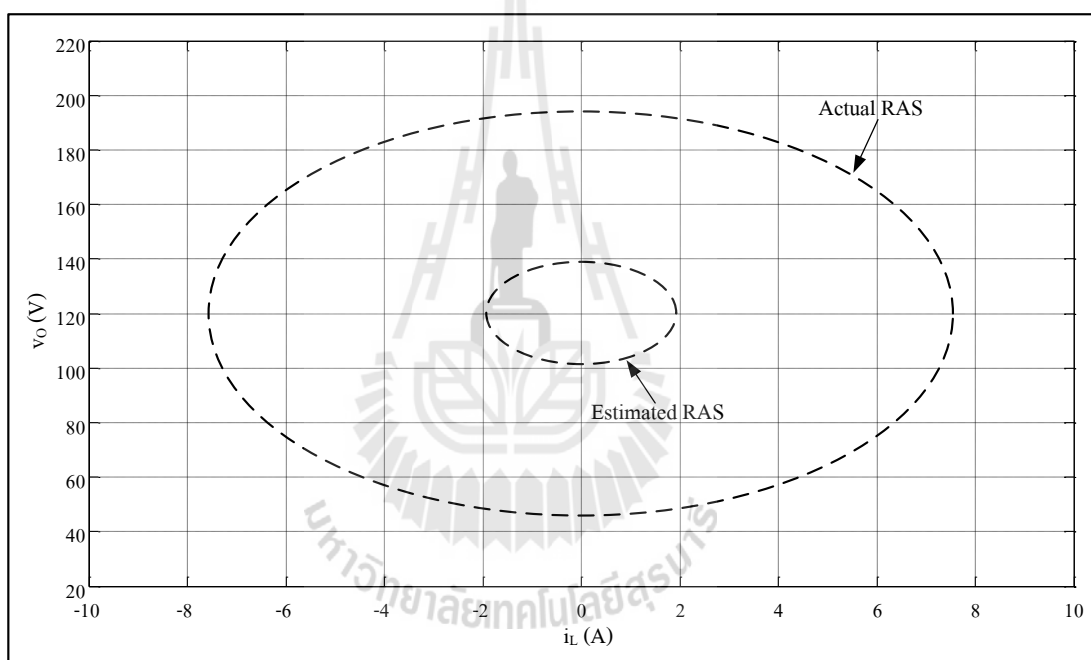
รูปที่ 3.27 สัญญาณ  $i_L$  และ  $v_o$  ที่  $P_{CPL} = 0$  W เมื่อ  $i_L(0) = 0$  A  $v_o(0) = 0$  V และมี RAS ที่  $P_{CPL} = 10$  W

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจะมีประโยชน์ในมุมมองของการรับประกันว่า ไม่ว่าจะเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดจากจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ในขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับนี้ จุดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน ซึ่งทำให้ไม่ต้องใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส มาวิเคราะห์โดยพิจารณาที่จุดการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปได้ทั้งหมดจนกระทั่งครบทุกจุดการเปลี่ยนแปลง เพื่อจะหลีกเลี่ยงการขาดเสถียรภาพของ

ระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด แต่อย่างไรก็ตามขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับตามทฤษฎีเซตนี้ จะรับประกันเสถียรภาพของระบบได้ ในกรณีที่จุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดอยู่ภายในขอบเขตเท่านั้น ถ้าจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดที่พิจารณาอยู่ภายนอกขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ จะไม่สามารถสรุปได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพหรือขาดเสถียรภาพ ซึ่งในกรณีนี้จำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสเข้ามาช่วยวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด จะมีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด เมื่อใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่อยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ ร่วมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ในกรณีที่จุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดที่พิจารณาอยู่ภายนอกขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับเป็นสำคัญ เนื่องจากสามารถใช้รับประกันได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับอย่างแน่นอน ถ้าจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดอยู่ภายในขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับนี้

เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบร์ย์ตันและมอเซอร์ มีความใกล้เคียงกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริงมากน้อยเพียงใด งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ดำเนินการหาขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริง เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 10 W โดยใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส มาวิเคราะห์ที่ละจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดที่เป็นไปได้ทั้งหมด จนกระทั่งครบทุกจุดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวจะดำเนินการด้วยการหาคำตอบของสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (3-1) ด้วยฟังก์ชัน ode45 ของโปรแกรม MATLAB เมื่อกำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบคือจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดที่เป็นไปได้ทั้งหมด หลังจากดำเนินการหาคำตอบของสมการอนุพันธ์ของระบบด้วยฟังก์ชัน ode45 ของโปรแกรม MATLAB จนกระทั่งครบทุกจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดที่เป็นไปได้ทั้งหมด จะได้ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริง เปรียบเทียบกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบร์ย์ตันและมอเซอร์ (Estimated RAS) เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 10 W แสดงดังรูปที่ 3.28 ซึ่งการดำเนินการหาขอบเขตของ

การมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริงดังกล่าว งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการด้วยฟังก์ชัน ode45 ของโปรแกรม MATLAB ที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์ที่มีตัวประมวลผลกลาง (CPU) Core<sup>(TM)</sup> i7, 3.60 GHz และมีหน่วยความจำหลักของคอมพิวเตอร์ (RAM) ขนาด 8 GB จะพบว่า ใช้เวลาในการดำเนินการทั้งหมด 6 ชั่วโมง 47 นาที สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้ ซึ่งเป็นระบบอย่างง่ายที่ไม่ซับซ้อน นั่นคือ มีจำนวนตัวแปรสถานะ 2 ตัวแปร ถ้าระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น นั่นคือ มีจำนวนของตัวแปรสถานะมากกว่า 2 ตัวแปร การดำเนินการดังกล่าวจะยิ่งใช้เวลาที่นานมากขึ้น ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงไม่นิยมที่จะดำเนินการหาขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริง



รูปที่ 3.28 Actual RAS และ Estimated RAS ที่  $P_{CPL} = 10$  W

จากรูปที่ 3.28 จะพบว่าขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบร์ย์ตันและมอเซอร์ มีขนาดเล็กกว่าขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริงอยู่ค่อนข้างมาก ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้ เกิดจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบร์ย์ตันและมอเซอร์ มีขอบเขตความปลอดภัย (safety margin) อันเนื่องมาจากเงื่อนไขของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับดังสมการที่ (3-28) (Didier Marx, Pierre Magne, Babak Nahid-Mobarakeh, Serge Pierfederici, and Bernard Davat, 2012) ดังนั้นถ้าต้องการให้ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบ

เชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ มีความใกล้เคียงกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริงจะต้องคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาใหม่ โดยไม่พึ่งพาวิธีการของเบรย์ทันและมอเซอร์ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้พยายามศึกษาและค้นคว้าวิธีการสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟใหม่ โดยมุ่งเน้นไปที่วิธีการที่สามารถนำฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ไปใช้สำหรับประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ที่ให้ขอบเขตดังกล่าวที่ประมาณได้ มีความใกล้เคียงกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริงได้มากที่สุดเท่าที่จะสามารถเป็นไปได้ ซึ่งจากการศึกษาและค้นคว้าพบว่า ทาคากิและซูจิโนได้นำเสนอวิธีการสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ โดยมุ่งเน้นไปที่การนำฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ไปใช้สำหรับการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ โดยเฉพาะ ซึ่งทำให้ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ มีความใกล้เคียงกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริงเท่าที่จะเป็นไปได้มากที่สุด ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงมีความสนใจวิธีการสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟและการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน ซึ่งวิธีการดังกล่าวแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 3.5.2 ดังนี้

### 3.5.2 การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน

ทาคากิและซูจิโนได้นำเสนอวิธีการสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ โดยมุ่งเน้นไปที่การนำฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ไปใช้สำหรับการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ โดยเฉพาะ ซึ่งการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟและการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโนจะอาศัยการแก้สมการเมตริกซ์เชิงเส้น (linear matrix inequalities : LMI) (D. Marx, S. Pierfederici, B. Nahid-Mobarakeh, and B. Davat, 2009; Didier Marx, Pierre Magne, Babak Nahid-Mobarakeh, Serge Pierfederici, and Bernard Davat, 2012) โดยสามารถสรุปเป็นขั้นตอนและแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: จัดรูปแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear model) ที่มีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดใด ๆ ให้เป็นแบบจำลองที่ไม่เชิงเส้นที่มีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิด โดยอาศัยการเลื่อนจุดปฏิบัติงานใด ๆ ให้ไปอยู่ที่จุดกำเนิด ซึ่งในกรณีที่แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบที่พิจารณา มีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิดแล้ว สามารถเริ่มดำเนินการตามขั้นตอนที่ 2 ได้

ขั้นตอนที่ 2: พิจารณาพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยจะกำหนดให้จำนวนของพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ  $q$  ดังนั้นแต่ละพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ปรากฏอยู่ในสมการอนุพันธ์ของแบบจำลองจะถูกแทนด้วย  $f_j(\mathbf{x})$  เมื่อ  $j=1, 2, \dots, q$

ขั้นตอนที่ 3: กำหนดแบบจำลองเฉพาะถิ่นที่เป็นเชิงเส้น (linear local model) ซึ่งแทนด้วยแบบจำลองตัวแปรสถานะดังสมการที่ (3-31) โดยการพิจารณาแต่ละพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น  $f_j(\mathbf{x})$  ใด ๆ ให้เป็นค่าคงที่ ด้วยค่าที่น้อยที่สุดจะได้  $f_{j\min}$  และค่าที่มากที่สุดจะได้  $f_{j\max}$  ดังนั้นจะได้ชุดของแบบจำลองเฉพาะถิ่นที่เป็นเชิงเส้นจำนวน  $2^q$  ชุด ซึ่งชุดของแบบจำลองเฉพาะถิ่นที่เป็นเชิงเส้นที่ได้นี้สามารถใช้แทนแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบที่พิจารณาได้

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_i \mathbf{x} \quad (3-31)$$

โดยที่  $\mathbf{A}_i$  คือ เมตริกซ์สถานะเฉพาะถิ่น (local state matrix) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับค่าที่น้อยที่สุด  $f_{j\min}$  และค่าที่มากที่สุด  $f_{j\max}$  ของแต่ละพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น  $f_j(\mathbf{x})$  ใด ๆ เมื่อ  $i=1, 2, \dots, 2^q$

ขั้นตอนที่ 4: นำเมตริกซ์สถานะเฉพาะถิ่น  $\mathbf{A}_i$  จำนวน  $2^q$  เมตริกซ์ ที่ได้จากชุดของแบบจำลองเฉพาะถิ่นที่เป็นเชิงเส้นจำนวน  $2^q$  ชุด ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 มาสร้างเป็นเงื่อนไขอสมการเมตริกซ์เชิงเส้นดังสมการที่ (3-32) ซึ่งเป็นเงื่อนไขของอสมการเมตริกซ์เชิงเส้นที่รับประกันว่าระบบที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับอย่างแน่นอน

$$\begin{cases} M = M^T > 0 \\ \mathbf{A}_i^T \cdot M + M \cdot \mathbf{A}_i < 0, \forall i \in \{1, 2, \dots, 2^q\} \end{cases} \quad (3-32)$$

โดยที่  $M$  คือ เมตริกซ์บวกแน่นอน (positive definite matrix)

ขั้นตอนที่ 5: แก้อสมการเมตริกซ์เชิงเส้นดังสมการที่ (3-32) โดยเริ่มต้นจากการกำหนดให้ ทุก ๆ พจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าเริ่มต้นอยู่ที่จุดกำเนิด นั่นคือ  $f_{j\min} = f_{j\max} = f_j(0)$  จากการกำหนด  $\mathbf{x}_{\min}^j = \mathbf{x}_{\max}^j = 0$  จากนั้นจะทำการลดค่า  $f_{j\min}$  และเพิ่มค่า  $f_{j\max}$  โดยการเพิ่มค่า  $\mathbf{x}_{\max}^j$  และลดค่า  $\mathbf{x}_{\min}^j$  ตามลำดับ พร้อมทั้งกลับไปแก้อสมการเมตริกซ์เชิงเส้นดังสมการที่ (3-32) ใหม่ทุก ๆ รอบที่มีการเปลี่ยนค่า  $f_{j\min}$  และ  $f_{j\max}$  จนกระทั่งได้  $f_{j\min}$  และ  $f_{j\max}$  ที่มีค่าน้อย

ที่สุดและมีค่ามากที่สุดตามลำดับ ที่ยังคงทำให้เงื่อนไขของสมการเมตริกซ์เชิงเส้นดังสมการที่ (3-32) เป็นจริง จะได้ค่าของเมตริกซ์  $M$  และ  $\mathbf{x}_{\min}^j$  ดังนั้นฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณาสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-33) และขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบที่พิจารณาสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-34) ตามลำดับ ดังนี้

$$V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T M \mathbf{x} \quad (3-33)$$

$$RAS = \{ \mathbf{x} : V(\mathbf{x}) \leq V(\mathbf{x}_{\min}^j) \} \quad (3-34)$$

การคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟและการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซียอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: การคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโนจะตั้งต้นจากแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิด ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (3-1) จะพบว่า เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีจุดปฏิบัติงานของระบบไม่ได้อยู่ที่จุดกำเนิด ดังนั้นจะต้องทำการจัดรูปแบบจำลองดังกล่าวให้มีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิดก่อน ซึ่งทำได้โดยอาศัยการเลื่อนจุดปฏิบัติงานของระบบที่จุดใด ๆ ให้อาศัยการเลื่อนจุดปฏิบัติงาน

จากจุดปฏิบัติงานของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่จุด  $i_{L,0}$  และ  $v_{O,0}$  ใด ๆ ที่ไม่ได้อยู่ที่จุดกำเนิด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-8) จะสามารถเลื่อนจุดปฏิบัติงานดังกล่าวให้อาศัยการเปลี่ยนตัวแปรสถานะของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ดังสมการที่ (3-35) และสมการที่ (3-36) ดังนี้

$$x_1 = i_L - i_{L,0} \quad (3-35)$$

$$x_2 = v_O - v_{O,0} \quad (3-36)$$

ดังนั้นจะสามารถจัดรูปแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุด  $i_{L,0}$  และ  $v_{O,0}$  ใด ๆ ที่แทนด้วยแบบจำลองตัวแปรสถานะดังสมการที่ (3-1) ให้เป็นจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิด และอยู่ในรูปของตัวแปรสถานะที่ได้กำหนดขึ้นมาใหม่ นั่นคือ  $x_1$  และ  $x_2$  ได้ดังนี้

พิจารณาสมการ  $\frac{di_L}{dt}$  ในสมการที่ (3-1) นั่นคือ

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{r_L}{L}i_L - \frac{1}{L}v_o + \frac{V_S}{L} \quad (3-37)$$

จากสมการที่ (3-37) สามารถจัดรูปให้จุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิดและเป็นสมการที่อยู่ในรูปของตัวแปรสถานะตัวใหม่ ( $x_1$  และ  $x_2$ ) ได้ โดยอาศัยสมการที่ (3-8) และสมการที่ (3-35) ซึ่งมีขั้นตอนการพิสูจน์แสดงได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt}(x_1 + i_{L,0}) = \frac{-r_L}{L}(x_1 + i_{L,0}) - \frac{1}{L}(x_2 + v_{o,0}) + \frac{V_S}{L}$$

$$\frac{d}{dt}x_1 + \frac{d}{dt}i_{L,0} = \frac{-r_L}{L}x_1 - \frac{r_L}{L}i_{L,0} - \frac{1}{L}x_2 - \frac{1}{L}v_{o,0} + \frac{V_S}{L}$$

$$\frac{d}{dt}x_1 = \frac{-r_L}{L}x_1 - \frac{r_L}{L}\left(\frac{V_S - v_{o,0}}{r_L}\right) - \frac{1}{L}x_2 - \frac{1}{L}v_{o,0} + \frac{V_S}{L} ; i_{L,0} = \frac{V_S - v_{o,0}}{r_L}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3-37) จะสามารถจัดรูปใหม่ ให้เป็นสมการที่อยู่ในรูปของตัวแปรสถานะ  $x_1$  และ  $x_2$  ซึ่งมีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิดได้ ดังสมการที่ (3-38) ดังนี้

$$\frac{d}{dt}x_1 = -\frac{r_L}{L}x_1 - \frac{1}{L}x_2 \quad (3-38)$$

พิจารณาสมการ  $\frac{dv_o}{dt}$  ในสมการที่ (3-1) นั่นคือ

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{P_{CPL}}{Cv_o} \quad (3-39)$$

จากสมการที่ (3-39) สามารถจัดรูปให้จุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิดและเป็นสมการที่อยู่ในรูปของตัวแปรสถานะตัวใหม่ ( $x_1$  และ  $x_2$ ) ได้ โดยอาศัยสมการที่ (3-8) และสมการที่ (3-36) ซึ่งมีขั้นตอนการพิสูจน์แสดงได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt}(x_2 + v_{o,0}) = \frac{1}{C}(x_1 + i_{L,0}) - \frac{P_{CPL}}{C(x_2 + v_{o,0})}$$

$$\frac{d}{dt}x_2 + \frac{d}{dt}v_{o,0} = \frac{1}{C}x_1 + \frac{1}{C}i_{L,0} - \frac{P_{CPL}}{C(x_2 + v_{o,0})}$$

$$\frac{d}{dt}x_2 = \frac{1}{C}x_1 + \frac{1}{C}\left(\frac{P_{CPL}}{v_{o,0}}\right) - \frac{P_{CPL}}{C(x_2 + v_{o,0})} ; i_{L,0} = \frac{P_{CPL}}{v_{o,0}}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3-39) จะสามารถจัดรูปใหม่ ให้เป็นสมการที่อยู่ในรูปของตัวแปรสถานะ  $x_1$  และ  $x_2$  ซึ่งมีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิดได้ ดังสมการที่ (3-40) ดังนี้

$$\frac{d}{dt}x_2 = \frac{1}{C}x_1 + \frac{P_{CPL}}{C \cdot v_{o,0}} \cdot \frac{1}{(x_2 + v_{o,0})} \cdot x_2 \quad (3-40)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (3-38) และสมการที่ (3-40) จะได้แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ที่จุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิด ดังสมการที่ (3-41) ดังนี้

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}x_1 = -\frac{r_L}{L}x_1 - \frac{1}{L}x_2 \\ \frac{d}{dt}x_2 = \frac{1}{C}x_1 + \frac{P_{CPL}}{C \cdot v_{o,0}} \cdot \frac{1}{(x_2 + v_{o,0})} \cdot x_2 \end{cases} \quad (3-41)$$

ขั้นตอนที่ 2: จากแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (3-41) จะพบว่า มีพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอยู่หนึ่งพจน์ นั่นคือพจน์  $\frac{1}{x_2 + v_{o,0}}$  ซึ่งปรากฏอยู่ในสมการ  $\frac{d}{dt}x_2$  ดังนั้น  $q$  จะมีค่าเท่ากับ 1 และพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวจะถูกแทนด้วย  $f_1(x_2) = \frac{1}{x_2 + v_{o,0}}$

ขั้นตอนที่ 3: จาก  $q=1$  และ  $f_1(x_2) = \frac{1}{x_2 + v_{o,0}}$  ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 จะสามารถ

กำหนดชุดของแบบจำลองเฉพาะถิ่นที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถใช้แทนแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ จำนวน  $2^q = 2^1 = 2$  ชุด โดยอาศัยการพิจารณาให้



พจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น  $f_1(x_2) = \frac{1}{x_2 + v_{0,0}}$  เป็นค่าคงที่ ด้วยค่าที่น้อยที่สุด  $x_{2,\min}^1$  และค่าที่มากที่สุด

$x_{2,\max}^1$  ได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาให้  $f_1(x_2)$  เป็นค่าคงที่ ด้วยค่าที่น้อยที่สุด นั่นคือกำหนดให้  $x_2 = x_{2,\min}^1$  จะได้  $f_1(x_2), \max = \frac{1}{x_{2,\min}^1 + v_{0,0}}$  ดังนั้นจะได้แบบจำลองเฉพาะถิ่นที่เป็นเชิงเส้น

ชุดที่ 1 ดังสมการที่ (3-42) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{P_{CPL}}{Cv_{0,0}} \cdot f_1(x_2), \max \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = A_1 \mathbf{x} \quad (3-42)$$

และเมื่อพิจารณาให้  $f_1(x_2)$  เป็นค่าคงที่ ด้วยค่าที่มากที่สุด นั่นคือกำหนดให้  $x_2 = x_{2,\max}^1$  จะได้  $f_1(x_2), \min = \frac{1}{x_{2,\max}^1 + v_{0,0}}$  ดังนั้นจะได้แบบจำลองเฉพาะถิ่นที่เป็นเชิงเส้น

ชุดที่ 2 ดังสมการที่ (3-43) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{P_{CPL}}{Cv_{0,0}} \cdot f_1(x_2), \min \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = A_2 \mathbf{x} \quad (3-43)$$

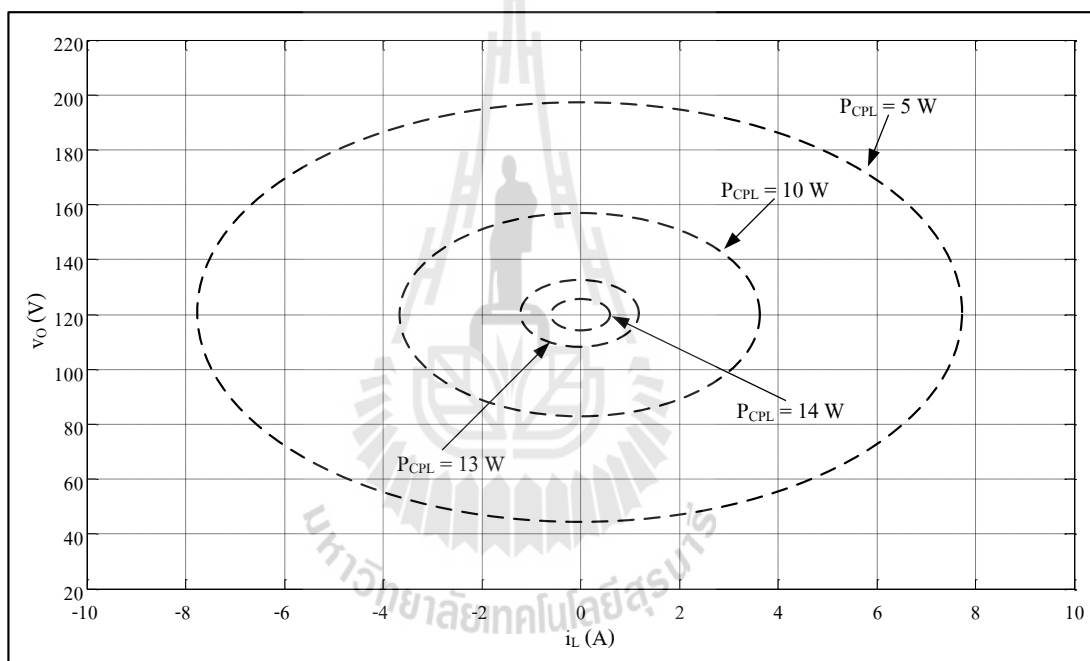
ขั้นตอนที่ 4: จากเมตริกซ์สถานะเฉพาะถิ่น  $A_1$  และ  $A_2$  ที่ได้จากสมการที่ (3-42) และสมการที่ (3-43) ตามลำดับ สามารถสร้างเงื่อนไขของอสมการเมตริกซ์เชิงเส้นที่รับประกันว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับอย่างแน่นอนได้ ดังสมการที่ (3-44) ดังนี้

$$\begin{cases} M = M^T > 0 \\ A_1^T \cdot M + M \cdot A_1 < 0 \\ A_2^T \cdot M + M \cdot A_2 < 0 \end{cases} \quad (3-44)$$

ขั้นตอนที่ 5: จากอสมการเมตริกซ์เชิงเส้นดังสมการที่ (3-44) สามารถเขียนเป็นโปรแกรมสำหรับการแก้สมการเมตริกซ์เชิงเส้น เพื่อคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟและประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ด้วย M-file บนโปรแกรม MATLAB ได้ โดยรายละเอียดของโปรแกรมสามารถดูได้จากภาคผนวก ก. ซึ่งการทำงานของโปรแกรมจะเริ่มต้นจากการกำหนดให้  $f_1(x_2), \min = f_1(x_2), \max = f_1(0)$  นั่นคือกำหนดให้  $x_{2,\min}^1 = x_{2,\max}^1 = 0$  จากนั้นจะทำการลดค่า  $f_1(x_2), \min$  โดยการเพิ่มค่า  $x_{2,\max}^1$  และการเพิ่มค่า  $f_1(x_2), \max$  โดยการลดค่า  $x_{2,\min}^1$  พร้อมทั้งกลับไปแก้สมการเมตริกซ์เชิงเส้นดังสมการที่ (3-44) ใหม่ทุก ๆ รอบที่มีการเปลี่ยนค่า  $f_1(x_2), \min$  และ  $f_1(x_2), \max$  จนกระทั่งได้ค่า  $f_1(x_2), \min$  และ  $f_1(x_2), \max$  ที่มีค่าน้อยที่สุดและมีค่ามากที่สุดตามลำดับ ที่ยังคงทำให้เงื่อนไขของอสมการเมตริกซ์เชิงเส้นดังสมการที่ (3-44) เป็นจริง ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่รับประกันว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับอย่างแน่นนอน ดังนั้นจะได้ค่าของเมตริกซ์  $M$  ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ดังสมการที่ (3-33) และจะได้ค่าของ  $x_{2,\min}^1$  ที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้ ดังสมการที่ (3-34) ซึ่งจากสมการที่ (3-34) จะพบว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับคือ  $V(\mathbf{x}_{\min}^1)$  โดยที่  $(\mathbf{x}_{\min}^1)$  สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้คือ  $(x_{1,\min}, x_{2,\min})$  ดังนั้นจากเมตริกซ์  $M$  และ  $x_{2,\min}^1 = x_{2,\min}^1$  ที่ได้จากการแก้สมการเมตริกซ์เชิงเส้น จะสามารถคำนวณหา  $x_{1,\min}$  ได้จากสมการ  $M\mathbf{x}_{\min} = 0$  ซึ่งจากเมตริกซ์  $M$  และ  $x_{1,\min}$  และ  $x_{2,\min}$  ที่คำนวณได้จะสามารถคำนวณหาขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ  $V(x_{1,\min}, x_{2,\min})$  ได้และจาก  $V(x_{1,\min}, x_{2,\min})$  ที่คำนวณได้จะถูกนำไปสร้างเป็นเส้นกราฟโครงร่างบนระนาบของตัวแปรสถานะ  $i_L$  และ  $v_O$  ซึ่งเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองที่มีการเลื่อนจุดปฏิบัติงานของระบบจากจุดกำเนิดกลับมาที่จุด  $i_{L,0}$  และ  $v_{O,0}$  ที่จุดใด ๆ แล้ว เพื่อสร้างเป็นขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรม จะได้ค่าของเมตริกซ์  $M$ ,  $x_{1,\min}$ ,  $x_{2,\min}$  และ  $V(\mathbf{x}_{\min}^1)$  ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 5 W 10 W 13 W และ 14 W ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 5 W 10 W 13 W และ 14 W ดังแสดงในรูปที่ 3.29

ตารางที่ 3.4 ค่าเมตริกซ์  $M$ ,  $x_{1,\min}$ ,  $x_{2,\min}$ ,  $V(\mathbf{x}_{\min})$  ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ

$P_{CPL}$ (W)	5	10	13	14
เมตริกซ์ $M$	$\begin{bmatrix} 108.76 & 0.11 \\ 0.11 & 1.09 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 82.16 & 0.08 \\ 0.08 & 0.82 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2997.10 & 2.99 \\ 2.99 & 29.97 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 123.89 & 0.12 \\ 0.12 & 1.24 \end{bmatrix}$
$x_{2,\min}$	-78.30	-36.59	-11.60	-3.30
$x_{1,\min}$	0.078	0.037	0.012	0.003
$V(x_{1,\min}, x_{2,\min})$	6667.30	1100.40	4032.50	13.49



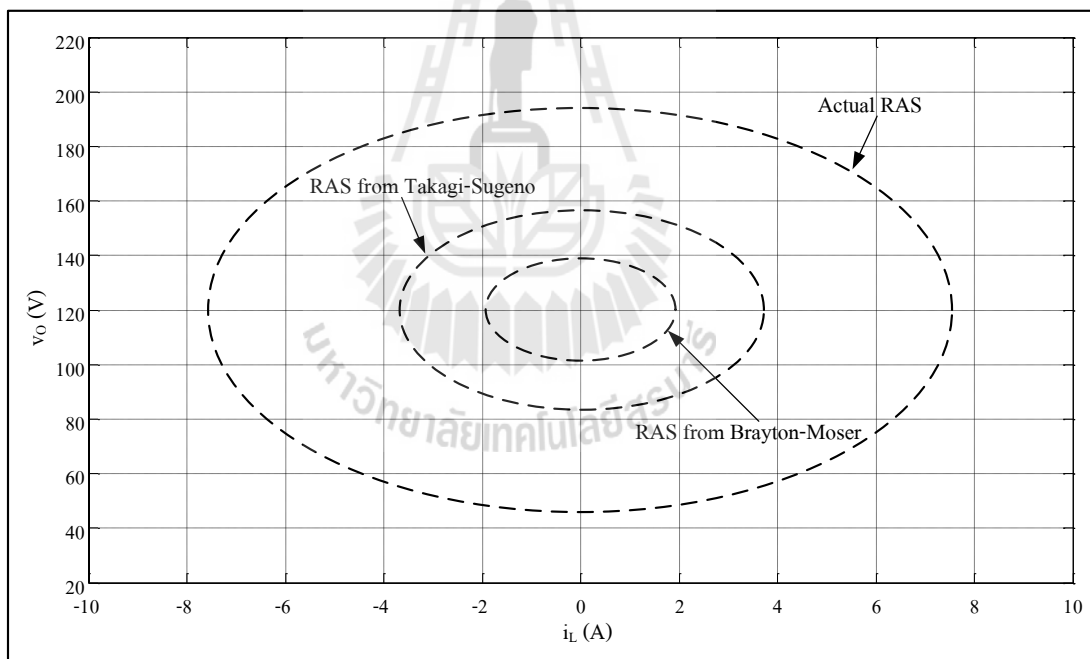
รูปที่ 3.29 ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากวิธีการที่นำเสนอ โดยทาคากิและซูจิโน เมื่อ  $P_{CPL} = 5 \text{ W}$   $10 \text{ W}$   $13 \text{ W}$  และ  $14 \text{ W}$

จากรูปที่ 3.29 จะพบว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเพิ่มมากขึ้น ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโนจะมีขอบเขตที่แคบลง ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ตันและมอเซอร์ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้อีกครั้งหนึ่งว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเพิ่มมากขึ้น ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ

จะลดลง ซึ่งทำให้จำนวนของจุดเริ่มต้นการทำงานหรือจุดการเปลี่ยนแปลง โหลดแบบทันทีทันใด ที่อยู่ภายในขอบเขตที่รับประกันว่าจะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอนมีอยู่ไม่มากนัก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง โหลดแบบทันทีทันใดหรือการรบกวนระบบ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ ในขณะที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าน้อย ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จะกว้าง ซึ่งทำให้จำนวนของจุดเริ่มต้นการทำงานหรือจุดการเปลี่ยนแปลง โหลดแบบทันทีทันใดที่อยู่ภายในขอบเขตที่รับประกันว่าจะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอนมีอยู่มากมายหลากหลายจุด ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง โหลดแบบทันทีทันใดหรือการรบกวนระบบ ในกรณีนี้ จะต้องอยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ถึงจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน มีความใกล้เคียงกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริงมากน้อยเพียงใด งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จึงดำเนินการเปรียบเทียบขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน (RAS from Takagi-Sugeno) กับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริง รวมทั้งเปรียบเทียบกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ตันและมอเซอร์ (RAS from Brayton-Moser) เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 10 W ซึ่งขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริงและขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ตันและมอเซอร์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 10 W ได้ดำเนินการประมาณไว้แล้วดังแสดงในรูปที่ 3.28 ในหัวข้อที่ 3.5.1 ดังนั้นผลการเปรียบเทียบที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.30 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน มีขนาดเล็กกว่าขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริง ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้ เกิดจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน ซึ่งอาศัยการแก้สมการเมตริกซ์เชิงเส้นดังสมการที่ (3-44) มีความตึงที่เกิดจากคุณสมบัติของอสมการ และความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นยังเกิดจากความตึงของทฤษฎีเซตยีนิง ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้สำหรับประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับอีกด้วย (Didier Marx, Pierre Magne, Babak Nahid-Mobarakeh, Serge Pierfederici, and Bernard Davat, 2012) แต่อย่างไรก็ตามขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอ

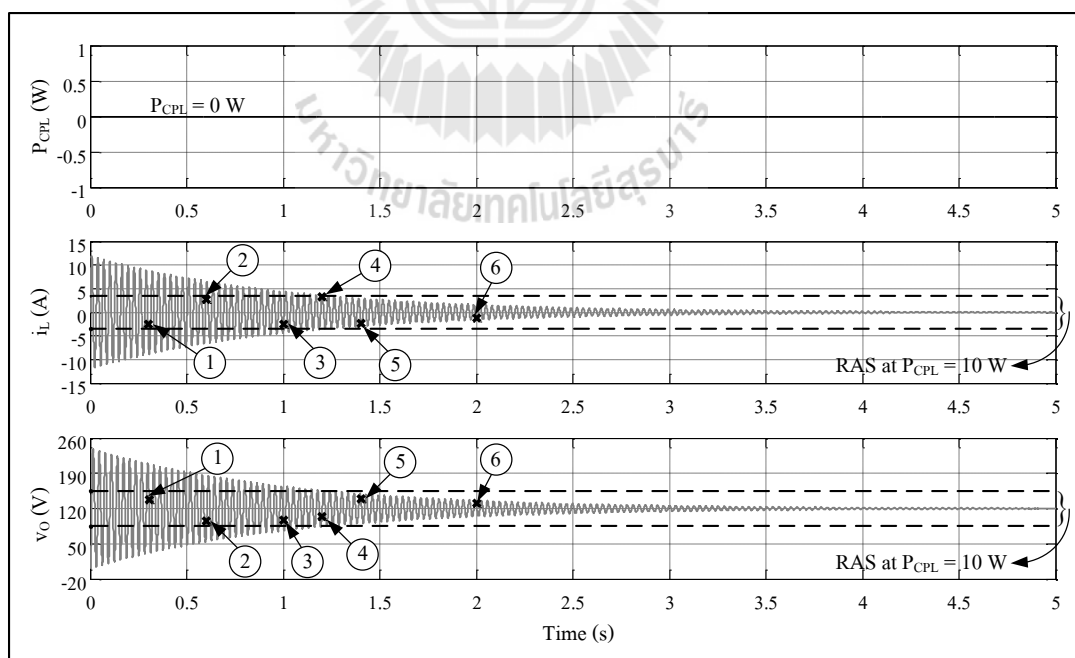
โดยทาคากิและซูจิโน จะมีขนาดที่กว้างกว่าขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ตันและมอเซอร์ ดังนั้นการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้น กำกับของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในบทความต่อไป งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการผ่านฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน เพราะนอกจากจะให้ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ มีความใกล้เคียงกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริง มากกว่าขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ตันและมอเซอร์แล้ว ยังพบว่า การคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโนสามารถนำไปใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนได้ง่ายกว่าวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ตันและมอเซอร์อีกด้วย ซึ่งฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้จะยังคงอยู่ในรูปแบบทั่วไปดังสมการที่ (3-33)



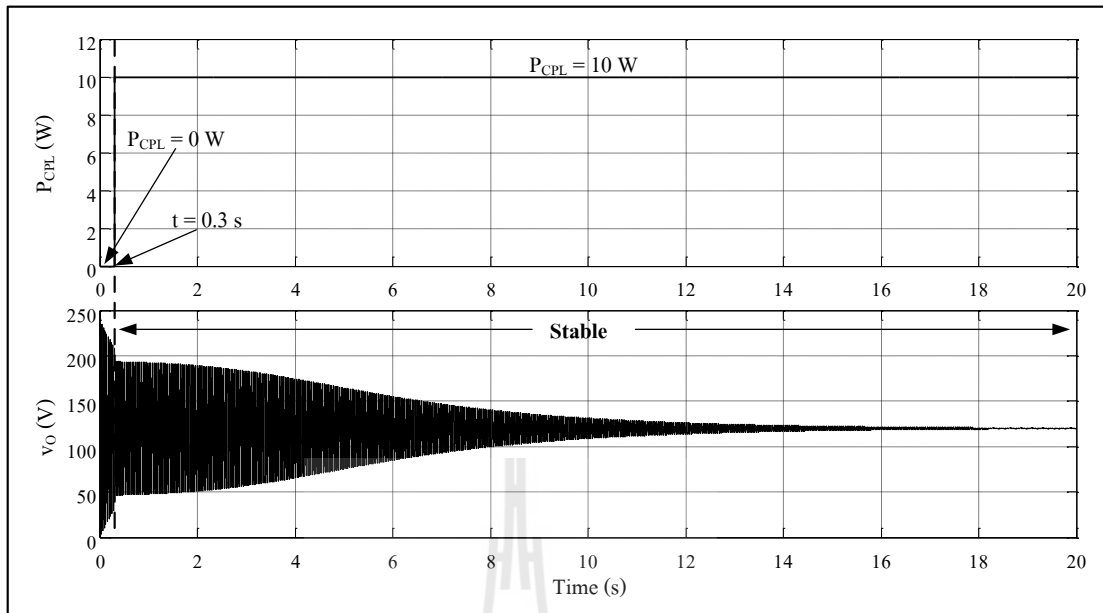
รูปที่ 3.30 Actual RAS, RAS from Takagi-Sugeno และ RAS from Brayton-Moser ที่  $P_{CPL} = 10$  W

เพื่อเป็นการยืนยันว่าขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน สามารถรับประกันได้ว่า การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงดำเนินการ

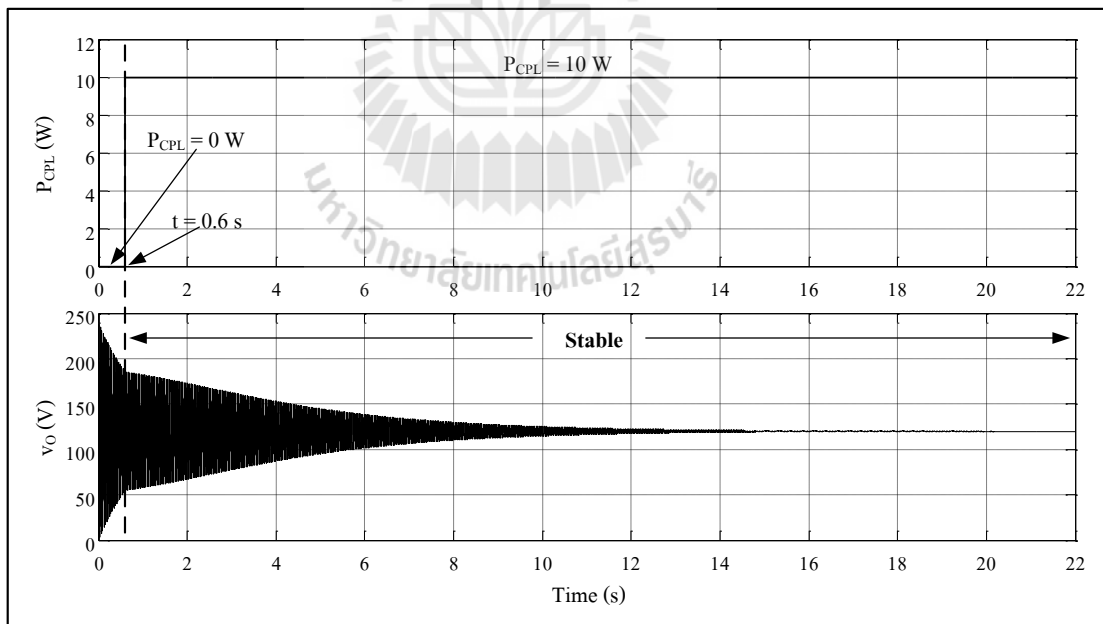
เปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ จากค่าโหลด 0 W ไปเป็น 10 W ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 6 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.31 ซึ่งจุดการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 6 จุดที่พิจารณา จะอยู่ภายในขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 10 W และดำเนินการยืนยันการมีเสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซื่ออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 ถึงจุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 6 ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการยืนยันที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 3.32 ถึงรูปที่ 3.37 ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า ทุก ๆ จุดการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ แบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่อยู่ภายในขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ ระบบจะมีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน สามารถรับประกันได้ว่าการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน



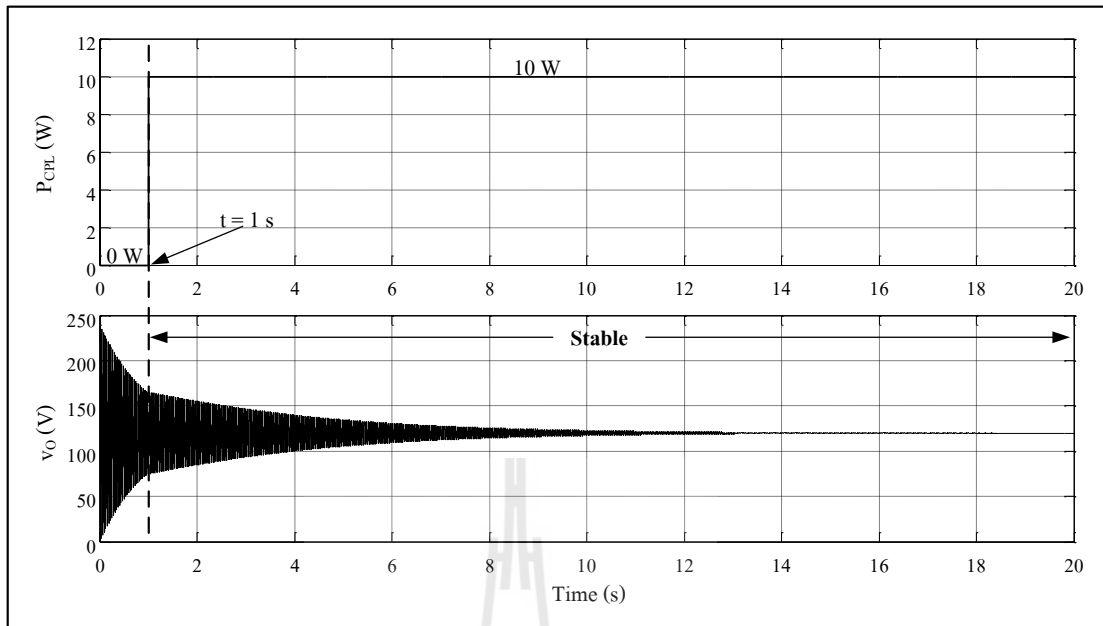
รูปที่ 3.31 สัญญาณ  $i_L$  และ  $v_o$  ที่  $P_{CPL} = 0$  W เมื่อ  $i_L(0) = 0$  A  $v_o(0) = 0$  V และมี RAS from Takagi-Sugeno ที่  $P_{CPL} = 10$  W



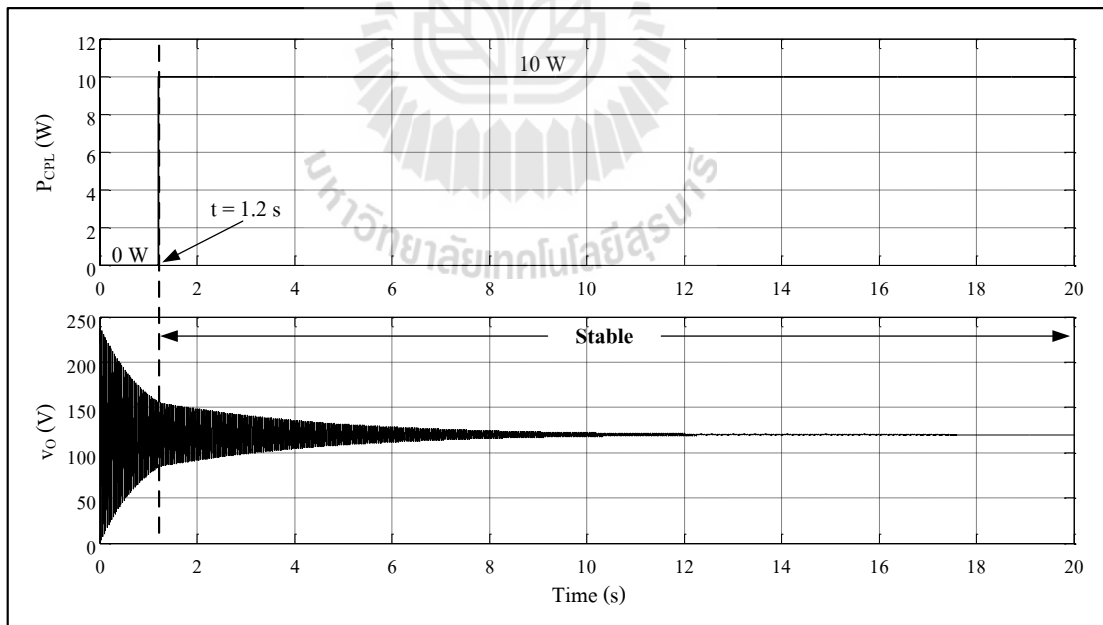
รูปที่ 3.32 ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1



รูปที่ 3.33 ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 2

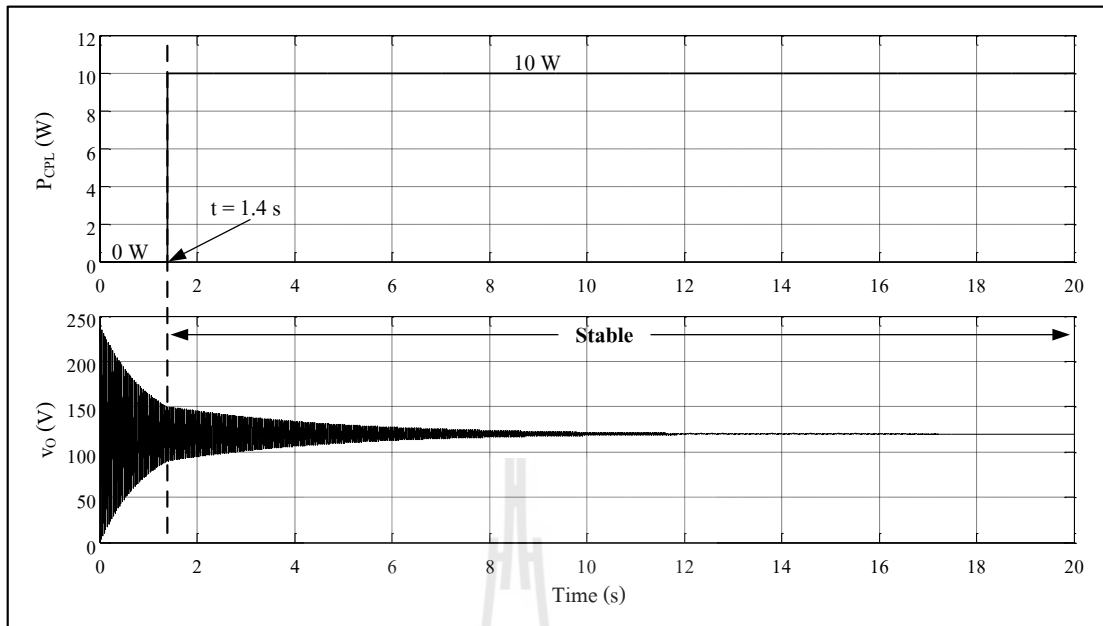


รูปที่ 3.34 ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 3

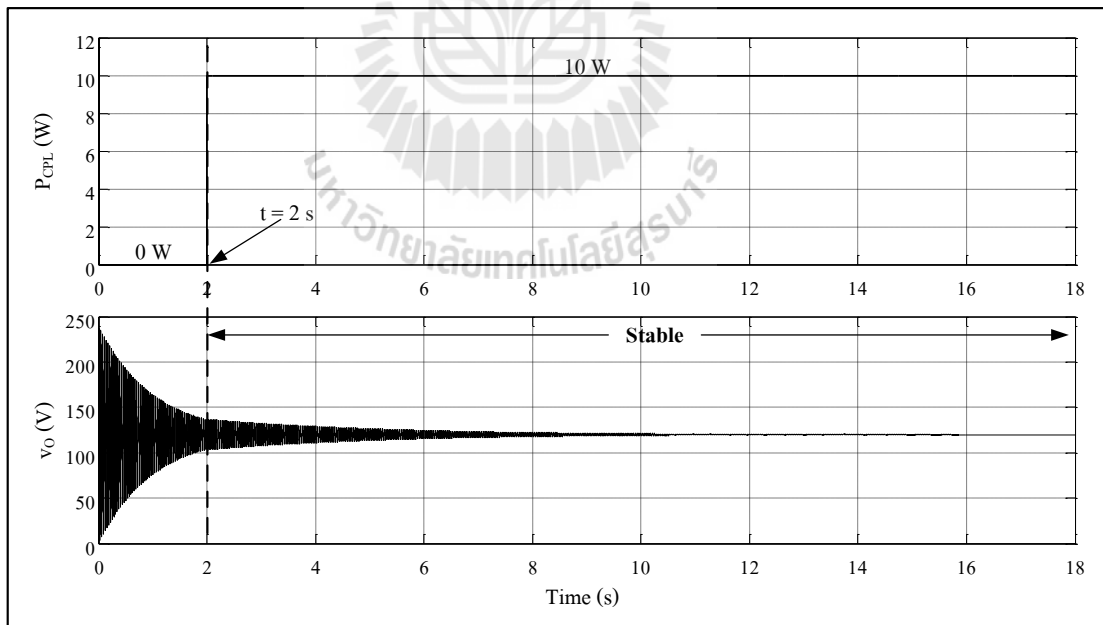


รูปที่ 3.35 ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4





รูปที่ 3.36 ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 5



รูปที่ 3.37 ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 0 W ไปเป็น 10 W ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 6

### 3.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของวงจรไฟฟ้ากำลังที่ซับซ้อนอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งเป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์ระนาบเฟส และวิธีการ โดยตรงของเลียปูนอฟ โดยที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการ โดยตรงของเลียปูนอฟจะอาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟจากวิธีการที่แตกต่างกันสามวิธี คือ วิธีการของคราซอว์สกี วิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์ และวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซุจิโน จากการดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาซึ่งเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน ทำให้ทราบถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี โดยจะพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น นอกจากจะให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งเกิดจากความไม่ชัดเจนเมื่อค่าเงาของระบบอยู่บนแกนจินตภาพแล้ว การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นนี้ เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดได้อีกด้วย ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสและวิธีการ โดยตรงของเลียปูนอฟ ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยตรง หรือเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ นอกจากจะสามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดได้อย่างถูกต้องแม่นยำอีกด้วย แต่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการ โดยตรงของเลียปูนอฟมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ และในทางปฏิบัติการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความยุ่งยากซับซ้อน ดังแสดงให้เห็นได้จากการที่ไม่สามารถคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการของคราซอว์สกี ซึ่งเป็นวิธีการพื้นฐานในการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟในรูปแบบอย่างง่ายได้ จนกระทั่งต้องหาวิธีการใหม่ที่สามารถนำมาใช้คำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ซึ่งพบว่า มีวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์สามารถที่จะนำมาใช้คำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์นอกจากจะมีความยุ่งยากซับซ้อนแล้ว ยังมีข้อจำกัดของระบบที่สามารถใช้วิธีการนี้ได้ เช่น ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะต้องไม่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแบบไม่มีอิสระ เป็นต้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสเป็นวิธีการที่สามารถดำเนินการได้ง่ายกว่า และมีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพ

ด้วยวิธีการ โดยตรงของเลียปุนอฟ และนอกจากนั้นแล้ว การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสเป็นวิธีการทางกราฟิก ดังนั้นจึงสามารถที่จะแสดงถึงรูปแบบการเคลื่อนที่หรือการตอบสนองทางพลวัตของระบบได้อีกด้วย ซึ่งรูปแบบการเคลื่อนที่บนระนาบเฟสที่ได้นี้สามารถใช้ตรวจสอบคุณลักษณะสมบัติของระบบ รวมถึงข้อมูลเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบ ซึ่งอาจจะเป็นการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่จะเข้าสู่จุดปฏิบัติงาน หรือวงรอบขีดจำกัดของระบบได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อหลีกเลี่ยงการขาดเสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดให้ได้ นั้น จะต้องใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส มาวิเคราะห์โดยพิจารณาที่ละจุดการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปได้ทั้งหมด จนกระทั่งครบทุกจุดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งกว่าจะวิเคราะห์ได้ครบทุกจุดนั้น จะต้องใช้เวลานาน ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปุนอฟจะเข้ามามีบทบาทและเป็นประโยชน์อย่างมาก เพราะจากทฤษฎีเซตยีนยงสามารถที่จะประยุกต์ใช้เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้ โดยขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับนี้ สามารถที่จะพิจารณาให้เป็นขอบเขตของจุดเริ่มต้นการทำงานหรือจุดการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด ที่จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน ซึ่งจากการดำเนินการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจะพบว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปุนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบร์ย์ตันและมอเซอร์ จะมีขนาดเล็กกว่าขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริงอยู่ค่อนข้างมาก ซึ่งเกิดจากฟังก์ชันเลียปุนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบร์ย์ตันและมอเซอร์นี้มีขอบเขตความปลอดภัย ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปุนอฟใหม่ เพื่อให้ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ มีความใกล้เคียงกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริงมากยิ่งขึ้น ซึ่งพบว่าสามารถใช้วิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโนมาคำนวณหาฟังก์ชันเลียปุนอฟของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ โดยขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปุนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน จะมีขนาดที่ใกล้เคียงกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริง มากกว่าขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปุนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบร์ย์ตันและมอเซอร์ และขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปุนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโนนี้ สามารถรับประกันได้ว่า การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวจะไม่

ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน ซึ่งสามารถยืนยันการมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ได้ และนอกจากนั้นแล้วยังพบว่า การคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโนสามารถนำไปใช้กับระบบที่มีความซับซ้อน ได้ง่ายกว่าการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ตันและมอเซอร์อีกด้วย ซึ่งฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณจากวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโนจะอยู่ในรูปแบบทั่วไปคือ  $V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T M \mathbf{x}$  ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในบทถัดไป งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา พร้อมทั้งนำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน เพื่อแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นมีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยตรงนั้น สามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และนอกจากนี้แล้วจะดำเนินการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน เพื่อนำขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ มาใช้สำหรับการรับประกันว่าการเปลี่ยนแปลง โหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

#### 4.1 บทนำ

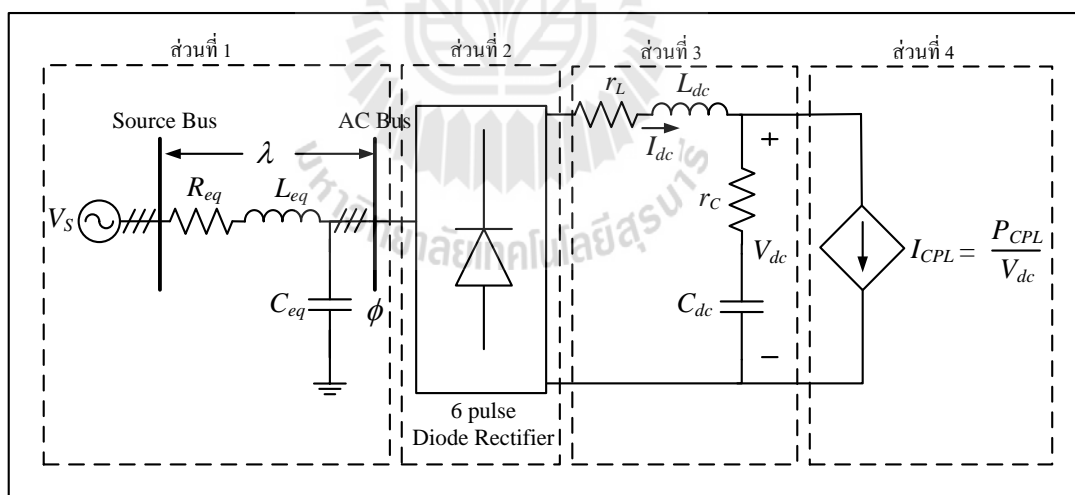
การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซิงอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา ทำให้มีองค์ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับแนวคิดพื้นฐานและทฤษฎีบทที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของแต่ละวิธีที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งทำให้ทราบถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี จนกระทั่งสามารถสรุปเป็นแนวทางเพื่อนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้ ดังนั้นในบทที่ 4 นี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าที่มีการเพิ่มความซับซ้อนทางด้านสัญญาณขาเข้าของระบบให้มีความใกล้เคียงกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ นั่นคือจะพิจารณาพลวัตของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลและไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ เพิ่มเติมจากบทที่ 3 ในขณะที่ฝั่งสัญญาณออกของระบบยังคงพิจารณาเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติเหมือนเดิม เนื้อหาในเบื้องต้นของบทนี้จะกล่าวถึงการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีดิกัว เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ ซึ่งการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะได้รับการอธิบายไว้พอสังเขป จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยอาศัยแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากบทที่ 3 นั่นคือ จะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา และจะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟที่อาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอ โดยทาคากิและซูจิโน เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ สำหรับการรับประกันว่าการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขต

ดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน ซึ่งการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทนี้ จะดำเนินการประมาณจากวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบแทนการประมาณจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทนี้โดยตรง เพื่อลดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

## 4.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 4.2.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 4 คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าที่มีการเพิ่มความซับซ้อนทางด้านสัญญาณขาเข้าของระบบให้มีความใกล้เคียงกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยจะพิจารณาพลวัตของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลและไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ เพิ่มเติมจากบทที่ 3 ในขณะที่ฝั่งสัญญาณขาออกของระบบยังคงพิจารณาเป็น โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติเหมือนเดิม



รูปที่ 4.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ประกอบด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุล โดยที่  $V_s$  คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล  $R_{eq}$ ,  $L_{eq}$  และ  $C_{eq}$  คือความต้าน

ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ของสายส่งกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ ส่วนที่ 2 ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 วงจรกรอง โดยที่  $L_{dc}$ ,  $C_{dc}$ ,  $r_L$  และ  $r_C$  คือความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ และความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ ของวงจรกรอง ตามลำดับ ซึ่งความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ของสายส่งกำลังไฟฟ้าและวงจรกรองจะสมมติให้มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นและมีค่าคงที่ และส่วนที่ 4 แหล่งจ่ายกระแสไม่อิสระแบบอุดมคติ ซึ่งใช้แทนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่ต่อขนานกับระบบผ่านวงจรกรอง

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ แต่เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา จะพบว่า เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) อันเนื่องมาจากผลการทำงานของไดโอดในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีลักษณะพฤติกรรมเหมือนกับสวิตช์ ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาและค้นคว้าการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-invariant model) ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น จากการศึกษาและค้นคว้าพบว่า การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์นิยมใช้วิธีดีคิว (DQ Method) เพราะแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้จะมีความยืดหยุ่นสูงและไม่ซับซ้อน ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติด้วยวิธีดีคิว สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 4.2.2 ดังนี้

#### 4.2.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีดีคิว

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ด้วยวิธีดีคิว ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะได้รับการอธิบายไว้พอสังเขปเท่านั้น ซึ่งการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบดังกล่าวแบบละเอียด สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากวิทยานิพนธ์ปริญญาโทฉบับที่ของเทพพนม โสภานพุ่ม (เทพพนม โสภานพุ่ม, 2554) ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีดีคิว สามารถอธิบายได้ดังนี้

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติด้วยวิธีดีคิวจะต้องเป็นไปตามสมมติฐานดังต่อไปนี้

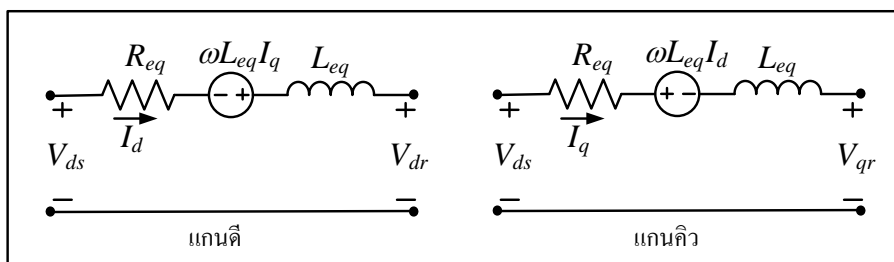
1. วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ทำงานในช่วงโหมคการนำกระแสแบบต่อเนื่อง
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นแบบสมดุล
3. ไม่พิจารณาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ
4. มุมความเหลื่อม (Overlap angle)  $\mu$  ต้องน้อยกว่า 60 องศา

พิจารณาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุล นั่นคือส่วนที่ 1 ในรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล วงจรอนุกรมของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า และวงจรขนานของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า เมื่อทำการแปลงให้อยู่ในรูปของแกนหมุนดีคิว ด้วยการแปลงดีคิวที่อาศัยวิธีการแปลงของปาร์ค (Park's Transform) ซึ่งเป็นวิธีการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าจากแกนสามเฟส ( $abc$ ) ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าสองเฟสบนแกนหมุนดีคิว ( $dq$ ) ดังนั้นจะได้สมการที่ใช้คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว แสดงได้ดังสมการที่ (4-1) และจะได้วงจรสมมูลของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว และวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ตามลำดับ

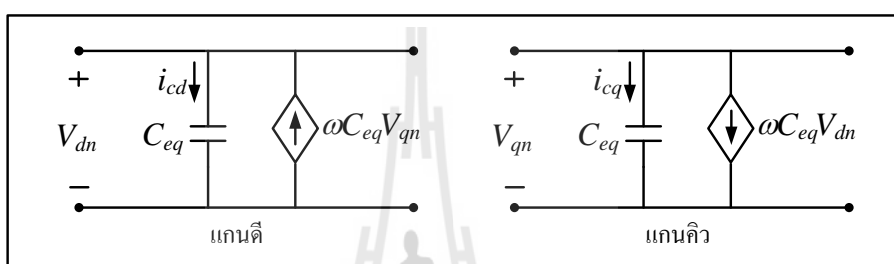
$$\begin{cases} V_{sd} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda + \phi - \phi_1) \\ V_{sq} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda + \phi - \phi_1) \end{cases} \quad (4-1)$$

- โดยที่  $V_m$  คือ ค่ายอดแรงดันเฟสที่แหล่งจ่าย  
 $\lambda$  คือ มุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่าย (Source Bus) และบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Bus)  
 $\phi$  คือ มุมเฟสที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ  
 $\phi_1$  คือ มุมการหมุนของแกนดีคิว





รูปที่ 4.2 วงจรสมมูลของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว



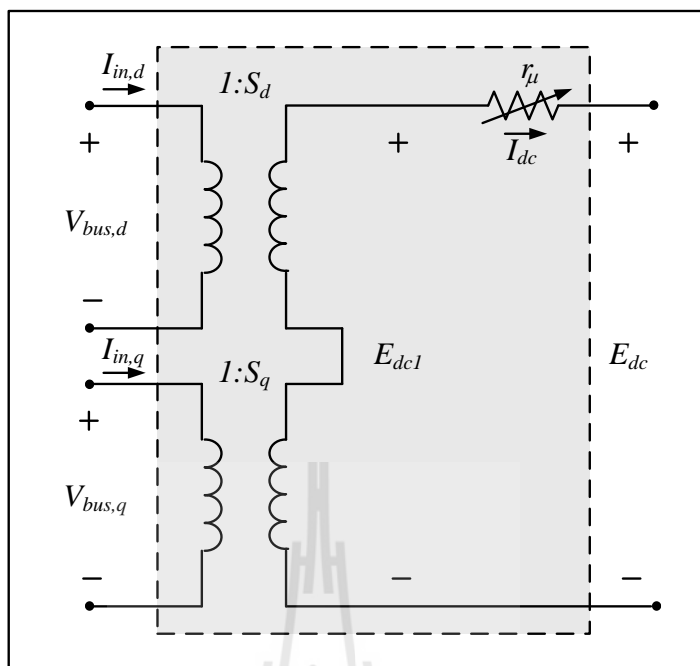
รูปที่ 4.3 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว

ผลจาก  $L_{eq}$  ด้านไฟฟ้ากระแสสลับ จะส่งผลให้เกิดมุมความเหลื่อมขึ้น ซึ่งทำให้แรงดันสัญญาณขาออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ลดลง ผลกระทบนี้สามารถพิจารณาให้แทนด้วยความต้านทานแบบปรับค่าได้  $r_\mu$  ที่บริเวณด้านไฟฟ้ากระแสตรง (Mohan, Underland, and Robbins, 2003) ซึ่งความต้านทานแบบปรับค่าได้  $r_\mu$  สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4-2) ดังนี้

$$r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} \quad (4-2)$$

โดยที่  $\omega$  คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

พิจารณาไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ นั่นคือส่วนที่ 2 ในรูปที่ 4.1 ร่วมกับการพิจารณาให้ผลกระทบของมุมความเหลื่อมอยู่ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อทำการแปลงให้อยู่ในรูปของแกนหมุนดีคิว ด้วยการแปลงดีคิวที่อาศัยวิธีการแปลงของปาร์ค ดังนั้นจะได้วงจรสมมูลของไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว ดังแสดงในรูปที่ 4.4

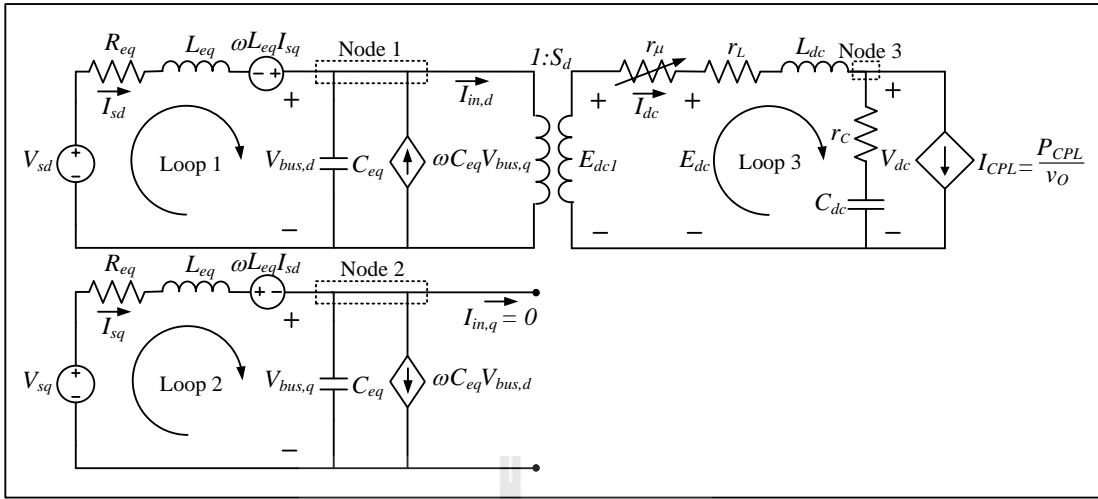


รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลของไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่า ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ สามารถแทนด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่บนแกนดีและแกนคิวได้ โดยมีอัตราส่วนของหม้อแปลงคือ  $S_d$  และ  $S_q$  ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราส่วนของหม้อแปลงดังกล่าวได้ดังสมการที่ (4-3) และ  $E_{dc1}$  แทนแรงดันไฟฟ้าสัญญาณขาออก โดยไม่พิจารณาผลกระทบของมุมความเหลื่อม ในขณะที่  $E_{dc}$  เป็นแรงดันไฟฟ้าสัญญาณขาออกของวงจรที่พิจารณาผลกระทบของมุมความเหลื่อม

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

เมื่อกำหนดให้ มุมการหมุนของแกนดีคิวเท่ากับมุมเฟสที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $\phi_1 = \phi$ ) จะทำให้  $S_q = 0$  และส่งผลให้  $I_{in,q} = 0$  ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่บนแกนคิวจะถูกกำจัดทิ้งไป ดังนั้นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 สามารถแทนด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายที่อยู่บนแกนหมุนดีคิวได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ดังนี้



รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว

จากการวิเคราะห์วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว ในรูปที่ 4.5 ด้วยการนำกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (KVL) มาวิเคราะห์ห้วงรอบที่ 1 ถึงห้วงรอบที่ 3 (Loop 1 – Loop 3) และนำกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (KCL) มาวิเคราะห์โหนดที่ 1 ถึงโหนดที่ 3 (Node 1 – Node 3) ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงดังสมการที่ (4-4) ดังนี้

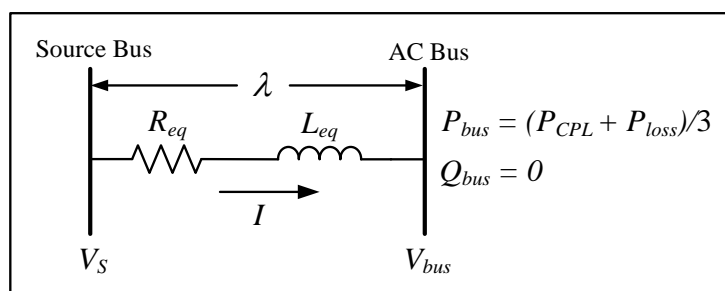
$$\left. \begin{aligned}
 \dot{I}_{sd} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sd} \\
 \dot{I}_{sq} &= -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\
 \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\
 \dot{I}_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_{\mu} + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_C P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc}} \\
 \dot{V}_{dc} &= \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc}}
 \end{aligned} \right\} \quad (4-4)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \begin{cases} V_{sd} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ V_{sq} = \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \end{cases} \quad (4-5)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (4-4) จะสังเกตได้ว่าเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือ  $\frac{P_{CPL}}{C_{dc}V_{dc}}$  ซึ่งปรากฏอยู่ในสมการ  $\dot{I}_{dc}$  และ  $\dot{V}_{dc}$  ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้จึงเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และนอกจากนั้นแล้วจะสังเกตได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวมีค่า  $V_{sd}$  และ  $V_{sq}$  ประกอบอยู่ในสมการ  $\dot{I}_{sd}$  และ  $\dot{I}_{sq}$  ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-5) โดยจะพบว่า  $V_{sd}$  และ  $V_{sq}$  มีค่าขึ้นอยู่กับมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $\lambda$ ) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาค่า  $\lambda$  ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะคำนวณหาค่า  $\lambda$  โดยอาศัยการนำทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า (power flow) มาวิเคราะห์ระบบทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 4.1 ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการคำนวณหาค่า  $\lambda$  ได้ดังหัวข้อที่ 4.2.3 ดังนี้

#### 4.2.3 การคำนวณมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุล การพิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้า จึงสามารถที่จะพิจารณาเพียงแค่เฟสเดียวได้ และเนื่องจากสายส่งกำลังไฟฟ้าของระบบเป็นสายส่งระยะสั้น ซึ่งความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้าจะมีค่าน้อยมาก จึงสามารถละทิ้งความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้าในการวิเคราะห์ได้ ดังนั้นแผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ดังนี้



รูปที่ 4.6 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 4.6 การพิสูจน์หาสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังนี้

$$\text{จาก } \mathbf{S} = \mathbf{VI}^* = P_{bus} + jQ_{bus}$$

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

เมื่อ  $V_{bus}$  คือ แรงดันเฟส (rms) ที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

$\lambda$  คือ มุมการเลื่อนเฟสระหว่าง  $V_S$  และ  $V_{bus}$

$Z \angle \gamma$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า

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

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

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

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

ดังนั้นจะได้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (4-6) ดังนี้

$$\begin{cases} \frac{V_{bus} V_S}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = P_{bus} \\ \frac{V_{bus} V_S}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (4-6)$$

โดยที่ กำลังไฟฟ้าจริง (real power) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (reactive power) เมื่อพิจารณาที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4-7) ดังนี้

$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{P_{CPL} + P_{loss}}{3} \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (4-7)$$

จากสมการที่ (4-6) และสมการที่ (4-7) สามารถเขียนเป็น โปรแกรมสำหรับการคำนวณหาค่า  $\lambda$  โดยอาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและราฟสันด้วย M-file บน โปรแกรม MATLAB ได้ โดยรายละเอียดของโปรแกรมสามารถดูได้จากภาคผนวก ง. ซึ่งการทำงานของโปรแกรมจะดำเนินการคำนวณหาค่า  $V_{bus}$  และ  $\lambda$  ด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและราฟสัน โดยการปรับปรุงค่า  $V_{bus}$  และ  $\lambda$  ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ  $1 \times 10^{-6}$  เมื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรม จะได้ค่า  $V_{bus}$  และ  $\lambda$  ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ( $P_{CPL}$ ) หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า  $V_{bus}$  และ  $\lambda$  ที่คำนวณได้เป็นค่าในสภาวะคงตัว หรือเป็นค่า ณ จุดปฏิบัติการของระบบ ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมจะได้ค่า  $V_{bus,0}$  และ  $\lambda_0$

จากค่า  $V_{bus,0}$  และ  $\lambda_0$  ที่คำนวณได้ สามารถนำไปใช้สำหรับการคำนวณหาค่าในสภาวะคงตัวค่าอื่น ๆ ได้ดังนี้

$$I_{dc,0} = \frac{\sqrt{3} \left| \frac{V_s e^{j0} - V_{bus,0} e^{-j\lambda_0}}{Z e^{j\gamma}} \right|}{\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi}} \quad (4-8)$$

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

$$V_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2} \cdot V_{bus,0}) - \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} I_{dc,0} - r_L I_{dc,0} \quad (4-9)$$

เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ที่พิสูจน์หาได้ด้วยวิธีคิดมีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์หาได้ โดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 4.2.4

#### 4.2.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ที่พิสูจน์หาได้ด้วยวิธีคิด ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาและเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ (4-4) จะอาศัยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์หาได้ด้วยวิธีคิด (DQ model) ซึ่งได้มาจากการแก้สมการอนุพันธ์ของระบบดังสมการที่ (4-4) ด้วยฟังก์ชัน ode45 ของโปรแกรม MATLAB กับผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ (Exact topology model) โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ สามารถดูได้จากภาคผนวก ก.2 และกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่พิจารณาในบทที่ 4 จะแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ที่พิจารณาในบทที่ 3 เนื่องจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของระบบ เพื่อต้องการให้การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เกิดขึ้นเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าที่ค่อนข้างสูง ซึ่งอาจจะทำให้เห็นความคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นชัดเจนมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 4.1

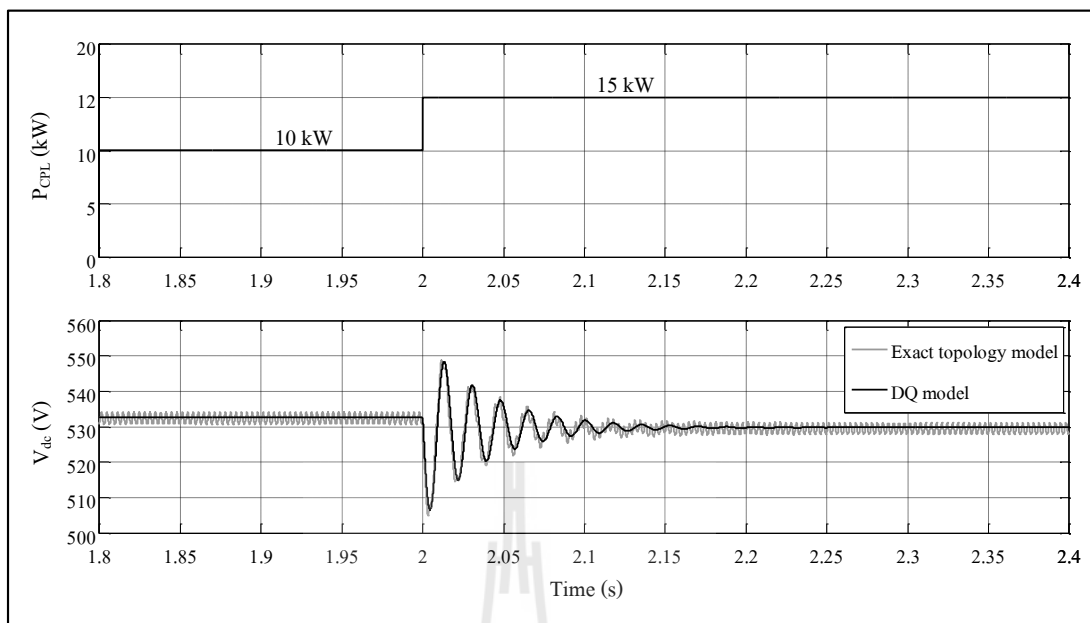
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_s$	230 V <sub>rms/phase</sub>	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบสมดุล
$f$	50 Hz	ความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
$R_{eq}$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า
$L_{eq}$	24 $\mu$ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า
$C_{eq}$	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 (ต่อ)

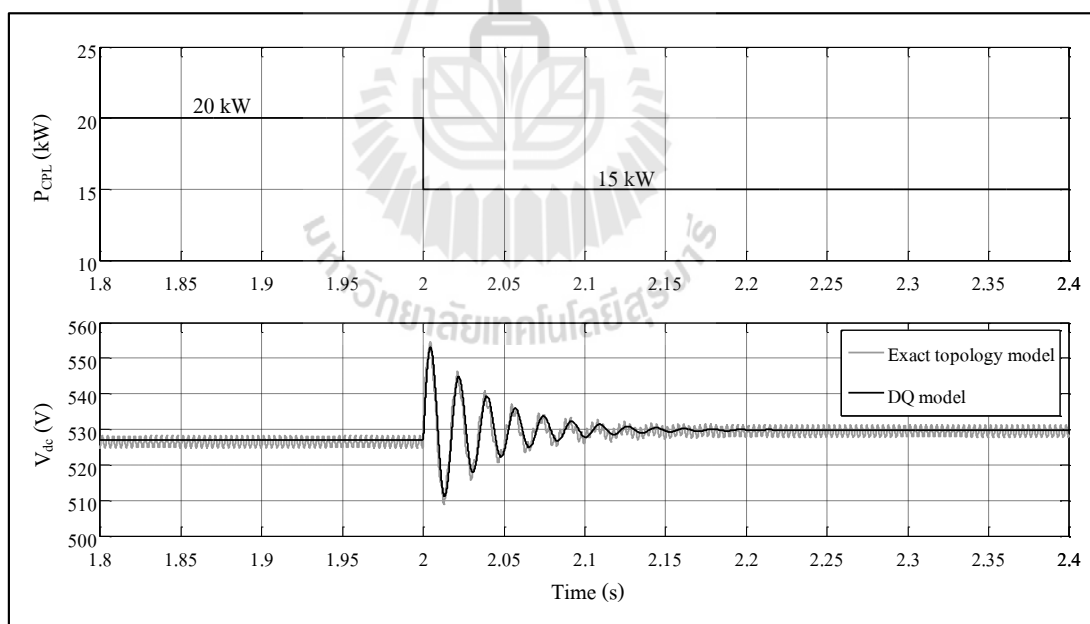
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$r_L$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอง
$L_{dc}$	7.5 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรรอง
$r_C$	0.5 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรรอง
$C_{dc}$	1000 $\mu\text{F}$	ความจุไฟฟ้าของวงจรรอง
$I_{sd}(0)$	0 A	ค่าเริ่มต้นการทำงานของระบบ ซึ่งคำนวณได้จากการ
$I_{sq}(0)$	0 A	วิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในสถานะอยู่ตัวโดย
$V_{bus,d}(0)$	0 V	การพิจารณาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบ
$V_{bus,q}(0)$	0 V	สมดุลให้เป็นค่าคงที่ ด้วยค่าแรงดันที่ได้จากวงจร
$I_{dc}(0)$	0 A	เรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ จากนั้นลัดวงจรที่ตัว
$V_{dc}(0)$	537.99 V	เหนี่ยวนำ และเปิดวงจรที่ตัวเก็บประจุ ของวงจรรอง

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ที่พิสูจน์หาได้ด้วยวิธีคิคว แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 โดยรูปที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกดีซี ( $V_{dc}$ ) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกดีซีที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 10 kW ไปเป็น 15 kW ที่เวลา 2 วินาที ในขณะที่ รูปที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเช่นเดียวกับรูปที่ 4.7 แต่พิจารณาเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 kW ไปเป็น 15 kW ที่เวลา 2 วินาที ซึ่งจากรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกดีซีที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกดีซีที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ที่พิสูจน์มาจากวิธีคิคว ดังแสดงในสมการที่ (4-4) มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้





รูปที่ 4.7 สัญญาณ  $V_{dc}$  เมื่อ  $P_{CPL}$  เปลี่ยนแปลงจาก 10 kW ไปเป็น 15 kW ที่เวลา 2 วินาที



รูปที่ 4.8 สัญญาณ  $V_{dc}$  เมื่อ  $P_{CPL}$  เปลี่ยนแปลงจาก 20 kW ไปเป็น 15 kW ที่เวลา 2 วินาที

### 4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-4) และกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 4 นี้จะอาศัยแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากบทที่ 3 นั่นคือ จะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยรายละเอียดแสดงได้ในหัวข้อที่ 4.3.1 และหัวข้อที่ 4.3.2 ตามลำดับ จากนั้นในหัวข้อที่ 4.3.3 จะเป็นการนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งนำเสนอการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นมีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยตรงนั้น สามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และนอกจากนั้นแล้วจะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเล็ญอฟ ที่อาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเล็ญอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ สำหรับการรับประกันว่าการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน โดยรายละเอียดจะได้รับการอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.4

#### 4.3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น

จากขั้นตอนของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งได้รับการอธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1 ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (4-4) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ดังนั้นจะได้แบบจำลองของระบบซึ่งเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ (3-4) โดยที่เมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4-10) ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{I}_{sd}}{\delta V_{dc}} \\ \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{I}_{sq}}{\delta V_{dc}} \\ \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,d}}{\delta V_{dc}} \\ \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{V}_{bus,q}}{\delta V_{dc}} \\ \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{I}_{dc}}{\delta V_{dc}} \\ \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta I_{sd}} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta I_{sq}} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta V_{bus,d}} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta V_{bus,q}} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta I_{dc}} & \frac{\delta \dot{V}_{dc}}{\delta V_{dc}} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (4-10)$$

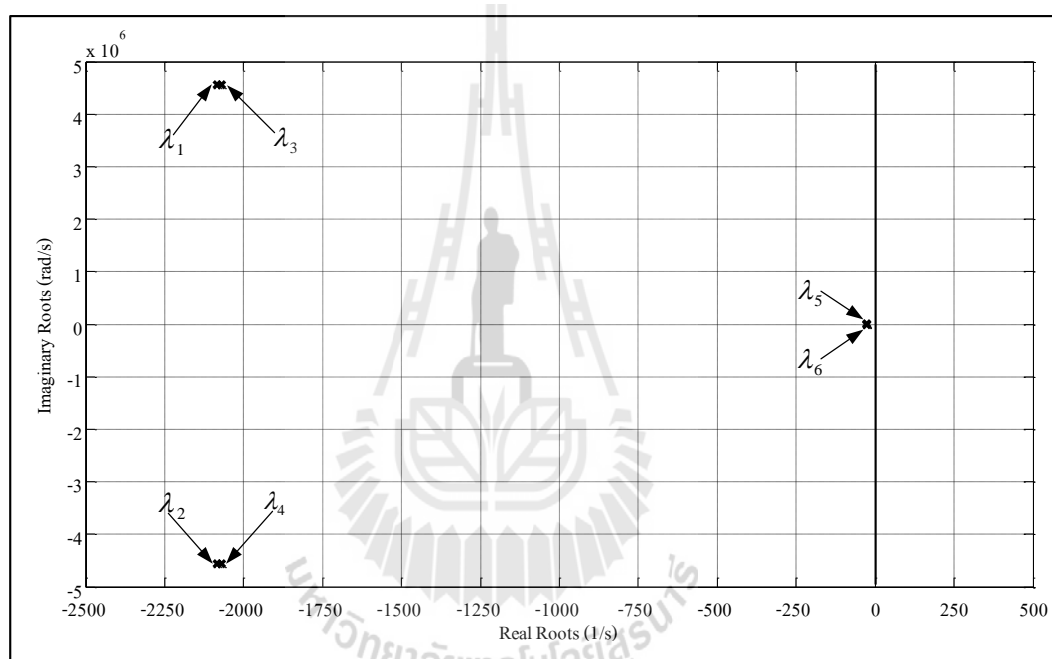
ดังนั้นจะได้ เมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  สำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าเจาะจง เพื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ดังแสดงในสมการที่ (4-11) ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_{\mu} + r_L + r_C)}{L_{dc}} & -\left(\frac{1}{L_{dc}} + \frac{r_C P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc,o}^2}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc,o}^2} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (4-11)$$

จากสมการที่ (4-11) จะพบว่า เมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  มีค่าขึ้นอยู่กับค่าของแรงดันสัญญาณขาออกดิสชีที่จุดปฏิบัติงาน ( $V_{dc,o}$ ) ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถคำนวณได้จากการคำนวณหาจุดปฏิบัติงานของระบบ โดยกำหนดให้  $\dot{I}_{sd}$ ,  $\dot{I}_{sq}$ ,  $\dot{V}_{bus,d}$ ,  $\dot{V}_{bus,q}$ ,  $\dot{I}_{dc}$  และ  $\dot{V}_{dc}$  ในสมการที่ (4-4) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ หรืออาจคำนวณได้จากการคำนวณค่าในสภาวะคงตัวที่อาศัย

ทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.2.3 ซึ่งจะได้สมการที่ใช้คำนวณหา  $V_{dc,0}$  ดังสมการที่ (4-9)

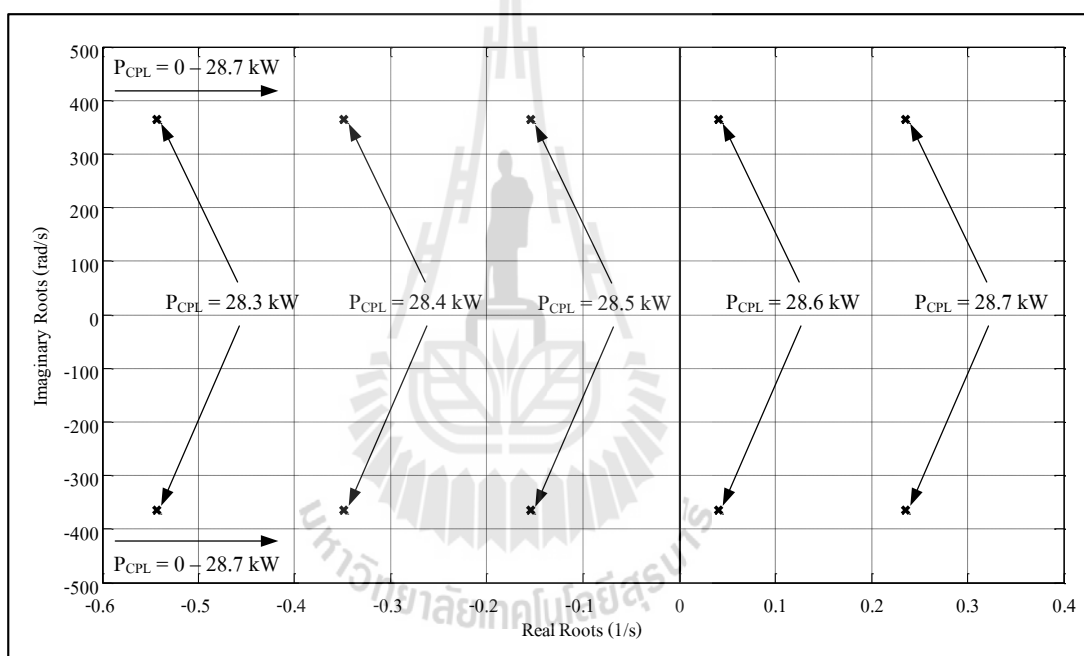
จากเมทริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  และ  $V_{dc,0}$  ดังสมการที่ (4-11) และสมการที่ (4-9) ตามลำดับ สามารถคำนวณหาค่าเจาะจงของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ( $P_{CPL}$ ) มีค่าเท่ากับ 15 kW ผ่านคำสั่ง “eig(A)” ของโปรแกรม MATLAB ได้ โดยเส้นทางเดินของค่าเจาะจง แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 ดังนี้



รูปที่ 4.9 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ  $P_{CPL} = 15$  kW

จากรูปที่ 4.9 จะพบว่า ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วยค่าเจาะจง  $\lambda_1 - \lambda_6$  โดยที่ค่าเจาะจง  $\lambda_1 - \lambda_4$  นั้นจะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์  $L_{eq}$  และ  $C_{eq}$  ของระบบ เนื่องจากค่าเจาะจงดังกล่าวอยู่ตรงตำแหน่งที่ใกล้กับความถี่ธรรมชาติของระบบ ซึ่งคำนวณได้จาก  $1/\sqrt{L_{eq}C_{eq}} = 4.56 \times 10^6$  ในขณะที่ค่าเจาะจง  $\lambda_5$  และ  $\lambda_6$  นั้นจะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์  $L_{dc}$  และ  $C_{dc}$  ของวงจรกรอง เนื่องจากค่าเจาะจงดังกล่าวอยู่ตรงตำแหน่งที่ใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) ของระบบ ซึ่งคำนวณได้จาก  $1/\sqrt{L_{dc}C_{dc}} = 365.15$  และนอกจากนั้นแล้วจะพบว่า เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างค่าส่วนจริงของค่าเจาะจง  $\lambda_1 - \lambda_4$  กับ

ค่าส่วนจริงของค่าเฉพาะ  $\lambda_5$  และ  $\lambda_6$  จะมีค่าเท่ากับ 80.63 ซึ่งมีค่ามากกว่า 5 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าเฉพาะ  $\lambda_5$  และ  $\lambda_6$  ที่มีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของวงจรกรอง ( $L_{dc}$  และ  $C_{dc}$ ) เป็นค่าเฉพาะเด่น (dominant eigenvalues) หรือเป็นขั้วเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยค่าเฉพาะเด่นหรือค่าขั้วเด่นนี้จะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา สามารถวิเคราะห์ได้จากค่าเฉพาะเด่นของระบบได้ ซึ่งเส้นทางเดินของค่าเฉพาะเด่นของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 – 28.7 kW แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 ดังนี้



รูปที่ 4.10 ค่าเฉพาะที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

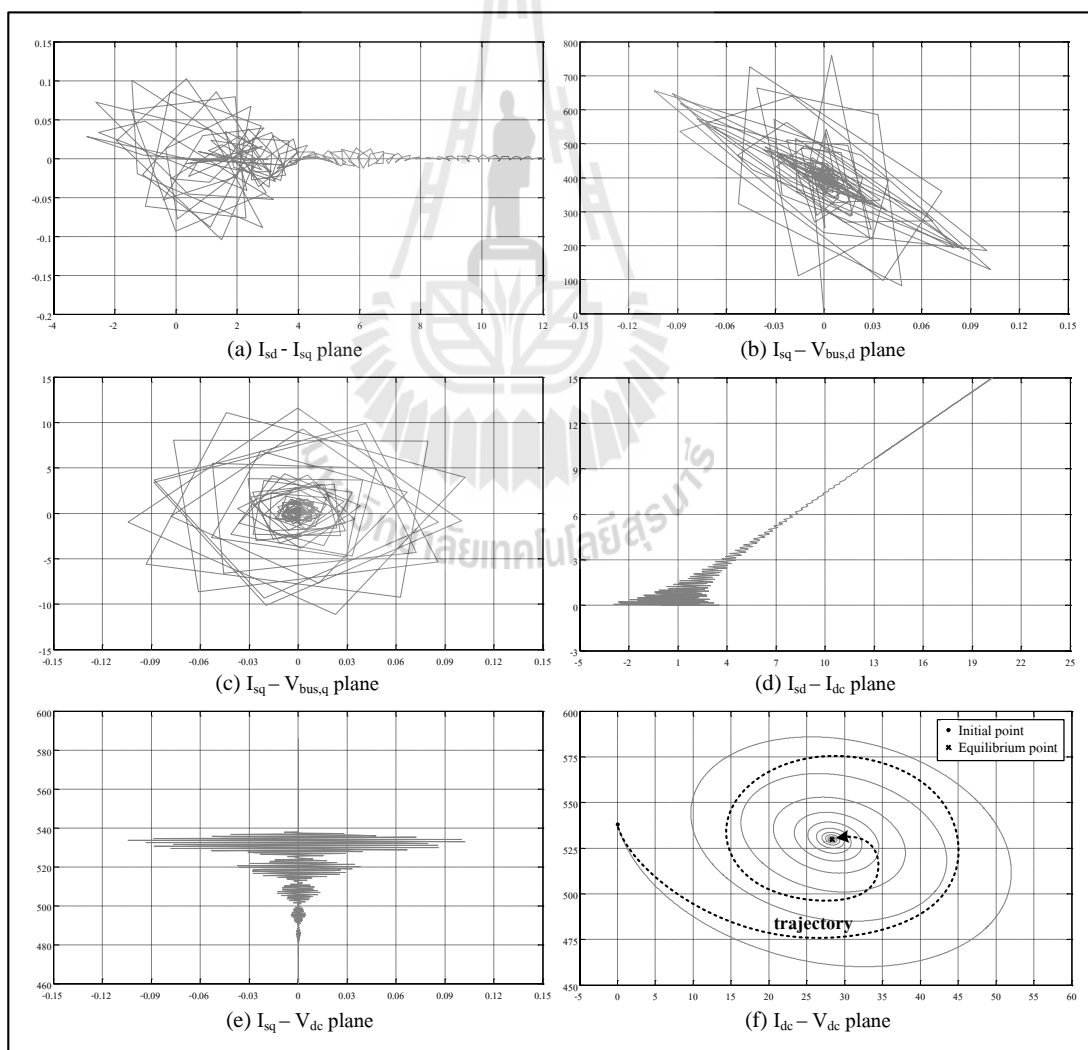
จากรูปที่ 4.10 จะสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 28.6 kW ส่วนจริงของค่าเฉพาะเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีค่ามากกว่าศูนย์ ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (3-6) ที่กล่าวไว้ว่า ระบบจะมีเสถียรภาพ ถ้าส่วนจริงของค่าเฉพาะมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ ระบบจะขาดเสถียรภาพ จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 จะมีเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 28.5 kW และจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่ามากกว่า 28.5 kW

#### 4.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

จากขั้นตอนของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งได้รับการอธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2 ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา จะพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เป็นวิธีการทางกราฟิกซึ่งจะต้องสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ 2 ตัว แต่เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งแทนด้วยชุดสมการอนุพันธ์ดังสมการที่ (4-4) จะพบว่า มีตัวแปรสถานะทั้งหมด 6 ตัว ดังนั้นคำถามที่ตามมาก็คือ การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ใด สามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.3.1 จะพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีขั้วเด่นเพียงแค่ 2 ตัว เท่านั้น โดยขั้วเด่นนี้จะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งขั้วเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้จะเป็นขั้วที่อยู่ตรงตำแหน่งของวงจรรอง เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าของวงจรรอง ( $L_{dc}$  และ  $C_{dc}$ ) ดังนั้นจึงทำให้ตัวแปรสถานะ  $I_{dc}$  (กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอง และ  $V_{dc}$  (แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรรอง) เป็นตัวแปรสถานะที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถทำได้โดยอาศัยการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพ นั่นคือ ระนาบของตัวแปรสถานะ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  ได้ แต่อย่างไรก็ตามการหาคำตอบของสมการอนุพันธ์ เพื่อนำคำตอบที่หาได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  ยังคงต้องดำเนินการโดยอาศัยการหาคำตอบจากสมการอนุพันธ์ทั้ง 6 สมการ นั่นคือสมการ  $\dot{I}_{sd}$ ,  $\dot{I}_{sq}$ ,  $\dot{V}_{bus,d}$ ,  $\dot{V}_{bus,q}$ ,  $\dot{I}_{dc}$  และ  $\dot{V}_{dc}$  ดังสมการที่ (4-4) ซึ่งไม่สามารถที่จะดำเนินการโดยอาศัยการหาคำตอบจากเฉพาะสมการ  $\dot{I}_{dc}$  และ  $\dot{V}_{dc}$  โดยไม่สนใจสมการอื่น ๆ ที่เหลือ กล่าวคือ เป็นการหาคำตอบของสมการอนุพันธ์โดยสนใจเฉพาะสมการอนุพันธ์ของขั้วเด่นไม่ได้ เพราะอาจจะทำให้คำตอบของสมการอนุพันธ์ที่หาได้มีความคลาดเคลื่อนและส่งผลทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้

เพื่อเป็นการยืนยันว่า การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ในขณะที่การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่คู่ของ  $I_{dc}$  กับ  $V_{dc}$  ไม่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงดำเนินการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลงบนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ต่าง ๆ โดยจะพิจารณาการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ

15 kW และระบบมีค่าเริ่มต้นการทำงานแสดงดังตารางที่ 4.1 เนื่องจากทราบว่า ที่สถานะนี้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพ ซึ่งสามารถยืนยันการมีเสถียรภาพของระบบที่จุดปฏิบัติงานดังกล่าวได้จากผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกคิซี ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 โดยจะพบว่า การตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกคิซีจะมีการสั่นไหวและลู่เข้าหาจุดปฏิบัติงานของระบบเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ ดังนั้นจากสมการที่ (4-4) และเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบดังตารางที่ 4.1 สามารถสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณามนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ต่าง ๆ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 15 kW ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ดังนี้



รูปที่ 4.11 trajectory มนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ต่าง ๆ เมื่อ  $P_{CPL} = 15$  kW

จากรูปที่ 4.11 จะสังเกตได้ว่า การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่คู่ของ  $I_{dc}$  กับ  $V_{dc}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.11(a) ถึงรูปที่ 4.11(e) มีรูปแบบการเคลื่อนที่ไม่เป็นไปตามรูปแบบการเคลื่อนที่ของคำตอบสมการอนุพันธ์ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งได้รับการอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2 ในบทที่ 3 ดังนั้นการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบดังกล่าวจึงไม่สามารถอธิบายหรือให้ข้อมูลเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ในขณะที่การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.11(f) จะมีรูปแบบการเคลื่อนที่เป็นแบบโพกัสเสถียร ซึ่งการเคลื่อนที่ในรูปแบบนี้จะเคลื่อนที่โดยเริ่มจากจุดเริ่มต้นและจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติการก่อนที่จะเข้าสู่จุดปฏิบัติการของระบบเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกคิซี ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 จะพบว่า ให้ผลที่สอดคล้องกัน นั่นคือ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติการนี้ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้

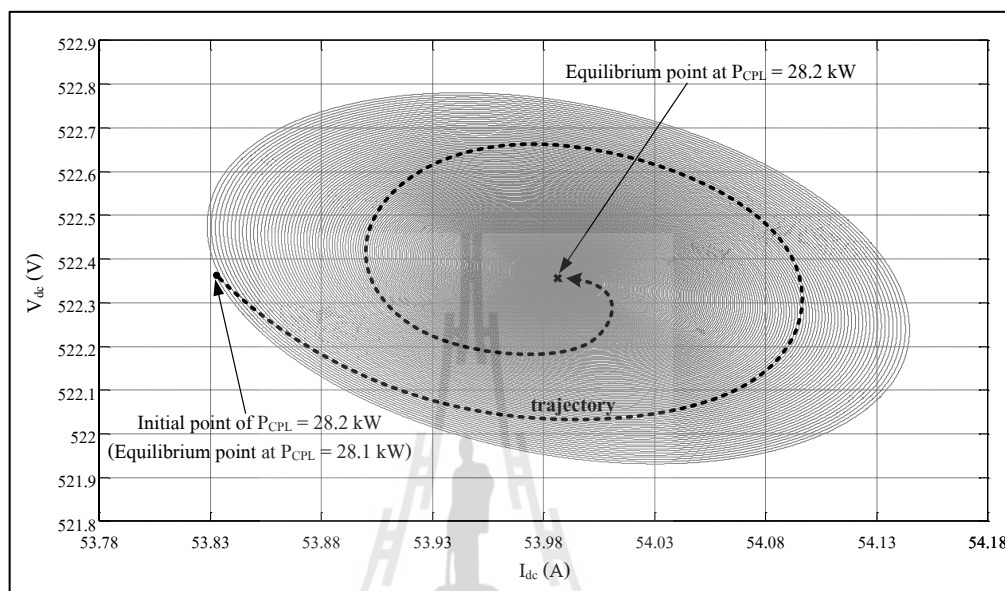
เนื่องจากในบทที่ 4 นี้ ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยต้องการให้การขาดเสถียรภาพของระบบเกิดขึ้นเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าที่ค่อนข้างสูง เพื่อให้ให้เห็นความคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นชัดเจนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส จะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก และกรณีที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ โดยที่การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบจะดำเนินการเมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้ว กล่าวคือ ไม่ได้เป็นการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้ง 2 กรณีที่พิจารณานี้ ไม่ได้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด แต่เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในสถานะอยู่ตัว เช่นเดียวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งถือว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพในสถานะอยู่ตัวเช่นกัน โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสทั้ง 2 กรณี แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

**กรณีที่ 1** การวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโหลดในกรณีนี้จะอาศัยการเพิ่มค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ที่ละ 100 W ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งจะพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาขาดเสถียรภาพ

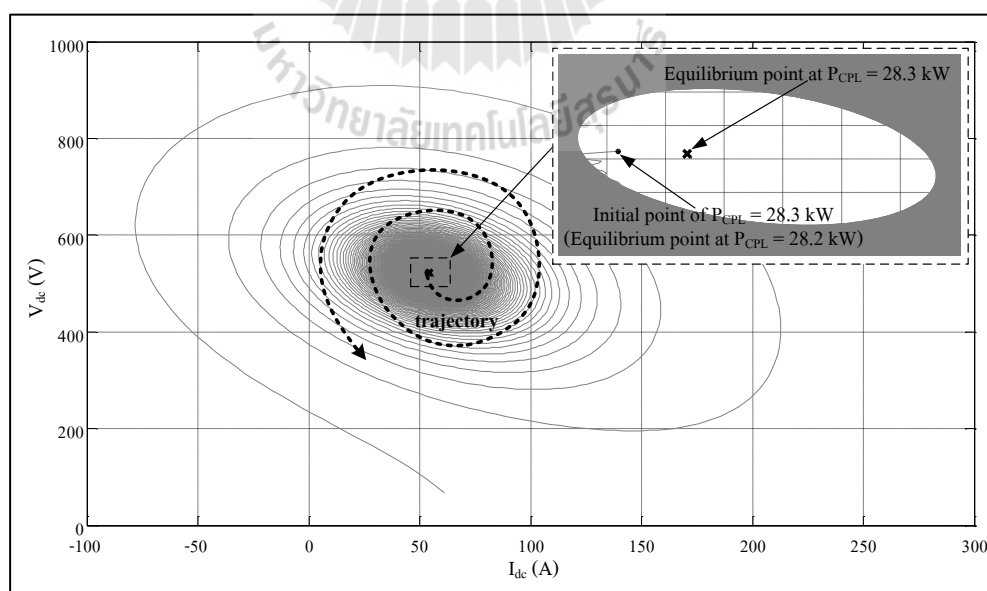


ซึ่งเป็นการดำเนินการเช่นเดียวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ที่คำนวณหาค่าเจาะจงของระบบในทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ 100 W ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ดังนั้นหลักการของการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสในกรณีนี้คือ จุดปฏิบัติงานหรือจุดสมดุลของระบบ ( $\mathbf{x}_0$ ) ที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ณ สภาวะอยู่ตัวปัจจุบัน ( $P_{CPL}$ ) จะถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบ ( $\mathbf{x}(0)$ ) ที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่ถูกเพิ่มค่าขึ้นจากค่าเดิมอีก 100 W ( $P_{CPL+100} = P_{CPL} + 100$  W) นั่นคือการกำหนดให้  $\mathbf{x}(0)$  at  $P_{CPL+100} = \mathbf{x}_0$  at  $P_{CPL}$  ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่พิจารณาเสถียรภาพของระบบ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 28.2 kW จุดปฏิบัติงานหรือจุดสมดุลของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 28.1 kW จะถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 28.2 kW จากนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา สามารถดำเนินการโดยอาศัยหลักการและขั้นตอนของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสที่ได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.3.2 ในบทที่ 3 ได้ ดังนั้นจากสมการที่ (4-4) และจุดปฏิบัติงานของระบบ ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยการคำนวณบน โปรแกรม MATLAB โดยกำหนดให้  $\dot{I}_{sd}$ ,  $\dot{I}_{sq}$ ,  $\dot{V}_{bus,d}$ ,  $\dot{V}_{bus,q}$ ,  $\dot{I}_{dc}$  และ  $\dot{V}_{dc}$  ในสมการที่ (4-4) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ จะสามารถสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW และเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 ตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่าในรูปที่ 4.12 เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มต้นจากจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 28.1 kW และจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 28.2 kW ก่อนที่จะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานดังกล่าวเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 28.2 kW นี้เป็นแบบโพกัสเสถียร ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพ ในขณะที่ รูปที่ 4.13 นั้น เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มต้นจากจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 28.2 kW โดยจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 28.3 kW และจะออกห่างจากจุดปฏิบัติงานดังกล่าวมากยิ่งขึ้นอย่างไม่มีการสิ้นสุดเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 28.3 kW นี้เป็นแบบโพกัสไม่เสถียร ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะ

ขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่ามากกว่า 28.2 kW



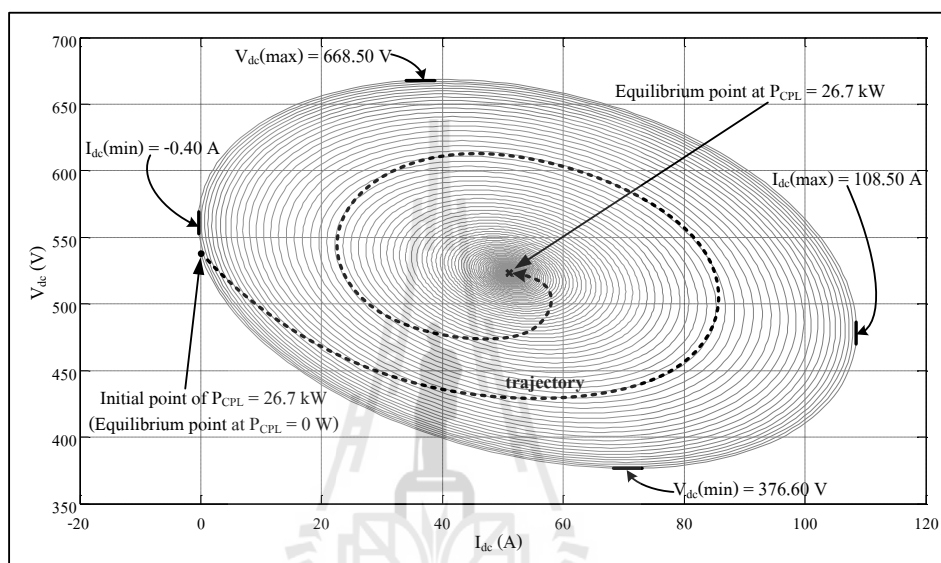
รูปที่ 4.12 trajectory เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW



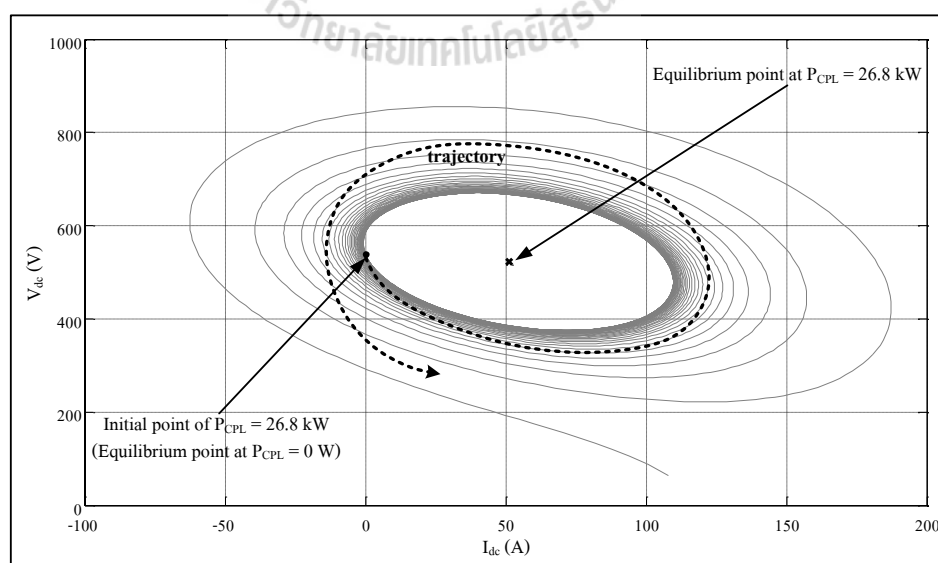
รูปที่ 4.13 trajectory เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW

**กรณีที่ 2** การวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีนี้จะเป็นการพิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติจาก 0 W ไปเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติค่าใดที่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ( $P_{CPL,Unstable}$ ) โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงโหลดเพียงครั้งเดียว กล่าวคือเป็นการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 0 W ไปเป็น  $P_{CPL,Unstable}$  ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นและผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสในกรณีที่ 1 จะพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีจุดขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าอยู่ในหน่วย kW ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติจาก 0 W ไปเป็น  $P_{CPL,Unstable}$  แล้วส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้จะต้องใช้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีนี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ซึ่งหลักการของการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสในกรณีนี้คือ จุดปฏิบัติงานที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 0 W จะถูกกำหนดให้เป็นจุดเริ่มต้นการทำงานให้กับระบบ นั่นคือ กำหนดให้  $I_{sd}(0) = 0$  A,  $I_{sq}(0) = 0$  A,  $V_{bus,d}(0) = 0$  V,  $V_{bus,q}(0) = 0$  V,  $I_{dc}(0) = 0$  A และ  $V_{dc}(0) = 537.99$  V จากนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา สามารถดำเนินการ โดยอาศัยหลักการและขั้นตอนของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสที่ได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.3.2 ในบทที่ 3 ได้ ดังนั้นจากสมการที่ (4-4) และจุดเริ่มต้นการทำงานของระบบที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น จะสามารถสร้างการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW และเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 ตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่า ในรูปที่ 4.14 เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มจากจุดเริ่มต้นการทำงานที่ได้กำหนดไว้ และจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 26.7 kW ก่อนที่จะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานดังกล่าวเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 26.7 kW นี้เป็นแบบ โพลัสเสถียร ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพ ในขณะที่ รูปที่ 4.15 นั้น เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มจากจุดเริ่มต้นการทำงานที่ได้กำหนดไว้ โดยจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 26.8 kW และจะออกห่างจากจุดปฏิบัติงานดังกล่าว

มากยิ่งขึ้นอย่างไม่มีการสิ้นสุดเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอูคมคติมีค่าเท่ากับ 26.8 kW นี้เป็นแบบโพกัสไม่เสถียร ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอูคมคติมีค่ามากกว่า 26.7 kW



รูปที่ 4.14 trajectory เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW



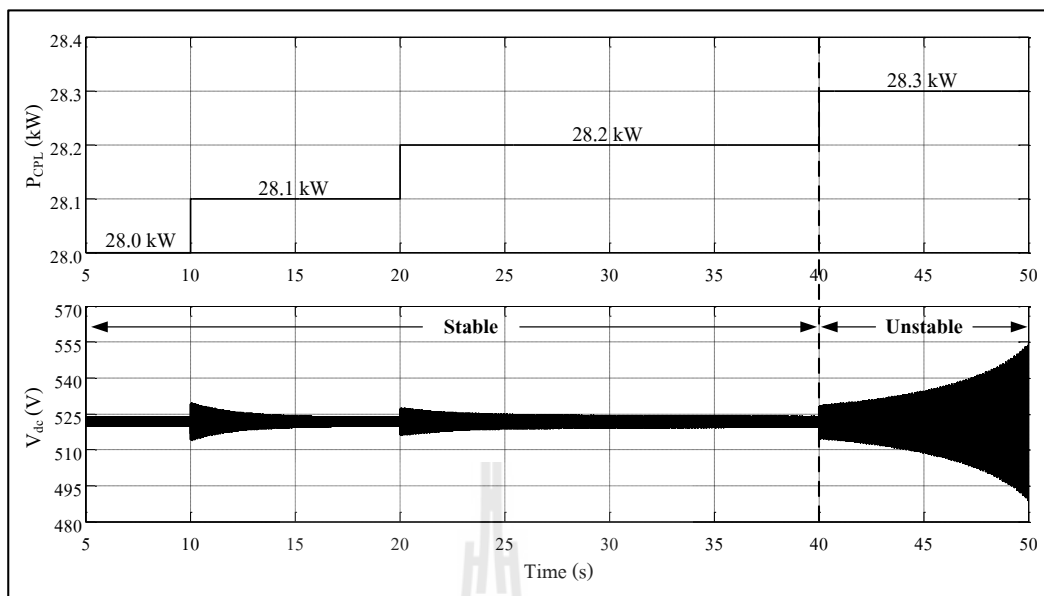
รูปที่ 4.15 trajectory เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW

ดังนั้นจากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส จะสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่ามากกว่า 28.2 kW ซึ่งข้อสรุปนี้จะเป็นจริงสำหรับการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กเท่านั้น ในขณะที่ การเปลี่ยนแปลง โหลดของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่ามากกว่า 26.8 kW

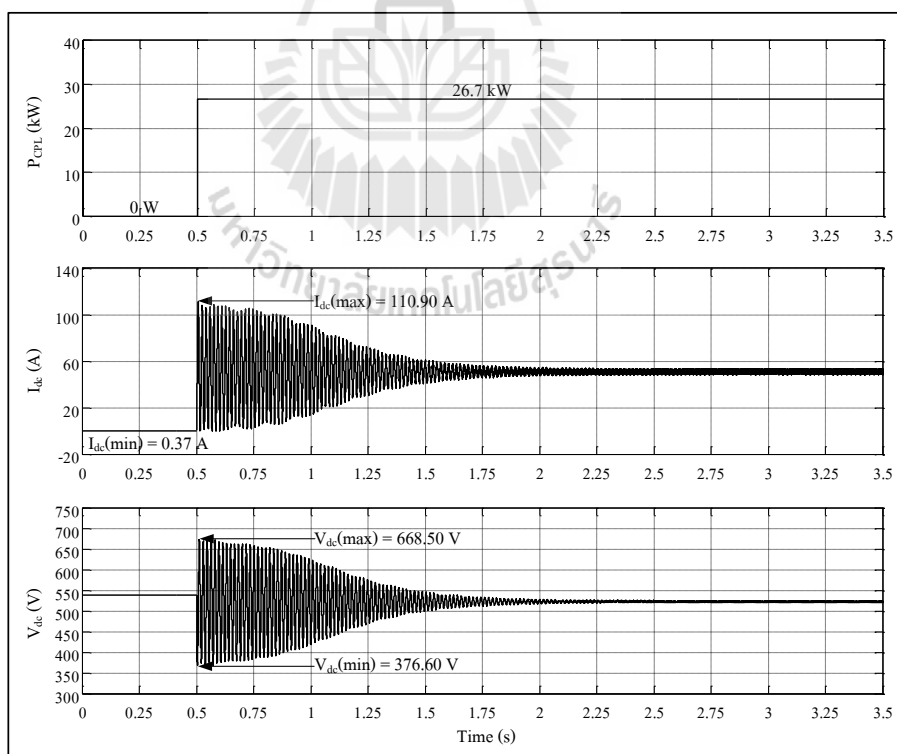
นอกจากนี้แล้ว จากหลักการและขั้นตอนของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.3.2 ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา จะพบว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้แล้ว หากรูปแบบการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์เป็นการเคลื่อนที่แบบมีการสั่นไกว จะสามารถประมาณการสั่นไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW จากกราฟการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในรูปที่ 4.14 จะสังเกตได้ว่า การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบมีการสั่นไกว ดังนั้นจะสามารถประมาณการสั่นไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้ดังนี้ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง ( $I_{dc}$ ) จะมีการสั่นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง 0.40 – 108.50 A และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ( $V_{dc}$ ) จะมีการสั่นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง 376.6 – 668.50 V ก่อนที่การสั่นไกวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบ

#### 4.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ

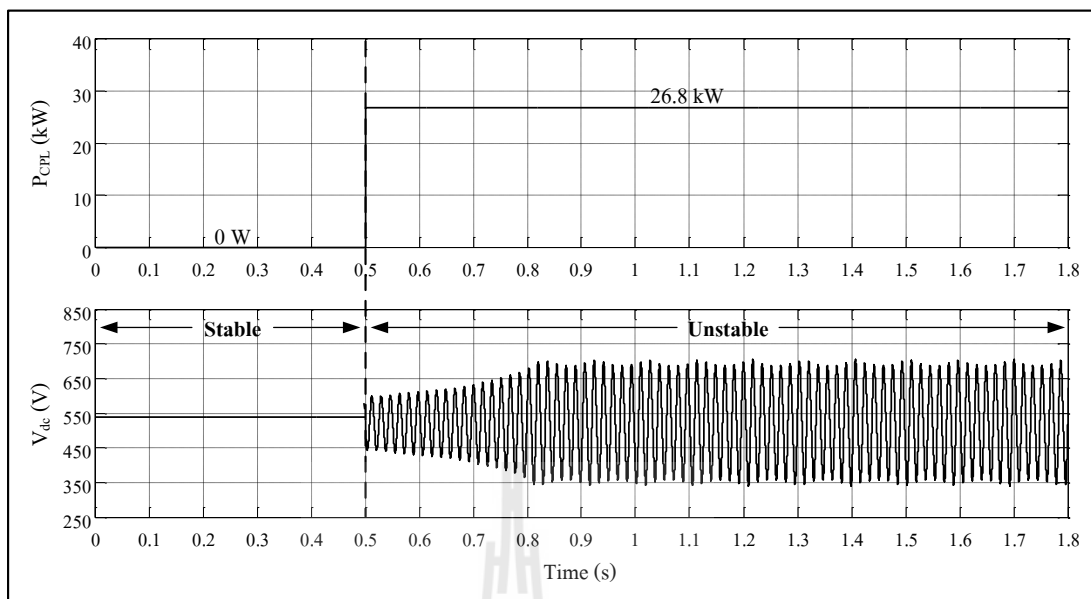
การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ สามารถดูได้จากภาคผนวก ก.2 และผลการยืนยันการขาดเสถียรภาพแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18 โดยรูปที่ 4.16 จะเป็นการยืนยันการขาดเสถียรภาพในกรณีที่ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ในขณะที่รูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 นั้นจะเป็นการยืนยันการมีเสถียรภาพและการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่



รูปที่ 4.16 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์  
เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก



รูปที่ 4.17 ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์  
เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW



รูปที่ 4.18 ผลการยืนยันการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์  
เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW

จากรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นการยืนยันการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก จะสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จะพบว่า มีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นนั้น ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่ามากกว่า 28.5 kW ดังนั้นความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพที่เกิดขึ้นคือ 300 W หรือคิดเป็น 1.06 % ในขณะที่ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หรรษาบเฟส ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่ามากกว่า 28.2 kW ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ จะพบว่า มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่าจะเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก จะมีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หรรษาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของ

ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง หรือเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ จะให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ

จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ซึ่งเป็นการยืนยันการมีเสถียรภาพและการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ จะสังเกตได้ว่า ในรูปที่ 4.17 เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะยังคงมีเสถียรภาพ ในขณะที่ รูปที่ 4.18 นั้น เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่ามากกว่า 26.7 kW ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 จะพบว่า มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ สามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จะพบว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้ระบุว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่ามากกว่า 28.5 kW เท่านั้น นั่นหมายความว่า ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 26.8 kW ระบบจะมีเสถียรภาพอย่างแน่นอน เนื่องจากส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่าเป็นลบ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วที่สภาวะดังกล่าว ระบบอาจจะขาดเสถียรภาพเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโหลดภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้ ซึ่งการขาดเสถียรภาพในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 26.8 kW สามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.18 ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ จะมีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพที่เกิดขึ้นคือ 1.8 kW หรือคิดเป็น 6.74 % ซึ่งถือว่าเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าค่อนข้างสูง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก นอกจากจะให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก มีความคลาดเคลื่อนแล้ว ยังไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของ



ระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้อีกด้วย ซึ่งเกิดจากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นไม่สามารถที่จะกำหนดจุดเริ่มต้นหรือเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานให้กับระบบ ในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถที่จะกำหนดจุดเริ่มต้นหรือเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการนี้ สามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก และภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ที่เกิดขึ้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้ว กล่าวคือ เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพในสภาวะอยู่ตัว ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ รวมทั้งยังสามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด กล่าวคือ เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพในสภาวะชั่วคราว ได้อย่างถูกต้องแม่นยำอีกด้วย ซึ่งรายละเอียดของการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ได้รับการอธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.4 ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ ที่สามารถดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งในสภาวะอยู่ตัวและในสภาวะชั่วคราว ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ไม่ได้มีเพียงแต่วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสเพียงวิธีการเดียวเท่านั้น ยังมีวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟอีกหนึ่งวิธี ที่สามารถดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งในสภาวะอยู่ตัวและในสภาวะชั่วคราว ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส แต่งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เนื่องจากวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่าย มีการคำนวณไม่ซับซ้อน และสามารถดำเนินการวิเคราะห์ได้ง่ายกว่าวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ

จากรูปที่ 4.16 นอกจากจะสามารถใช้ยืนยันการมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้แล้ว ยังสามารถใช้ยืนยันการประมาณการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงาน เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW ได้อีกด้วย ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่า  $I_{dc}$  จะมีการสั้นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง 0.37 – 110.90 A และ  $V_{dc}$  จะมีการสั้นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง 368.80 – 672.80 V ก่อนที่การสั้นไกวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3.2 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะพบว่า มีความใกล้เคียงกัน โดยผลที่ได้ จากการประมาณด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสนั้น  $I_{dc}$  จะมีการสั้นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง -0.40 – 108.50 A และ  $V_{dc}$  จะมีการสั้นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง 376.60 – 668.50 V ก่อนที่การสั้นไกวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็น

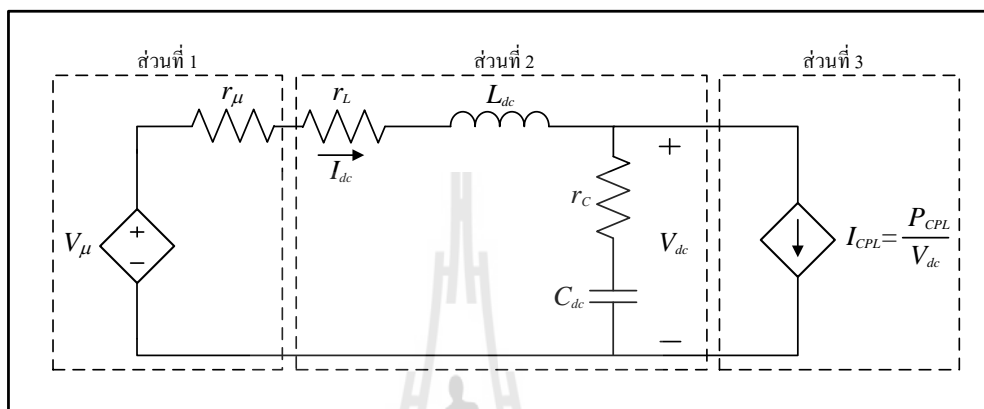
เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้อีกด้วย ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ในบทที่ 4 นี้ นอกจากจะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นและวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบ ดังรายละเอียดที่ได้นำเสนอไปในข้างต้นแล้ว งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับสำหรับการรับประกันว่า การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน อีกด้วย โดยการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ แสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 4.4 ดังนี้

#### 4.4 การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ จะดำเนินการประมาณจากวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบแทนการประมาณจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาโดยตรง เพื่อลดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งวงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ แสดงดังรูปที่ 4.19 จากรูปจะพบว่า วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่อิสระ  $V_\mu$  ที่มีความต้านทาน  $r_\mu$  ต่ออนุกรมอยู่กับแหล่งจ่าย ซึ่งใช้แทนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดยคำนึงถึงพลวัตของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลและไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 2 วงจรกรอง และส่วนที่ 3 แหล่งจ่ายกระแสไม่อิสระแบบอุดมคติซึ่งใช้แทนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่ต่อขนานกับระบบผ่านวงจรกรอง ดังนั้นจะสังเกตได้ว่า วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เป็นวงจรไฟฟ้า ที่พิจารณาให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลและไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มี

โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่อิสระ  $V_\mu$  ที่มีความต้านทาน  $r_\mu$  ต่ออนุกรมอยู่กับแหล่งจ่าย ในขณะที่ส่วนประกอบอื่น ๆ ที่เหลือของ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคตินั้น นั่นคือ วงจรกรอง และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ จะพิจารณาให้ยังคงมีองค์ประกอบที่เหมือนเดิม



รูปที่ 4.19 วงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ สมการพลวัตของวงจรสมมูลอย่างง่ายในรูปที่ 4.19 คือ

$$\begin{cases} \dot{I}_{dc} = -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_C P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc}} + \frac{1}{L_{dc}} V_\mu \\ \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc}} \end{cases} \quad (4-12)$$

โดยที่  $V_\mu$  คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดยคำนึงถึงพลวัตของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลและ ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (4-13) ดังนี้

$$V_\mu = \frac{3\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{bus}}{\pi} \quad (4-13)$$

โดยที่  $V_{bus}$  คือ แรงดันเฟส (rms) ที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4-6) และสมการที่ (4-7) โดยอาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขของของนิวตันและราฟสัน

จากสมการที่ (4-13) จะสังเกตได้ว่า  $V_\mu$  จะมีค่าขึ้นอยู่กับ  $V_{bus}$  ซึ่ง  $V_{bus}$  นี้จะมีความสัมพันธ์กับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ( $P_{CPL}$ ) โดยถ้า  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้  $V_{bus}$  มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงทำให้  $V_\mu$  นอกจากจะมีค่าขึ้นอยู่กับ  $V_{bus}$  แล้ว ยังมีค่าไม่คงที่อีกด้วย ด้วยเหตุนี้  $V_\mu$  จึงถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่อิสระ

จากสมการที่ (4-12) เมื่อกำหนดให้  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะได้สมการที่ใช้คำนวณหาจุดปฏิบัติงานของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงได้ดังสมการที่ (4-14) ดังนี้

$$\begin{cases} I_{dc,0} = \frac{2P_{CPL}}{V_\mu + \sqrt{V_\mu^2 - 4(r_\mu + r_L)P_{CPL}}} \\ V_{dc,0} = \frac{V_\mu + \sqrt{V_\mu^2 - 4(r_\mu + r_L)P_{CPL}}}{2} \end{cases} \quad (4-14)$$

การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ เป็นการวิเคราะห์ที่อยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องคำนวณฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณา ซึ่งจากบทที่ 3 ที่ผ่านมาจะพบว่า การคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์ นอกจากจะมีความยุ่งยากซับซ้อนแล้ว ยังมีข้อจำกัดของระบบที่สามารถใช้วิธีการนี้ได้ เช่น ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะต้องไม่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแบบไม่อิสระ เป็นต้น รวมทั้งฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้จากวิธีการดังกล่าว จะมีความตึงในแง่ของเสถียรภาพเป็นอย่างมาก ซึ่งทำให้ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ค่อนข้างจำกัดวงแคบ เมื่อเทียบกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริง ในขณะที่การคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซุจิโน นอกจากจะสามารถใช้คำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟได้ง่ายกว่าวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์แล้ว ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซุจิโน จะมีขนาดที่ใกล้เคียงกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริง มากกว่าขอบเขตของการมีเสถียรภาพ

แบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์อีกด้วย ดังนั้นการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ที่อาศัยการประมาณจากวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบแทนการประมาณจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาโดยตรง งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน และจะกำหนดให้พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เป็นพารามิเตอร์ชุดเดียวกับพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ดังนั้นจากรายละเอียดและขั้นตอนของการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟและการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน ที่ได้รับการอธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.5.2 ในบทที่ 3 จะสามารถคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟและประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ดังแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: การคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน จะตั้งต้นจากแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิด ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการอนุพันธ์ของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (4-12) จะพบว่า เป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีจุดปฏิบัติงานของระบบไม่ได้อยู่ที่จุดกำเนิด ดังนั้นจะต้องทำการจัดรูปแบบจำลองดังกล่าวให้มีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิดก่อน ซึ่งทำได้โดยอาศัยการเลื่อนจุดปฏิบัติงานของระบบที่จุดใด ๆ ให้ไปอยู่ที่จุดกำเนิด ดังแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

จากจุดปฏิบัติงานของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่จุด  $I_{dc,0}$  และ  $V_{dc,0}$  ใด ๆ ที่ไม่ได้อยู่ที่จุดกำเนิด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4-14) จะสามารถเลื่อนจุดปฏิบัติงานดังกล่าวให้ไปอยู่ที่จุดกำเนิดได้ โดยอาศัยการเปลี่ยนตัวแปรสถานะของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ดังสมการที่ (4-15) และสมการที่ (4-16) ดังนี้

$$x_1 = I_{dc} - I_{dc,0} \quad (4-15)$$

$$x_2 = V_{dc} - V_{dc,0} \quad (4-16)$$

ดังนั้นจะสามารถจัดรูปแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุด  $I_{dc,0}$  และ  $V_{dc,0}$  ใด ๆ ที่แทนด้วยแบบจำลองตัวแปรสถานะดังสมการที่ (4-12) ให้เป็นจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิด และอยู่ในรูปของตัวแปรสถานะที่ได้กำหนดขึ้นมาใหม่ นั่นคือ  $x_1$  และ  $x_2$  ได้ดังนี้

พิจารณาสมการ  $\frac{dI_{dc}}{dt}$  ในสมการที่ (4-12) นั่นคือ

$$\frac{dI_{dc}}{dt} = -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_C P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc}} + \frac{1}{L_{dc}} V_\mu \quad (4-17)$$

จากสมการที่ (4-17) สามารถจัดรูปให้จุดปฏิบัติการของระบบอยู่ที่จุดกำเนิดและเป็นสมการที่อยู่ในรูปของตัวแปรสถานะตัวใหม่ ( $x_1$  และ  $x_2$ ) ได้ โดยอาศัยสมการที่ (4-14) และสมการที่ (4-15) ซึ่งมีขั้นตอนการพิสูจน์แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(x_1 + I_{dc,0}) &= -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}}(x_1 + I_{dc,0}) - \frac{1}{L_{dc}}(x_2 + V_{dc,0}) + \frac{r_C P_{CPL}}{L_{dc}(x_2 + V_{dc,0})} \\ &\quad + \frac{1}{L_{dc}} V_\mu \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x_1 + \frac{d}{dt}I_{dc,0} &= -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}}x_1 - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}}I_{dc,0} - \frac{1}{L_{dc}}x_2 - \frac{1}{L_{dc}}V_{dc,0} \\ &\quad + \frac{r_C P_{CPL}}{L_{dc}(x_2 + V_{dc,0})} + \frac{1}{L_{dc}}V_\mu \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x_1 &= -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}}x_1 - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}}\left(\frac{P_{CPL}}{V_{dc,0}}\right) - \frac{1}{L_{dc}}x_2 - \frac{1}{L_{dc}}V_{dc,0} \\ &\quad + \frac{r_C P_{CPL}}{L_{dc}(x_2 + V_{dc,0})} + \frac{1}{L_{dc}}V_\mu ; I_{dc,0} = \frac{P_{CPL}}{V_{dc,0}} \end{aligned}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4-17) จะสามารถจัดรูปใหม่ ให้เป็นสมการที่อยู่ในรูปของตัวแปรสถานะ  $x_1$  และ  $x_2$  ซึ่งมีจุดปฏิบัติการของระบบอยู่ที่จุดกำเนิดได้ ดังสมการที่ (4-18) ดังนี้

$$\frac{d}{dt}x_1 = -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}}x_1 - \left( \frac{1}{L_{dc}} + \frac{r_C P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc,0}} \cdot \frac{1}{(x_2 + V_{dc,0})} \right) x_2 \quad (4-18)$$

พิจารณาสมการ  $\frac{dV_{dc}}{dt}$  ในสมการที่ (4-12) นั่นคือ

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc}} \quad (4-19)$$

จากสมการที่ (4-19) สามารถจัดรูปให้จุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิดและเป็นสมการที่อยู่ในรูปของตัวแปรสถานะตัวใหม่ ( $x_1$  และ  $x_2$ ) ได้ โดยอาศัยสมการที่ (4-14) และสมการที่ (4-16) ซึ่งมีขั้นตอนการพิสูจน์แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(x_2 + V_{dc,0}) &= \frac{1}{C_{dc}}(x_1 + I_{dc,0}) - \frac{P_{CPL}}{C_{dc}(x_2 + V_{dc,0})} \\ \frac{d}{dt}x_2 + \frac{d}{dt}V_{dc,0} &= \frac{1}{C_{dc}}x_1 + \frac{1}{C_{dc}}I_{dc,0} - \frac{P_{CPL}}{C_{dc}(x_2 + V_{dc,0})} \\ \frac{d}{dt}x_2 &= \frac{1}{C_{dc}}x_1 + \frac{1}{C_{dc}}\left(\frac{P_{CPL}}{V_{dc,0}}\right) - \frac{P_{CPL}}{C_{dc}(x_2 + V_{dc,0})} ; I_{dc,0} = \frac{P_{CPL}}{V_{dc,0}} \end{aligned}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4-19) จะสามารถจัดรูปใหม่ ให้เป็นสมการที่อยู่ในรูปของตัวแปรสถานะ  $x_1$  และ  $x_2$  ซึ่งมีจุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิดได้ ดังสมการที่ (4-20) ดังนี้

$$\frac{d}{dt}x_2 = \frac{1}{C_{dc}}x_1 + \frac{P_{CPL}}{C_{dc} \cdot V_{dc,0}} \cdot \frac{1}{(x_2 + V_{dc,0})} \cdot x_2 \quad (4-20)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4-18) และสมการที่ (4-20) จะได้แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่จุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิด ดังสมการที่ (4-21) ดังนี้

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}x_1 = -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}}x_1 - \left(\frac{1}{L_{dc}} + \frac{r_C P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc,0}} \cdot \frac{1}{(x_2 + V_{dc,0})}\right)x_2 \\ \frac{d}{dt}x_2 = \frac{1}{C_{dc}}x_1 + \frac{P_{CPL}}{C_{dc} \cdot V_{dc,0}} \cdot \frac{1}{(x_2 + V_{dc,0})} \cdot x_2 \end{cases} \quad (4-21)$$

ขั้นตอนที่ 2: จากแบบจำลองของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (4-21) จะพบว่ามิพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอยู่หนึ่งพจน์ นั่นคือพจน์  $\frac{1}{x_2 + V_{dc,0}}$  ซึ่งปรากฏอยู่ทั้งใน

สมการ  $\frac{d}{dt}x_1$  และสมการ  $\frac{d}{dt}x_2$  ดังนั้น  $q$  จะมีค่าเท่ากับ 1 และพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวจะถูกแทนด้วย  $f_1(x_2) = \frac{1}{x_2 + V_{dc,0}}$

ขั้นตอนที่ 3: จาก  $q=1$  และ  $f_1(x_2) = \frac{1}{x_2 + V_{dc,0}}$  ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 จะสามารถ

กำหนดชุดของแบบจำลองเฉพาะถิ่นที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถใช้แทนแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ จำนวน  $2^q = 2^1 = 2$  ชุด

โดยอาศัยการพิจารณาให้พจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น  $f_1(x_2) = \frac{1}{x_2 + V_{dc,0}}$  เป็นค่าคงที่ ด้วยค่าที่น้อยที่สุด

$x_{2,\min}^1$  และค่าที่มากที่สุด  $x_{2,\max}^1$  ได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาให้  $f_1(x_2)$  เป็นค่าคงที่ ด้วยค่าที่น้อยที่สุด นั่นคือกำหนดให้  $x_2 = x_{2,\min}^1$  จะได้  $f_1(x_2), \max = \frac{1}{x_{2,\min}^1 + V_{dc,0}}$  ดังนั้นจะได้แบบจำลองเฉพาะถิ่นที่เป็นเชิงเส้น ชุดที่ 1 ดังสมการ

ที่ (4-22) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} & -\left(\frac{1}{L_{dc}} + \frac{r_C P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc,0}} \cdot f_1(x_2), \max\right) \\ \frac{1}{C_{dc}} & \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc,0}} \cdot f_1(x_2), \max \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = A_1 \mathbf{x} \quad (4-22)$$

และเมื่อพิจารณาให้  $f_1(x_2)$  เป็นค่าคงที่ ด้วยค่าที่มากที่สุด นั่นคือกำหนดให้  $x_2 = x_{2,\max}^1$  จะได้  $f_1(x_2), \min = \frac{1}{x_{2,\max}^1 + V_{dc,0}}$  ดังนั้นจะได้แบบจำลองเฉพาะถิ่นที่เป็นเชิงเส้น ชุดที่ 2 ดัง

สมการที่ (4-23) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} & -\left(\frac{1}{L_{dc}} + \frac{r_C P_{CPL}}{L_{dc} V_{dc,0}} \cdot f_1(x_2), \min\right) \\ \frac{1}{C_{dc}} & \frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc,0}} \cdot f_1(x_2), \min \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = A_2 \mathbf{x} \quad (4-23)$$



ขั้นตอนที่ 4: จากเมตริกซ์สถานะเฉพาะถิ่น  $A_1$  และ  $A_2$  ที่ได้จากสมการที่ (4-22) และสมการที่ (4-23) ตามลำดับ สามารถสร้างเงื่อนไขของอสมการเมตริกซ์เชิงเส้นที่รับประกันว่าวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับอย่างแน่นอนได้ดังสมการที่ (4-24) ดังนี้

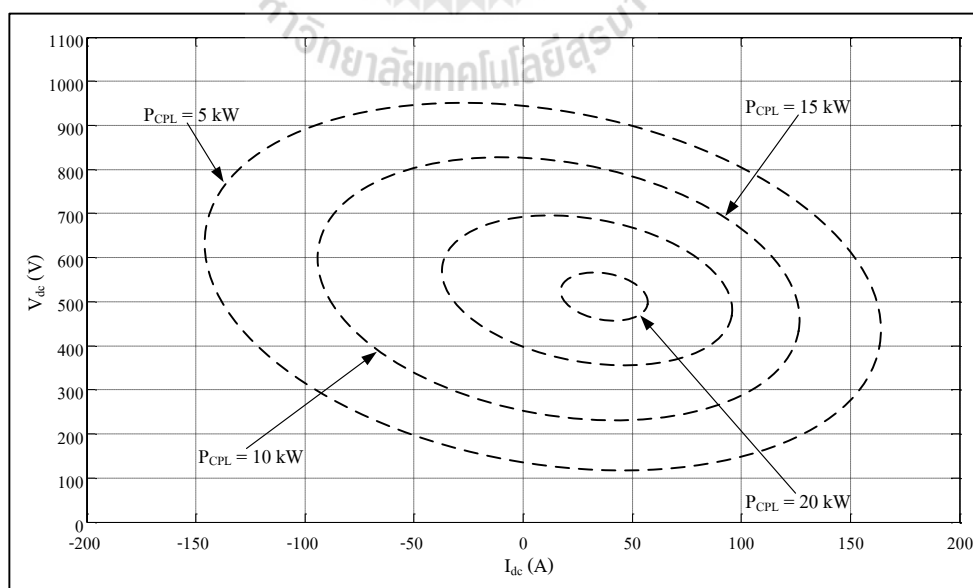
$$\begin{cases} M = M^T > 0 \\ A_1^T \cdot M + M \cdot A_1 < 0 \\ A_2^T \cdot M + M \cdot A_2 < 0 \end{cases} \quad (4-24)$$

ขั้นตอนที่ 5: จากอสมการเมตริกซ์เชิงเส้นดังสมการที่ (4-24) สามารถเขียนเป็นโปรแกรมสำหรับการแก้สมการเมตริกซ์เชิงเส้น เพื่อคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟและประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ด้วย M-file บนโปรแกรม MATLAB ได้ โดยรายละเอียดของโปรแกรมสามารถดูได้จากภาคผนวก ก. ซึ่งการทำงานของโปรแกรมจะเริ่มต้นจากการกำหนดให้  $f_1(x_2), \min = f_1(x_2), \max = f_1(0)$  นั่นคือกำหนดให้  $x_{2,\min}^1 = x_{2,\max}^1 = 0$  จากนั้นจะทำการลดค่า  $f_1(x_2), \min$  โดยการเพิ่มค่า  $x_{2,\max}^1$  และทำการเพิ่มค่า  $f_1(x_2), \max$  โดยการลดค่า  $x_{2,\min}^1$  พร้อมทั้งกลับไปแก้สมการเมตริกซ์เชิงเส้นดังสมการที่ (4-24) ใหม่ทุก ๆ รอบที่มีการเปลี่ยนค่า  $f_1(x_2), \min$  และ  $f_1(x_2), \max$  จนกระทั่งได้ค่า  $f_1(x_2), \min$  และ  $f_1(x_2), \max$  ที่มีค่าน้อยที่สุดและมีค่ามากที่สุดตามลำดับ ที่ยังคงทำให้เงื่อนไขของอสมการเมตริกซ์เชิงเส้นดังสมการที่ (4-24) เป็นจริง ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่รับประกันว่าวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับอย่างแน่นอน ดังนั้นจะได้ค่าของเมตริกซ์  $M$  ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ดังสมการที่ (3-33) และจะได้ค่าของ  $x_{2,\min}^1$  ที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้ ดังสมการที่ (3-34) ซึ่งจากสมการที่ (3-34) จะพบว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับคือ  $V(\mathbf{x}_{\min}^1)$  โดยที่  $(\mathbf{x}_{\min}^1)$  สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้คือ  $(x_{1,\min}, x_{2,\min})$  ดังนั้นจากเมตริกซ์  $M$  และ  $x_{2,\min}^1 = x_{2,\min}^1$  ที่ได้จากการแก้สมการเมตริกซ์เชิงเส้น จะสามารถคำนวณหา  $x_{1,\min}$  ได้จากสมการ  $M\mathbf{x}_{\min} = 0$  ซึ่งจากเมตริกซ์  $M$  และ  $x_{1,\min}$  และ  $x_{2,\min}^1$  ที่คำนวณได้จะสามารถคำนวณหาขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ  $V(x_{1,\min}, x_{2,\min}^1)$  ได้ และจาก  $V(x_{1,\min}, x_{2,\min}^1)$  ที่คำนวณได้จะถูกนำไปสร้างเป็นเส้นกราฟโครงร่างบนระนาบของตัวแปรสถานะ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  ซึ่งเป็น

ตัวแปรสถานะของแบบจำลองที่มีการเลื่อนจุดปฏิบัติงานของระบบจากจุดกำเนิดกลับมาที่จุด  $I_{dc,0}$  และ  $V_{dc,0}$  ที่จุดใด ๆ แล้ว เพื่อสร้างเป็นขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของ วงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบ อุดมคติ ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรม จะได้ค่าของเมตริกซ์  $M$ ,  $x_{1,\min}$ ,  $x_{2,\min}$  และ  $V(x_{\min})$  ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ มีค่าเท่ากับ 5 kW 10 kW 15 kW และ 20 kW ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และขอบเขตของการมี เสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (RAS) ของวงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่า เท่ากับ 5 kW 10 kW 15 kW และ 20 kW ดังแสดงในรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.2 ค่าเมตริกซ์  $M$ ,  $x_{1,\min}$ ,  $x_{2,\min}$ ,  $V(x_{\min})$  ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ

$P_{CPL}$ (kW)	5	10	15	20
เมตริกซ์ $M$	$\begin{bmatrix} 1.12 & 0.09 \\ 0.09 & 0.16 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.75 & 0.30 \\ 0.30 & 0.52 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4.68 & 0.38 \\ 0.38 & 0.65 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 7.58 & 0.61 \\ 0.61 & 1.05 \end{bmatrix}$
$x_{2,\min}$	-418.60	-297.60	-174.90	-50.40
$x_{1,\min}$	33.87	24.09	14.16	4.08
$V(x_{1,\min}, x_{2,\min})$	25942.07	43951.94	18940.01	2544.20

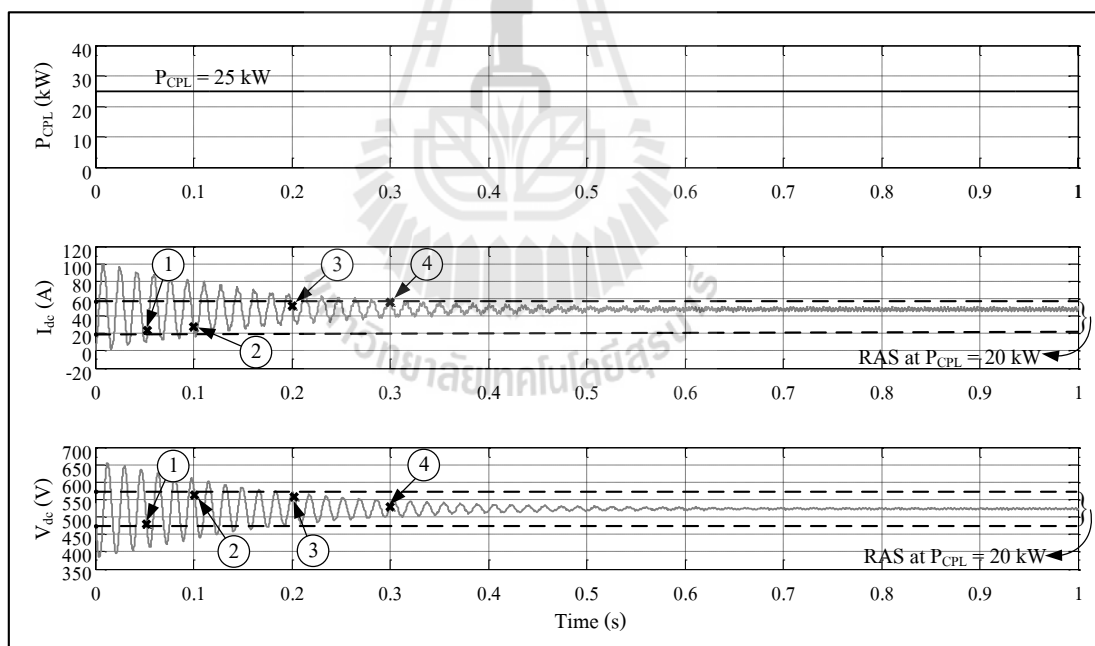


รูปที่ 4.20 RAS เมื่อ  $P_{CPL}$  มีค่าเท่ากับ 5 kW 10 kW 15 kW และ 20 kW

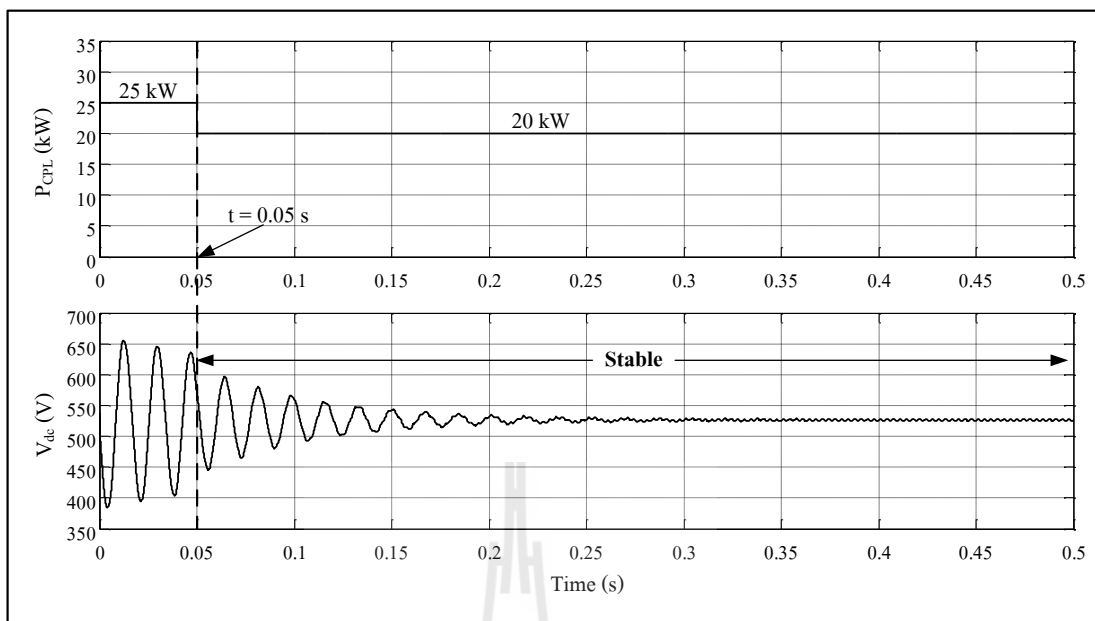
จากรูปที่ 4.20 จะพบว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเพิ่มมากขึ้น ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติจะแคบลง ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรไฟฟ้ากำลังคิซ้อย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 3.26 และรูปที่ 3.29 ในบทที่ 3 ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้อีกครั้งหนึ่งว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเพิ่มมากขึ้น ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจะลดลง ซึ่งทำให้จำนวนของจุดเริ่มต้นการทำงานหรือจุดการเปลี่ยนแปลง โหลดแบบทันทีทันใดที่อยู่ภายในขอบเขตที่รับประกันว่าจะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอนมีอยู่ไม่มากนัก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง โหลดแบบทันทีทันใดหรือการรบกวนระบบ ภายใต้อการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ ในขณะที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าน้อย ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จะกว้าง ซึ่งทำให้จำนวนของจุดเริ่มต้นการทำงานหรือจุดการเปลี่ยนแปลง โหลดแบบทันทีทันใดที่อยู่ภายในขอบเขตที่รับประกันว่าจะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอนมีอยู่มากมาย หลากหลายจุด ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง โหลดแบบทันทีทันใดหรือการรบกวนระบบ ในกรณีนี้จะต้องอยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ถึงจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

จากขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเล็บบูโนฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิ และซุจิโน ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จะถูกนำไปใช้เป็นขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ สำหรับการรับประกันว่า การเปลี่ยนแปลง โหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบและยืนยันว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากวงจรสมมูลอย่างง่าย สามารถนำไปใช้เป็นขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ สำหรับการรับประกันว่า การเปลี่ยนแปลง โหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอนได้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงดำเนินการเปลี่ยนแปลง โหลดแบบทันทีทันใดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ จากค่าโหลด 25 kW ไปเป็น 20 kW ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 4 จุด ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งจุดการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 4 จุดที่พิจารณานี้ จะอยู่ภายในขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่า

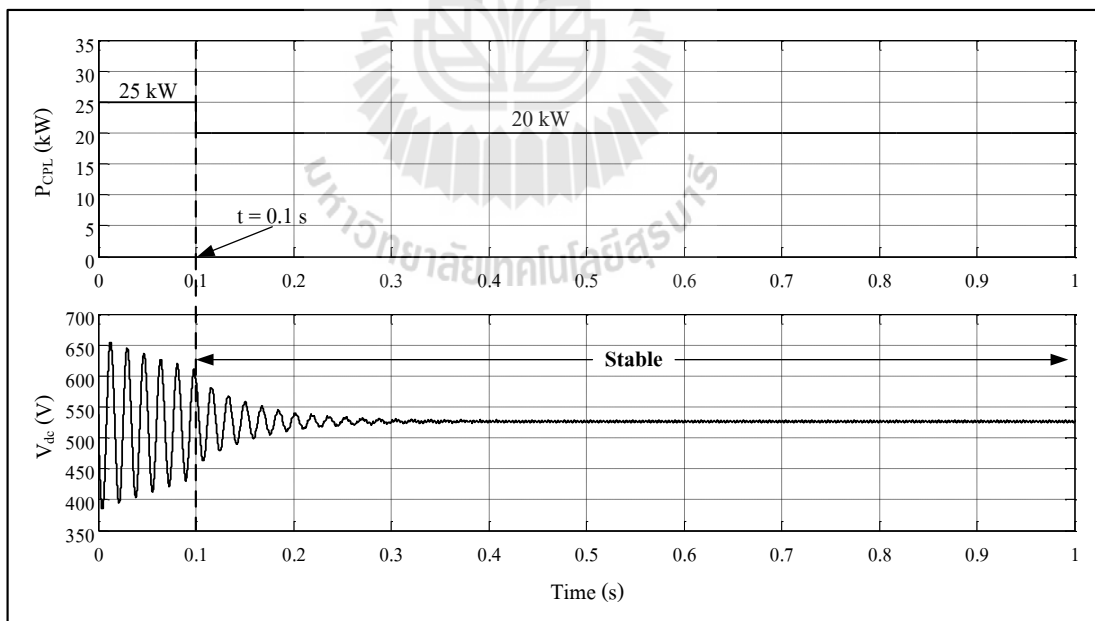
เท่ากับ 20 kW และดำเนินการยืนยันการมีเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 ถึงจุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4 ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการยืนยันที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.25 ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่า ทุก ๆ จุดการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ แบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่อยู่ภายในขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ ระบบจะมีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากวงจรสมมูลอย่างง่าย สามารถนำไปใช้เป็นขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ สำหรับการรับประกันว่า การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอนได้



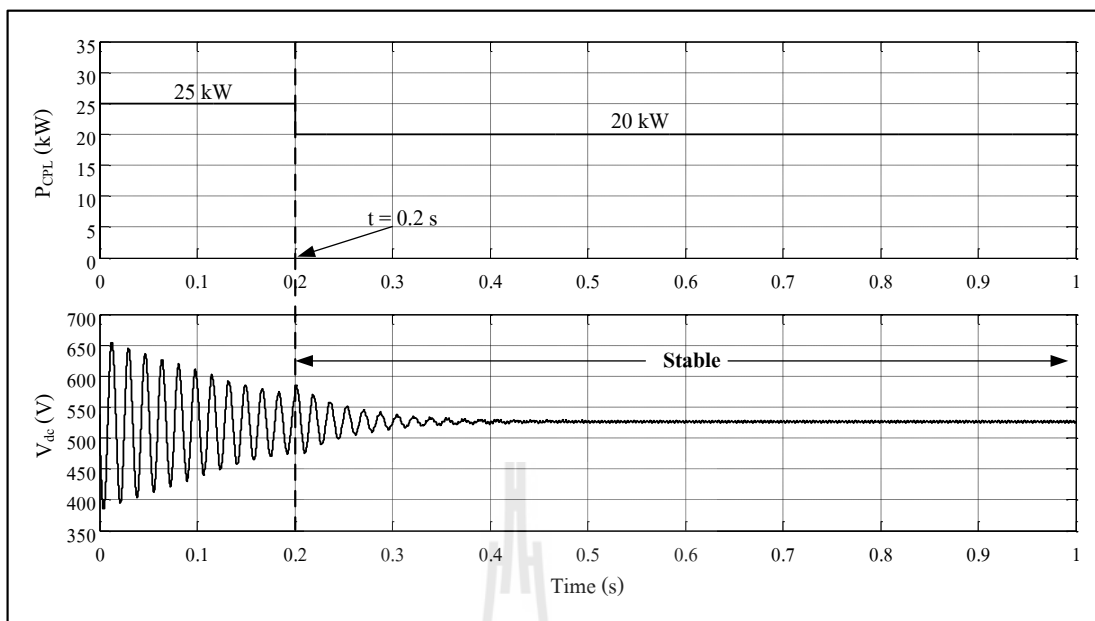
รูปที่ 4.21 สัญญาณ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เมื่อ  $P_{CPL} = 25$  kW และมี RAS ที่  $P_{CPL} = 20$  kW



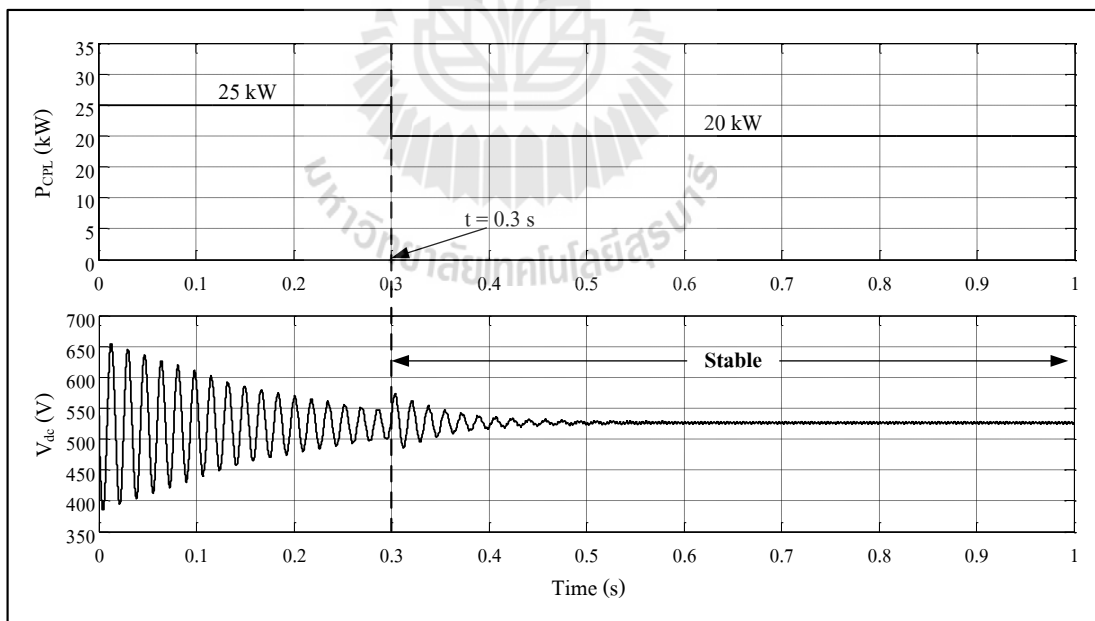
รูปที่ 4.22 ผลการขึ้นชั้นการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1



รูปที่ 4.23 ผลการขึ้นชั้นการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 2



รูปที่ 4.24 ผลการขึ้นชั้นการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 3



รูปที่ 4.25 ผลการขึ้นชั้นการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4

แต่อย่างไรก็ตามขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ จะรับประกันเสถียรภาพของระบบได้ในกรณีที่จุดการเปลี่ยนแปลง โหลดแบบทันทีทันใดอยู่ภายในขอบเขตเท่านั้น ถ้าจุดการเปลี่ยนแปลง โหลดแบบทันทีทันใดที่พิจารณาอยู่นอกขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ จะไม่สามารถสรุปได้ว่า ระบบจะมีเสถียรภาพหรือขาดเสถียรภาพ ซึ่งในกรณีนี้จำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เข้ามาช่วยวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยพิจารณาเป็นกรณี ๆ ไป ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถดำเนินการ โดยอาศัยหลักการและขั้นตอนที่ได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.4 ในบทที่ 3 ได้เช่นเดียวกัน

#### 4.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 4 นี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าที่มีการเพิ่มความซับซ้อนทางด้านสัญญาณขาเข้าของระบบให้มีความใกล้เคียงกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยพิจารณาพลวัตของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมมูลและไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ เพิ่มเติมจากบทที่ 3 ในขณะที่ฝั่งสัญญาณขาออกของระบบยังคงพิจารณาเป็น โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติเหมือนเดิม ซึ่งผลจากการทำงานของไดโอดในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีลักษณะพฤติกรรมเหมือนกับสวิตช์ ส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้วิธีดัดแปลงมากำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองกับผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ สามารถยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ได้อาศัยแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากบทที่ 3 นั่นคือ ใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

และใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปุนอฟ ที่อาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปุนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ สำหรับการรับประกันว่า การเปลี่ยนแปลงโหนดของระบบแบบทันทีทันใดด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน ซึ่งการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ได้ดำเนินการประมาณจากวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบแทนการประมาณจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาโดยตรง จากการดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ทำให้ทราบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้มีขั้วของระบบทั้งหมด 6 ตัว แต่มีขั้วเด่นเพียงแค่ 2 ตัว เท่านั้น ซึ่งขั้วเด่นนี้จะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น สามารถวิเคราะห์ได้จากขั้วเด่นหรือค่าเจาะจงเด่นของระบบได้ และนอกจากนี้แล้วการทราบว่าขั้วเด่นของระบบมีเพียงแค่ 2 ตัว เท่านั้น จึงทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถทำได้โดยอาศัยการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับขั้วเด่นของระบบได้ แต่อย่างไรก็ตามการหาคำตอบของสมการอนุพันธ์ เพื่อนำคำตอบที่หาได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับขั้วเด่น จะต้องคำนวณจากชุดสมการอนุพันธ์ของระบบทั้งหมด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นและวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส กับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ จะพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในกรณีที่โหนดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้ว กล่าวคือ เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสภาวะอยู่ตัว ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก นอกจากจะให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ ในกรณีที่โหนดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก มีความคลาดเคลื่อนแล้ว ยังไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหนดมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้อีกด้วย ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง หรือเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ นอกจากจะสามารถประมาณการสั้นไวกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้แล้ว ยังสามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งในกรณีที่โหนดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก และภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำอีกด้วย และสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการ โดยตรงของเลียปุนอฟ ที่มุ่งเน้นไปที่การประมาณขอบเขตของการมี



เสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิ และซูจิโน ผลที่ได้จากการดำเนินการแสดงให้เห็นว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากวงจรมูลอย่างง่าย สามารถนำไปใช้เป็นขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรรีจกระแสดสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ สำหรับการรับประกันว่า การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุด การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่าง แน่นนอนได้ ดังนั้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในบท ถัดไป นอกจากจะอาศัยแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากบทที่ 3 แล้ว จะอาศัย แนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากบทที่ 4 ร่วมด้วย นั่นคือ ถ้าระบบไฟฟ้าที่พิจารณา มี จำนวนขั้วเด่นเพียงแค่ 2 ตัว เท่านั้น การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น สามารถ ดำเนินการวิเคราะห์ได้จากค่าเงาขั้วเด่นของระบบได้ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการ วิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถทำได้โดยอาศัยการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของ ระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับขั้วเด่นได้ แต่การหาคำตอบของสมการ อนุพันธ์ เพื่อนำคำตอบที่หาได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปร สถานะที่มีความสัมพันธ์กับขั้วเด่น จะต้องคำนวณหาจากชุดสมการอนุพันธ์ของระบบ ทั้งหมด ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ ที่มุ่งเน้นไปที่การ ประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วย วิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน จะดำเนินการประมาณจากวงจรมูลอย่างง่ายของระบบ แทนการประมาณจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาโดยตรง

## บทที่ 5

### การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม

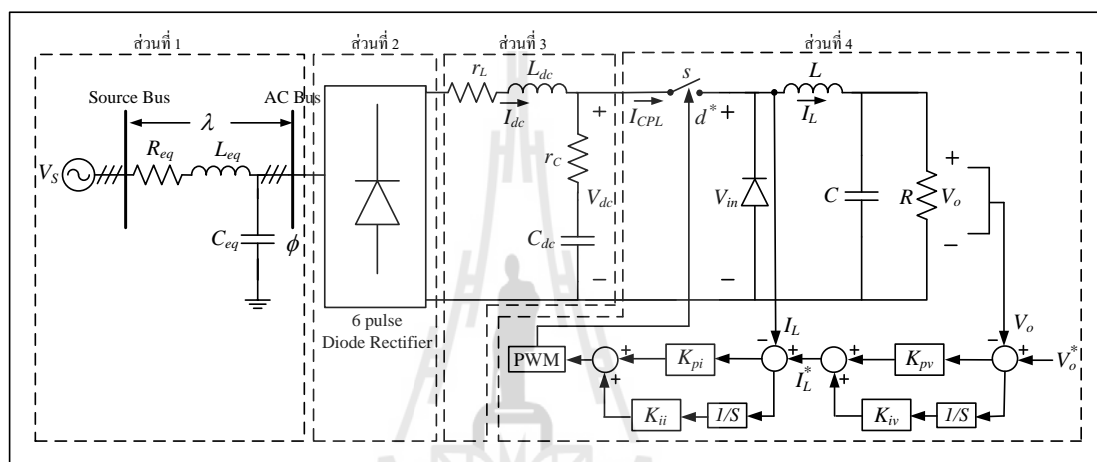
#### 5.1 บทนำ

ในบทที่ 5 จะเป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยจะมีการพิจารณาพลวัตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแทน โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เพิ่มเติมจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 4 เนื้อหาในเบื้องต้นของบทนี้จะกล่าวถึงการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ ซึ่งการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะได้รับการอธิบายไว้พอสังเขป จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยอาศัยแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากบทที่ 3 และบทที่ 4 นั่นคือ จะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อคาดการณ์จุดการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา และจะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟที่อาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ สำหรับการรับประกันว่าการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน ซึ่งการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทนี้ จะดำเนินการประมาณจากวงจรมูลอย่างง่ายของระบบแทนการประมาณจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทนี้โดยตรง เพื่อลดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

## 5.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 5.2.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 5 คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลด เป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม แสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าที่มีการพิจารณา พลวัตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแทนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เพิ่มเติมจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 4



รูปที่ 5.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม

จากรูปที่ 5.1 พบว่า วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ประกอบด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมมูล โดยที่  $V_s$  คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมมูล  $R_{eq}$ ,  $L_{eq}$  และ  $C_{eq}$  คือ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ของสายส่งกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ ส่วนที่ 2 ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 วงจรกรอง โดยที่  $L_{dc}$ ,  $C_{dc}$ ,  $r_L$  และ  $r_c$  คือความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ และความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ตามลำดับ และส่วนที่ 4 วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยที่  $R$ ,  $L$  และ  $C$  คือ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และ ความจุไฟฟ้า ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ตามลำดับ  $K_{pv}$ ,  $K_{iv}$ ,  $K_{pi}$  และ  $K_{ii}$  คือพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ซึ่งเป็นตัวควบคุมพีไอ โดยมีโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ลูป คือ ลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ และ ลูปการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ โดยวงจรแปลงผัน

แบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม ที่เชื่อมต่อกับระบบผ่านวงจรกรอง จะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือน โหลด กำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

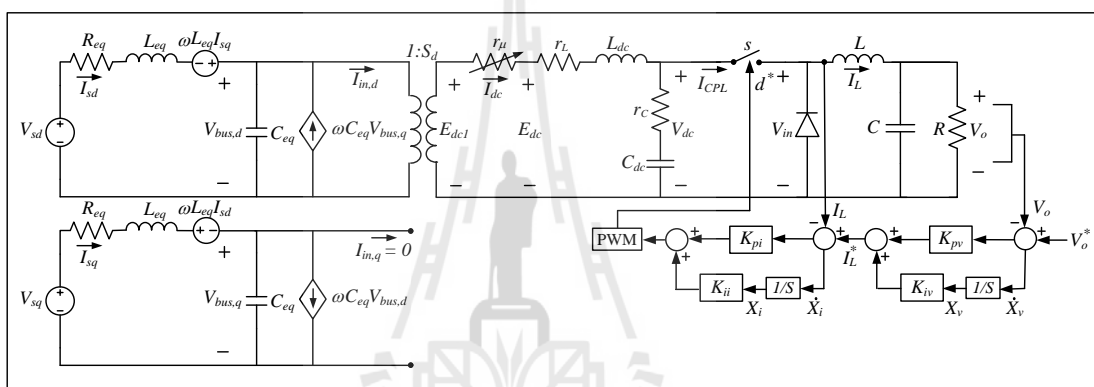
การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจร แปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ แต่เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา จะพบว่า เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลการทำงานของไดโอดในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีลักษณะพฤติกรรมเหมือนกับสวิตช์ และผลการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาและค้นคว้าการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น จากการศึกษาและค้นคว้าพบว่า การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี นิยมใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method: GSSA method) ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้มีความถูกต้องแม่นยำและไม่ซับซ้อน ดังนั้นสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม จะสามารถพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปได้ โดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 5.2.2 ดังนี้

### 5.2.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบในรูปแบบที่ 5.1 ด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะได้รับการอธิบายไว้พอสังเขปเท่านั้น ซึ่งการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบดังกล่าวแบบละเอียดสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากวิทยานิพนธ์ปริญญาโทของ เทพพนม โสภาเพิ่ม (เทพพนม โสภาเพิ่ม, 2554) ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของ

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสามารถอธิบายได้ดังนี้

พิจารณาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลและไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ นั่นคือส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ในรูปที่ 5.1 ตามลำดับ จะสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของแกนหมุนดีคิว โดยอาศัยการพิสูจน์เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.2.2 ในบทที่ 4 ได้ และเมื่อกำหนดให้ มุมการหมุนของแกนดีคิวเท่ากับมุมเฟสที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $\phi = \phi$ ) วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุม ในรูปที่ 5.1 สามารถแทนด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายที่อยู่บนแกนหมุนดีคิวได้ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ดังนี้



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว

จากรูปที่ 5.2 จะสังเกตได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาซึ่งถูกแทนด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว ยังเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุม ดังนั้นจึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มากำจัดผลการสวิตช์ดังกล่าว เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (Complex Fourier Series) ของตัวแปรสถานะของวงจรเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ซึ่งอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

โดยทั่วไป สัญญาณ  $f(t)$  ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบเป็น  $T$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (5-1)

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} ; \omega_s = \frac{2\pi}{T} \quad (5-1)$$

โดยที่  $\langle x \rangle_k(t)$  คือ สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-2)

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (5-2)$$

และคุณสมบัติที่จำเป็นของสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อน สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนมุมคิควินรูปที่ 5.2 โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป แสดงได้ดังนี้

1. คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (5-3)

$$\frac{d}{dt} \langle x \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_k - jk\omega_s \langle x \rangle_k \quad (5-3)$$

2. คุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณ แสดงได้ดังสมการที่ (5-4)

$$\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_i \langle y \rangle_{k-i} \quad (5-4)$$

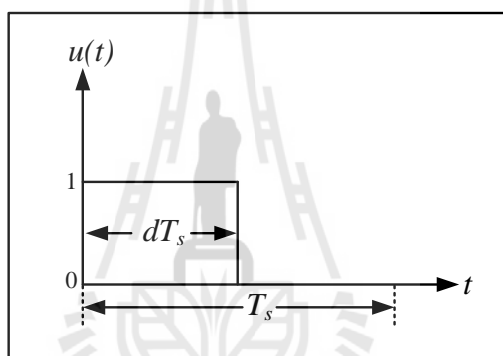
3. ถ้า  $f(t)$  คือ ค่าจริง แสดงได้ดังสมการที่ (5-5)

$$\langle x \rangle_{-k} = \overline{\langle x \rangle_k} = \langle x \rangle_k^* \quad (5-5)$$

จากสมการที่ (5-1) และสมการที่ (5-2) ค่าตัวแปร  $k$  จะเป็นตัวบ่งบอกความถูกต้องของการใช้อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน ถ้า  $k$  มีค่าเป็นอนันต์ ค่าความผิดพลาดจากการประมาณจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และถ้าสัญญาณไม่ปรากฏการสั้นไกว จะกำหนดให้  $k=0$  ซึ่งเรียกว่า การประมาณ

อันดับศูนย์ (zero-order approximation) หรือถ้าสัญญาณมีการสั้นไกว จะกำหนดให้  $k = -1, 0, 1$  ซึ่งเรียกว่า การประมาณอันดับหนึ่ง (first-order approximation)

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิวในรูปที่ 5.2 ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จะเริ่มต้นจากการวิเคราะห์วงจร โดยยังไม่พิจารณาตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ (switching function) ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม และทำงานภายใต้เงื่อนไขโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์แสดงได้ดังสมการที่ (5-6)



รูปที่ 5.3 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (5-6)$$

โดยที่  $d$  คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม

$T_s$  คือ คาบการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์

จากรูปที่ 5.2 พิจารณาวงจรแปลงผันแบบบักก์ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมพีไอ จะได้ว่าเมื่อสวิตช์  $S$  ปิดจะทำให้  $I_{CPL} = I_L$  และ  $V_{dc} = V_{in}$  และเมื่อสวิตช์  $S$  เปิด จะทำให้  $I_{CPL} = 0$  และ  $V_{in} = 0$  (สมมติให้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อไดโอดนำกระแส) ดังนั้นสามารถ

เขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{CPL}$  กับ  $I_L$  และระหว่าง  $V_{in}$  กับ  $V_{dc}$  ที่อยู่ในรูปของ  $u(t)$  แสดงได้ดังสมการที่ (5-7) ดังนี้

$$\begin{cases} I_{CPL} = u(t)I_L \\ V_{in} = u(t)V_{dc} \end{cases} \quad (5-7)$$

จากการวิเคราะห์วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว ในรูปที่ 5.2 ในกรณีที่ไม่พิจารณาตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักค์ ด้วยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ ร่วมกับสมการที่ (5-6) และสมการที่ (5-7) ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงได้ดังสมการที่ (5-8) ดังนี้

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{I}_{sd} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\ \dot{I}_{sq} &= -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\ \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\ \dot{V}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\ \dot{I}_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_C u(t)}{L_{dc}} I_L \\ \dot{V}_{dc} &= \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{u(t)}{C_{dc}} I_L \\ \dot{I}_L &= \frac{u(t)}{L} V_{dc} - \frac{1}{L} V_o \\ \dot{V}_o &= \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \end{aligned} \right. \quad (5-8)$$

จากสมการที่ (5-8) จะสังเกตได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยังเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักค์ ซึ่งในที่นี้



คือ  $u(t)$  ดังนั้นจึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มากำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ตัวแปรสถานะของแบบจำลองในสมการที่ (5-8) สามารถเขียนเป็นสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของ  $I_{sd}$ ,  $I_{sq}$ ,  $V_{bus,d}$ ,  $V_{bus,q}$ ,  $I_{dc}$ ,  $V_{dc}$ ,  $I_L$  และ  $V_o$  โดยเลือกใช้การประมาณอันดับศูนย์ นั่นคือไม่คิดผลของการสั้นไกวของสัญญาณ จะสามารถกำหนดตัวแปรสถานะทั้ง 8 ตัวแปร แสดงได้ดังสมการที่ (5-9) ดังนี้

$$\begin{cases} \langle I_{sd} \rangle_0 = I_{sds} \\ \langle I_{sq} \rangle_0 = I_{sq} \\ \langle V_{bus,d} \rangle_0 = V_{bus,d} \\ \langle V_{bus,q} \rangle_0 = V_{bus,q} \\ \langle I_{dc} \rangle_0 = I_{dc} \\ \langle V_{dc} \rangle_0 = V_{dc} \\ \langle I_L \rangle_0 = I_L \\ \langle V_o \rangle_0 = V_o \end{cases} \quad (5-9)$$

จากนั้นใช้สมการที่ (5-2) เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์เชิงซ้อนของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ในสมการที่ (5-6) ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์สำหรับการประมาณอันดับศูนย์ของสัญญาณการสวิตช์ แสดงได้ดังสมการที่ (5-10) ดังนี้

$$\langle u \rangle_0 = d \quad (5-10)$$

โดยที่  $d$  คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม

นำสมการที่ (5-3) ถึงสมการที่ (5-5) และสมการที่ (5-10) มาประยุกต์ใช้กับสมการที่ (5-8) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดิกิวในรูปที่ 5.2 ในกรณีที่ไม่มีพิจารณาตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์ แสดงได้ดังสมการที่ (5-11) ดังนี้

$$\begin{cases}
 \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\
 \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\
 \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_C d}{L_{dc}} I_L \\
 \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{d}{C_{dc}} I_L \\
 \dot{I}_L = \frac{d}{L} V_{dc} - \frac{1}{L} V_o \\
 \dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o
 \end{cases} \quad (5-11)$$

สมการที่ (5-11) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบในกรณีที่ไม่พิจารณาตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์ จะนำไปสู่การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่พิจารณาตัวควบคุมพีไอได้ดังนี้

พิจารณาวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมในรูปที่ 5.2 พบว่า วงจรแปลงผันแบบบักก์มีตัวควบคุมพีไอ ซึ่งโครงสร้างภายในของตัวควบคุมจะแบ่งออกเป็น 2 ลูป คือ ลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ( $I_L$ ) เป็นลูปภายใน และ ลูปการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ( $V_o$ ) เป็นลูปภายนอก ซึ่งเมื่อวิเคราะห์โครงสร้างของระบบควบคุมในรูปที่ 5.2 จะสามารถเขียนสมการของตัวควบคุมพีไอให้อยู่ในรูปของ  $d^*$  แสดงได้ดังสมการที่ (5-12) ดังนี้

$$d^* = -K_{pi} I_L - K_{pv} K_{pi} V_o + K_{iv} K_{pi} X_v + K_{ii} X_i + K_{pv} K_{pi} V_o^* \quad (5-12)$$

และเมื่อพิจารณาตัวควบคุมพีไอ จะสังเกตได้ว่า  $X_v$  ของลูปแรงดันและ  $X_i$  ของลูปกระแส จะถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นการ

พิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานบนแกนหมุนดีคิวในรูปที่ 5.2 ในกรณีที่พิจารณาตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัก์ สามารถดำเนินการโดยการแทนค่า  $d$  ในสมการที่ (5-11) ด้วย  $d^*$  จากสมการที่ (5-12) ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 ซึ่งพิสูจน์หาได้โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป แสดงได้ดังสมการที่ (5-13) ดังนี้

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\
 \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\
 \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_C K_{pi}}{L_{dc}} I_L^2 \\
 \quad - \frac{r_C K_{pv} K_{pi}}{L_{dc}} I_L V_o + \frac{r_C K_{iv} K_{pi}}{L_{dc}} I_L X_v + \frac{r_C K_{ii}}{L_{dc}} I_L X_i + \frac{r_C K_{pv} K_{pi}}{L_{dc}} I_L V_o^* \\
 \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi}}{C_{dc}} I_L^2 + \frac{K_{pv} K_{pi}}{C_{dc}} I_L V_o - \frac{K_{iv} K_{pi}}{C_{dc}} I_L X_v - \frac{K_{ii}}{C_{dc}} I_L X_i - \frac{K_{pv} K_{pi}}{C_{dc}} I_L V_o^* \\
 \dot{I}_L = -\frac{K_{pi}}{L} V_{dc} I_L - \frac{K_{pv} K_{pi}}{L} V_{dc} V_o - \frac{V_o}{L} + \frac{K_{iv} K_{pi}}{L} V_{dc} X_v + \frac{K_{ii}}{L} V_{dc} X_i + \frac{K_{pv} K_{pi}}{L} V_{dc} V_o^* \\
 \dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\
 \dot{X}_v = -V_o + V_o^* \\
 \dot{X}_i = -I_L - K_{pv} V_o + K_{iv} X_v + K_{pv} V_o^*
 \end{array} \right. \quad (5-13)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (5-13) จะสังเกตได้ว่า เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นปรากฏอยู่ในสมการ  $\dot{I}_{dc}$ ,  $\dot{V}_{dc}$  และ  $\dot{I}_L$  ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้จึงเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และนอกจากนั้นแล้วจะสังเกตได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวมีค่ามุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและ

บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $\lambda$ ) ประกอบอยู่ในสมการ  $I_{sd}$  และ  $I_{sq}$  จึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนวณหาค่า  $\lambda$  ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะคำนวณหาค่า  $\lambda$  โดยอาศัยการนำทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้ามาวิเคราะห์ระบบทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับในรูปที่ 5.1 ซึ่งการคำนวณมีหลักการเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.2.3 ในบทที่ 4 จากหลักการดังกล่าว จะได้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการที่ (5-14) ดังนี้

$$\begin{cases} \frac{V_{bus}V_S}{Z}\cos(\gamma-\lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z}\cos(\gamma) = P_{bus} \\ \frac{V_{bus}V_S}{Z}\sin(\gamma-\lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z}\sin(\gamma) = Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (5-14)$$

โดยที่กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เมื่อพิจารณาที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5-15) ดังนี้

$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{1}{3} \left( \frac{V_o^{*2}}{R} + P_{loss} \right) \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (5-15)$$

โดยที่  $V_o^*$  คือ แรงดันสัญญาณขาออกที่กำหนดให้กับระบบ  
 $P_{loss}$  คือ กำลังสูญเสียเนื่องจาก  $r_\mu$  และ  $r_L$

จากสมการที่ (5-14) และสมการที่ (5-15) สามารถเขียนเป็นโปรแกรมสำหรับการคำนวณหาค่า  $\lambda$  โดยอาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและราฟสันด้วย M-file บนโปรแกรม MATLAB ได้ โดยรายละเอียดของโปรแกรมสามารถดูได้จากภาคผนวก ง. ซึ่งการทำงานของโปรแกรมจะดำเนินการคำนวณหาค่า  $V_{bus}$  และ  $\lambda$  ด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและราฟสัน โดยการปรับปรุงค่า  $V_{bus}$  และ  $\lambda$  ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ  $1 \times 10^{-6}$  เมื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรม จะได้ค่า  $V_{bus}$  และ  $\lambda$  ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับแรงดันสัญญาณขาออกที่กำหนดให้กับระบบ ( $V_o^*$ ) หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า  $V_{bus}$  และ  $\lambda$  ที่คำนวณได้เป็นค่าในสถานะคงตัว หรือเป็นค่า ณ จุดปฏิบัติงานของระบบ ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมจะได้ค่า  $V_{bus,0}$  และ  $\lambda_0$

จากค่า  $V_{bus,0}$  และ  $\lambda_0$  ที่คำนวณได้ สามารถนำไปใช้สำหรับการคำนวณหาค่าในสถานะคงตัวค่าอื่น ๆ ได้ดังนี้

$$I_{dc,0} = \frac{\sqrt{3} \left| \frac{V_s e^{j0} - V_{bus,0} e^{-j\lambda_0}}{Z e^{j\gamma}} \right|}{\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi}} \quad (5-16)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2} \cdot V_{bus,0}) - \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} I_{dc,0} - r_L I_{dc,0} \\ V_{o,0} = V_o^* \\ I_{L,0} = \frac{V_o}{R} \\ X_{V,0} = \frac{I_{L,0}}{K_{iv}} \\ X_{i,0} = \frac{V_{o,0}}{K_{ii} V_{dc,0}} \end{array} \right. \quad (5-17)$$

และนอกจากนั้นแล้ว จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ดังสมการที่ (5-13) จะสังเกตได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักค์ ประกอบอยู่ในสมการ  $\dot{I}_{dc}$ ,  $\dot{V}_{dc}$ ,  $\dot{I}_L$  และ  $\dot{X}_i$  ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักค์ เพื่อให้ผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออก ( $V_o$ ) มีผลการตอบสนองที่ดี ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักค์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้วิธีการออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิม เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีขั้นตอนการออกแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน และให้ผลการตอบสนองที่ดี โดยการออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักค์ด้วยวิธีการดั้งเดิม สำหรับรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าสามารถออกแบบได้จากสมการที่ (5-18) และสมการที่ (5-19) ในขณะที่ รูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถออกแบบได้จากสมการที่ (5-20) และสมการที่ (5-21) ซึ่งรายละเอียดการพิสูจน์หาสมการที่ใช้สำหรับการ

ออกแบบตัวควบคุมทั้ง 2 รูป สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากวิทยานิพนธ์ปริญญาโทของ  
เทพพนม โสภานพ (เทพพนม โสภานพ, 2554) ได้เช่นเดียวกัน

$$K_{pi} = \frac{2N\zeta_i\omega_{nv}L}{V_{in}} ; N > 4 \quad (5-18)$$

$$K_{ii} = \frac{N^2\omega_{nv}^2L}{V_{in}} ; N > 4 \quad (5-19)$$

$$K_{pv} = K_1C = \frac{1}{R} \quad (5-20)$$

$$K_{iv} = \frac{K_1}{R_1} = \frac{1}{R^2C} \quad (5-21)$$

โดยที่  $\zeta_i$  คือ อัตราส่วนการหน่วงของลูกระแสไฟฟ้า  
 $\zeta_v$  คือ อัตราส่วนการหน่วงของลูประดันไฟฟ้า  
 $\omega_i$  คือ ความกว้างแถบของลูกระแสไฟฟ้า  
 $\omega_v$  คือ ความกว้างแถบของลูประดันไฟฟ้า

เมื่อกำหนดให้  $\zeta_i = 1$ ,  $\zeta_v = 1$  เนื่องจากต้องการให้ผลการตอบสนองของแรงดัน  
 สัญญาณขาออก ( $V_o$ ) ไม่ปรากฏการพุ่งเกิน (overshoot) นั่นคือ มีผลการตอบสนองแบบหน่วง  
 วิกฤต (critically damped response) และกำหนดให้  $\omega_v = 2\pi \times 160$  rad/s,  $\omega_i = 2\pi \times 800$  rad/s  
 ดังนั้นจะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟิโอยของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่ออกแบบด้วยวิธีการ  
 คั้งเดิมคือ  $K_{pv} = 0.2$ ,  $K_{pi} = 32$ ,  $K_{iv} = 0.0744$  และ  $K_{ii} = 29.7398$

### 5.2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่  
 พิจารณา ที่พิสูจน์หาได้โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ  
 ทั่วไป ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาและเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่  
 ไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ (5-13) จะอาศัยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบที่  
 ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์หาได้โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและ

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (DQ + GSSA model) ซึ่งได้มาจากการแก้สมการอนุพันธ์ของระบบดังสมการที่ (5-13) ด้วยฟังก์ชัน ode45 ของโปรแกรม MATLAB กับผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ (Exact topology model) โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม สามารถดูได้จากภาคผนวก ก.3 และกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ แสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลและวงจรกรองเป็นพารามิเตอร์ชุดเดียวกันกับพารามิเตอร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ในบทที่ 4 ที่ผ่านมา

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1

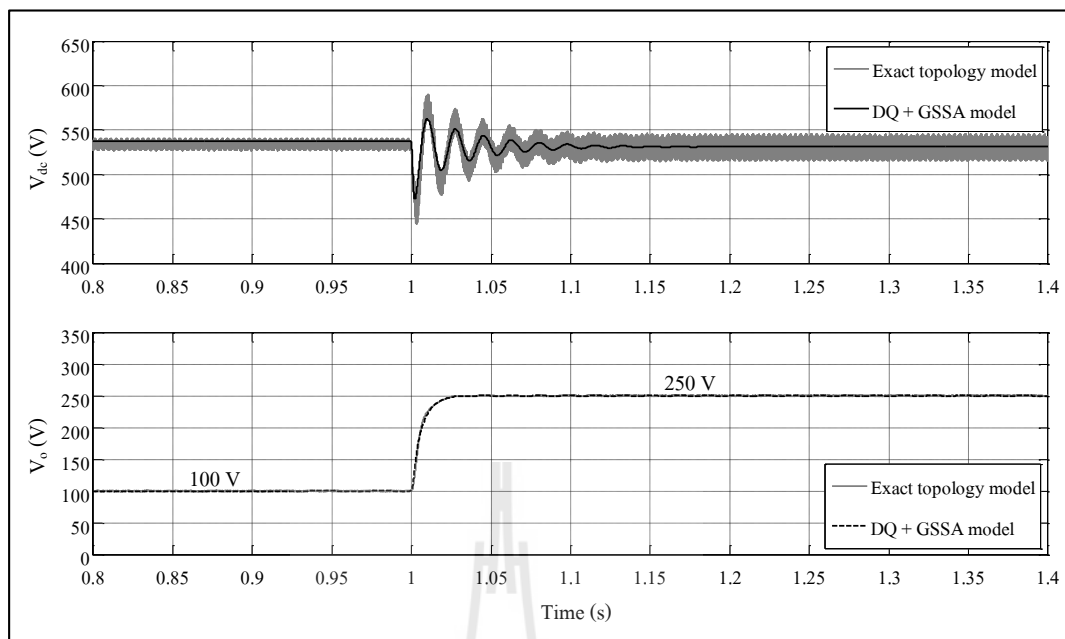
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_S$	230 V <sub>rms/phase</sub>	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบสมดุล
$f$	50 Hz	ความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
$R_{eq}$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า
$L_{eq}$	24 $\mu$ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า
$C_{eq}$	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า
$r_L$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$L_{dc}$	7.5 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$r_C$	0.5 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
$C_{dc}$	1000 $\mu$ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$L (\Delta I_L = 0.5 \text{ A})$	25 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคก์
$C (\Delta V_o = 20 \text{ mV})$	1250 $\mu$ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคก์
$R$	5 $\Omega$	ความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัคก์
$K_{pv}$	0.2	
$K_{pi}$	32	
$K_{iv}$	0.0744	ตัวควบคุมแบบพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัคก์
$K_{ii}$	29.7398	
$f_S$	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 (ต่อ)

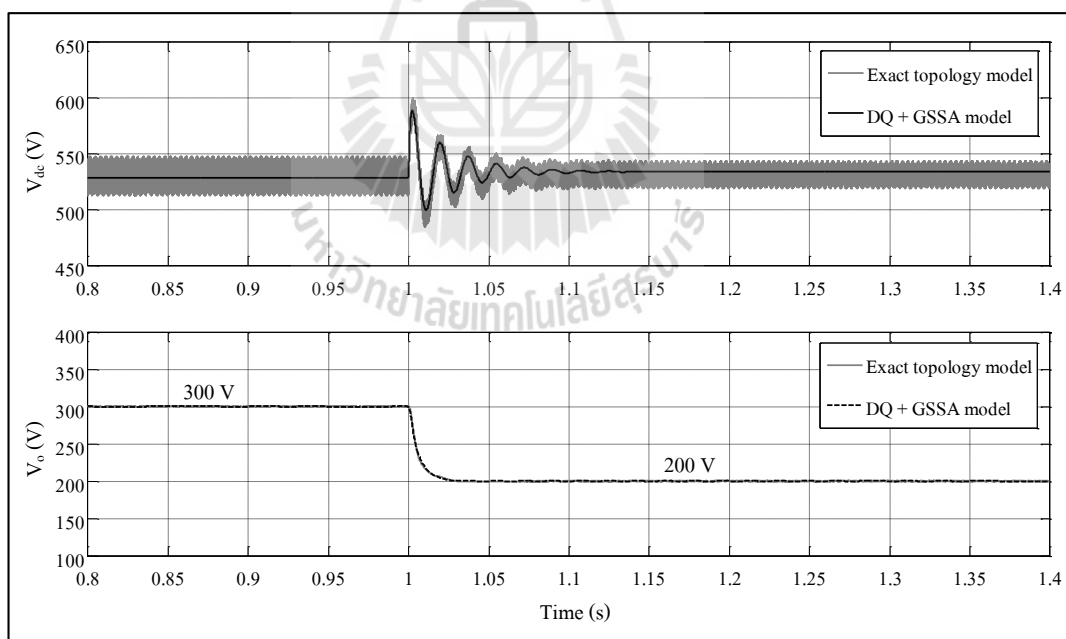
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$I_{sd}(0)$	0 A	
$I_{sq}(0)$	0 A	
$V_{bus,d}(0)$	0 V	ค่าเริ่มต้นการทำงานของระบบ ซึ่งคำนวณได้จาก การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในสถานะ อยู่ตัว โดยการพิจารณาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
$V_{bus,q}(0)$	0 V	
$I_{dc}(0)$	0 A	สามเฟสแบบสมมูลให้เป็นค่าคงที่ ด้วยค่าแรงดันที่ ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ จากนั้น ลัดวงจรที่ตัวเหนี่ยวนำ และเปิดวงจรที่ตัวเก็บประจุ
$V_{dc}(0)$	537.991 V	
$I_L(0)$	0 A	ของวงจรกรอง และวงจรแปลงผันแบบบัคค์
$V_o(0)$	0 V	
$X_v(0)$	0	
$X_i(0)$	0	

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมที่พิสูจน์ได้โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 โดยรูปที่ 5.4 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกดีซี ( $V_{dc}$ ) และแรงดันสัญญาณขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ( $V_o$ ) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกดีซีและแรงดันสัญญาณขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันสัญญาณขาออกที่กำหนดให้กับระบบ ( $V_o^*$ ) จาก 100 V ไปเป็น 250 V ที่เวลา 1 วินาที ในขณะที่ รูปที่ 5.5 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเช่นเดียวกับรูปที่ 5.4 แต่พิจารณาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันสัญญาณขาออกที่กำหนดให้กับระบบ ( $V_o^*$ ) จาก 300 V ไปเป็น 200 V ที่เวลา 1 วินาที ซึ่งจากรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับผลการตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ที่พิสูจน์มาจากการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้





รูปที่ 5.4 สัญญาณ  $V_{dc}$  และ  $V_o$  เมื่อ  $V_o^*$  เปลี่ยนแปลงจาก 100 V ไปเป็น 250 V ที่เวลา 1 วินาที



รูปที่ 5.5 สัญญาณ  $V_{dc}$  และ  $V_o$  เมื่อ  $V_o^*$  เปลี่ยนแปลงจาก 300 V ไปเป็น 200 V ที่เวลา 1 วินาที

### 5.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุม จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (5-13) และกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ แสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 5 จะอาศัยแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากบทที่ 3 และบทที่ 4 นั่นคือ จะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยรายละเอียดแสดงได้ในหัวข้อที่ 5.3.1 และหัวข้อที่ 5.3.2 ตามลำดับ จากนั้นในหัวข้อที่ 5.3.3 จะเป็นการนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งนำเสนอการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น กับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยตรงนั้น สามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และนอกจากนั้นแล้วจะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเล็พูนอฟที่อาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเล็พูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดย ทาคาคิและซูจิโน เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ สำหรับการรับประกันว่าการเปลี่ยนแปลง โหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน โดยรายละเอียดจะได้รับการอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.4

#### 5.3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น

จากขั้นตอนของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งได้รับการอธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1 ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (5-13) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ดังนั้นจะได้แบบจำลองของระบบซึ่งเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ (3-4) และจะได้เมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  สำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าเจาะจง เพื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ดังแสดงในสมการที่ (5-22) ดังนี้

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_o, \mathbf{u}_o) = \begin{bmatrix}
-\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} & a(5,7) & -\frac{r_c K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{iv} K_{pi} I_{L,0}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{ii} I_{L,0}}{L_{dc}} & \\
0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & a(6,7) & \frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{C_{dc}} & -\frac{K_{iv} K_{pi} I_{L,0}}{C_{dc}} & -\frac{K_{ii} I_{L,0}}{C_{dc}} & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & \frac{K_{pi} V_{dc,0}}{(K_{pv} K_{pi} V_{dc,0} + 1)} & \frac{K_{vi} K_{pi} V_{dc,0}}{C_{dc}} & \frac{K_{ii} V_{dc,0}}{C_{dc}} & \frac{K_{ii} V_{dc,0}}{C_{dc}} & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{C} & -\frac{1}{RC} & 0 & 0 & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv} & -K_{iv} & 0 &
\end{bmatrix}_{10 \times 10} \quad (5-22)$$

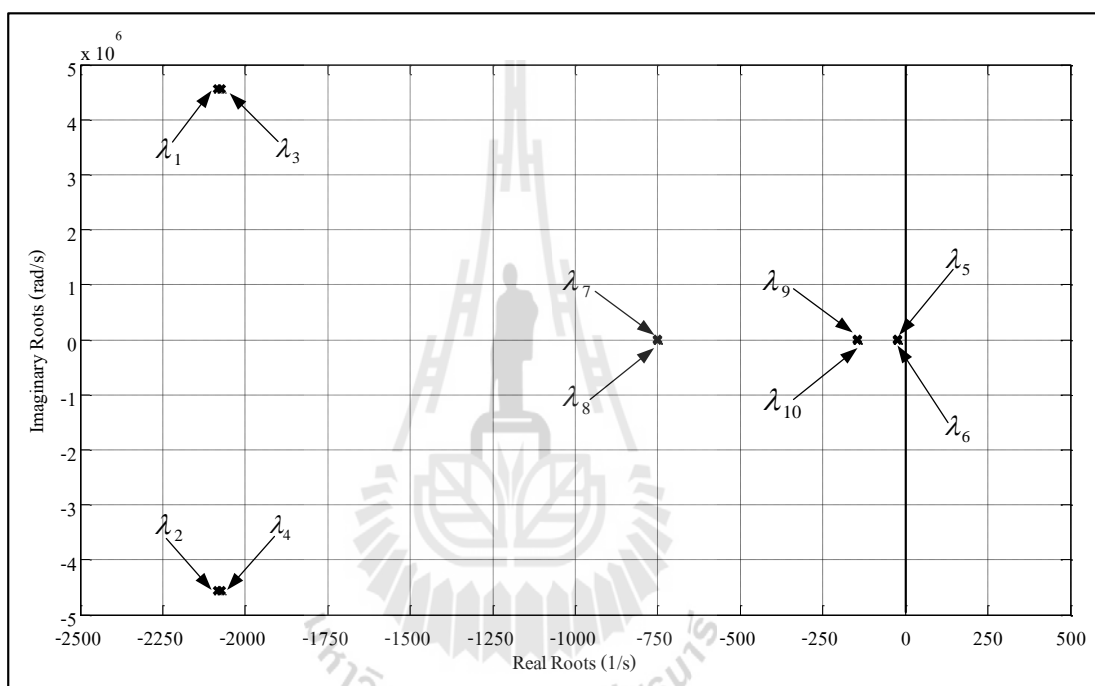
เมื่อ

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

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

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

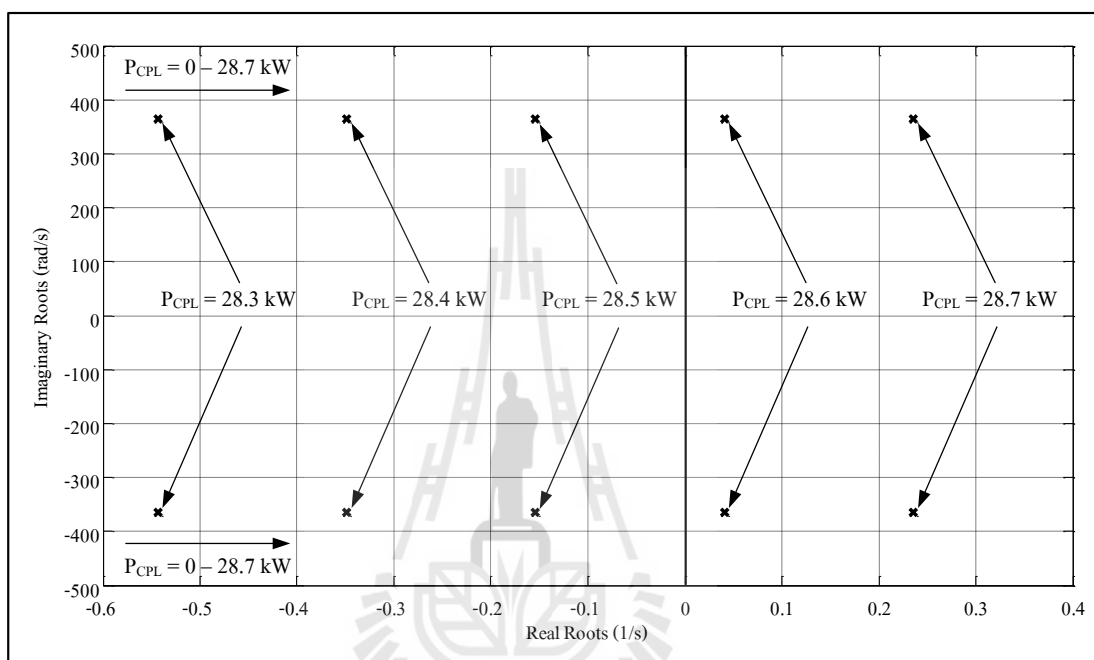
จากสมการที่ (5-22) จะพบว่า เมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  มีค่าขึ้นอยู่กับ  $V_{dc,0}$ ,  $I_{L,0}$  และ  $V_{o,0}$  ซึ่งค่าดังกล่าวนี้คำนวณได้จากสมการที่ (5-17) ดังนั้นจากสมการที่ (5-17) และสมการที่ (5-22) จะสามารถคำนวณหาค่าเจาะจงของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีค่าเท่ากับ 15 kW ( $V_o^* = 273.86$  V) ผ่านคำสั่ง “eig(A)” ของโปรแกรม MATLAB ได้ โดยเส้นทางเดินของค่าเจาะจง แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 ดังนี้



รูปที่ 5.6 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ  $P_{CPL} = 15$  kW ( $V_o^* = 273.86$  V)

จากรูปที่ 5.6 จะพบว่า ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วยค่าเจาะจง  $\lambda_1 - \lambda_{10}$  ซึ่งเมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างค่าส่วนจริงของค่าเจาะจง  $\lambda_9$  และ  $\lambda_{10}$  กับค่าส่วนจริงของค่าเจาะจง  $\lambda_5$  และ  $\lambda_6$  จะมีค่าเท่ากับ 6.25 ซึ่งมีค่ามากกว่า 5 ดังนั้นค่าเจาะจง  $\lambda_5$  และ  $\lambda_6$  เป็นค่าเจาะจงเด่นหรือเป็นขั้วเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา และเมื่อพิจารณาดำแหน่งของขั้วเด่นดังกล่าวจะพบว่า อยู่ตรงตำแหน่งที่ใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ ซึ่งคำนวณได้จาก  $1/\sqrt{L_{dc}C_{dc}} = 365.15$  ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ขั้วเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา มีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของวงจรกรอง ( $L_{dc}$  และ  $C_{dc}$ ) ซึ่งค่าเจาะจงเด่นหรือค่าขั้วเด่นนี้จะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของ

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา สามารถวิเคราะห์ได้จากค่าเงาเงนของระบบได้ ซึ่งเส้นทางเดินของค่าเงาเงนของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0–28.7 kW แสดงได้ดังรูปที่ 5.7 ดังนี้



รูปที่ 5.7 ค่าเงาเงนที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากรูปที่ 5.7 จะสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 28.6 kW ( $V_o^* = 378.15$  V) ส่วนจริงของค่าเงาเงนของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีค่ามากกว่าศูนย์ ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (3-6) ที่กล่าวไว้ว่า ระบบจะมีเสถียรภาพ ถ้าส่วนจริงของค่าเงาเงนมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ ระบบจะขาดเสถียรภาพ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 จะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 28.5 kW ( $V_o^* = 377.49$  V)

### 5.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

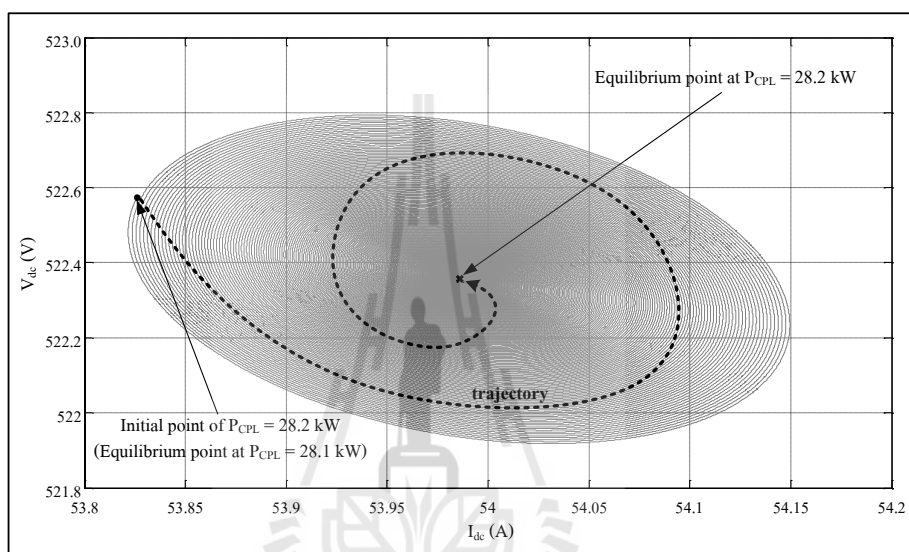
จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในหัวข้อที่ 5.3.1 จะพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีขั้วเด่นเพียงแค่ 2 ตัว เท่านั้น โดยขั้วเด่นนี้จะมีอิทธิพลต่อ

เสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งขั้วเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะเป็นขั้วที่สื่อถึง วงจรกรอง เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง ( $L_{dc}$  และ  $C_{dc}$ ) ดังนั้นจึงทำให้ตัวแปรสถานะ  $I_{dc}$  (กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง) และ  $V_{dc}$  (แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรอง) เป็นตัวแปรสถานะที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบ ซึ่งจากแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากบทที่ 4 ระบุไว้ว่า ถ้าระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีจำนวนขั้วเด่นเพียงแค่ 2 ตัว การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถทำได้โดยอาศัยการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับขั้วเด่นได้ แต่การหาคำตอบของสมการอนุพันธ์เพื่อนำคำตอบที่หาได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับขั้วเด่น จะต้องคำนวณหาจากชุดสมการอนุพันธ์ของระบบทั้งหมด ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 5.1 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถทำได้โดยสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  แต่การหาคำตอบของสมการอนุพันธ์เพื่อนำคำตอบที่หาได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  ยังคงต้องอาศัยการหาคำตอบจากสมการอนุพันธ์ทั้ง 10 สมการ ดังสมการที่ (5-13)

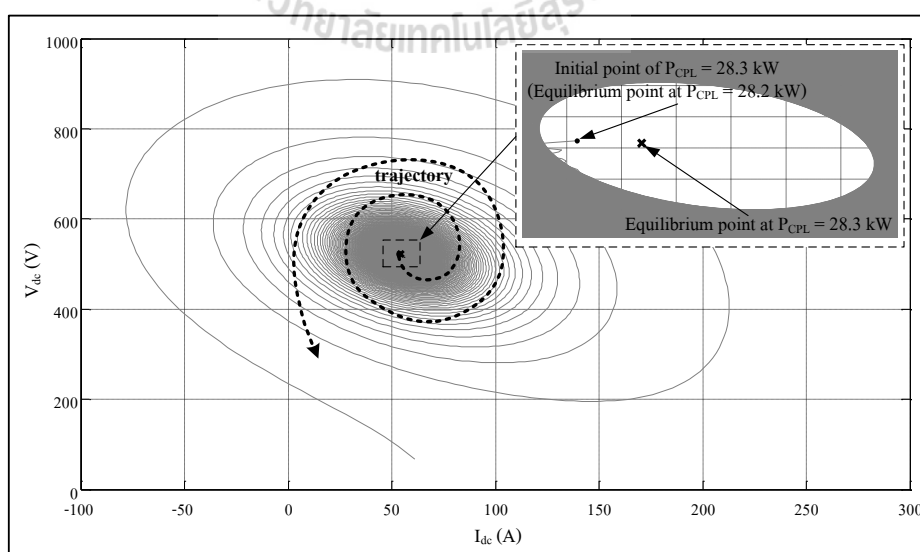
การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส จะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 การวิเคราะห์เสถียรภาพในสภาวะอยู่ตัว เมื่อโหนดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก และกรณีที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพในสภาวะอยู่ตัว เมื่อโหนดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพในหัวข้อที่ 4.3.2 บทที่ 4 ที่ผ่านมา ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 5.1 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสทั้ง 2 กรณี สามารถดำเนินการ โดยอาศัยหลักการที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3.2 ในบทที่ 4 ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

**กรณีที่ 1** การวิเคราะห์เสถียรภาพในสภาวะอยู่ตัว เมื่อโหนดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโหนดในกรณีนี้จะอาศัยการเพิ่มค่าโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัว ทีละ 100 W (เพิ่ม  $V_o^*$  ทีละ 22.36 V) ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาขาดเสถียรภาพ ซึ่งเป็นการดำเนินการเช่นเดียวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ที่คำนวณหาค่าเจาะจงของระบบในทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงค่าโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัว 100 W ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ดังนั้นจากหลักการที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3.2 ในบทที่ 4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ 1 นี้สามารถดำเนินการได้ดังนี้ จากสมการที่ (5-13) และจุดปฏิบัติงานของระบบ ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยการ

คำนวณบนโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดให้  $\dot{I}_{sd}$ ,  $\dot{I}_{sq}$ ,  $\dot{V}_{bus,d}$ ,  $\dot{V}_{bus,q}$ ,  $\dot{I}_{dc}$ ,  $\dot{V}_{dc}$ ,  $\dot{I}_L$ ,  $\dot{V}_o$ ,  $\dot{X}_v$  และ  $\dot{X}_i$  ในสมการที่ (5-13) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ จะสามารถสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ( $V_o^* = 374.83$  V) ไปเป็น 28.2 kW ( $V_o^* = 375.50$  V) และเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW ( $V_o^* = 376.15$  V) ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ 5.8 trajectory เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW



รูปที่ 5.9 trajectory เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW

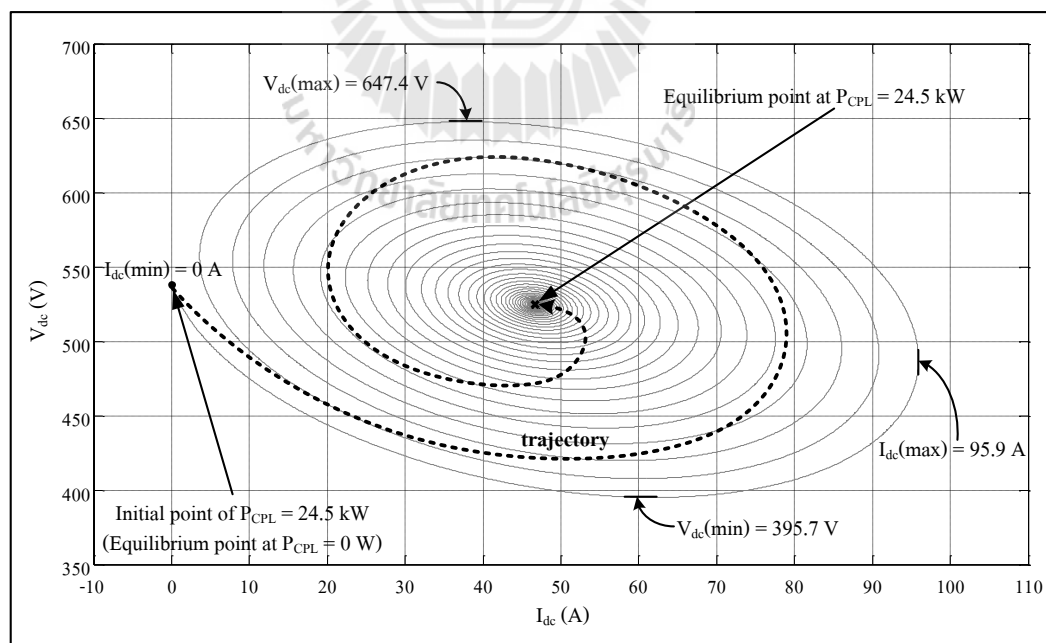
จากรูปที่ 5.8 จะสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มต้นจากจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.1 kW และจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.2 kW ก่อนที่จะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานดังกล่าวเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.2 kW เป็นแบบโพกัสเสถียร ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพ ในกรณีที่รูปที่ 5.9 นั้น เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มต้นจากจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.2 kW โดยจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.3 kW และจะออกห่างจากจุดปฏิบัติงานดังกล่าวมากยิ่งขึ้นอย่างไม่มีที่สิ้นสุดเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.3 kW เป็นแบบโพกัสไม่เสถียร ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ จึงสามารถสรุปได้ว่า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 28.2 kW

**กรณีที่ 2** การวิเคราะห์เสถียรภาพในสภาวะอยู่ตัว เมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีนี้จะเป็นการพิจารณาว่า การเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 0 W ( $V_o^* = 0$  V) ไปเป็น โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวค่าใดที่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ( $P_{CPL, Unstable}$ ) โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงโหลดเพียงครั้งเดียว กล่าวคือเป็นการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 0 W ไปเป็น  $P_{CPL, Unstable}$  ดังนั้นจากหลักการที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3.2 ในบทที่ 4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ 2 สามารถดำเนินการได้ดังนี้ จากสมการที่ (5-13) และจุดเริ่มต้นการทำงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 0 W นั่นคือ  $I_{sd}(0) = 0$  A,  $I_{sq}(0) = 0$  A,  $V_{bus,d}(0) = 0$  V,  $V_{bus,q}(0) = 0$  V,  $I_{dc}(0) = 0$  A,  $V_{dc}(0) = 537.99$  V,  $I_L(0) = 0$  A,  $V_o(0) = 0$  V,  $X_v(0) = 0$  และ  $X_f(0) = 0$  จะสามารถสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW ( $V_o^* = 350$  V) และเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW ( $V_o^* = 350.71$  V) ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 ตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่า ในรูปที่ 5.10 เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มจากจุดเริ่มต้นการทำงานที่ได้กำหนดไว้ และจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 24.5 kW ก่อนที่จะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานดังกล่าวเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานที่โหลดกำลังไฟฟ้า

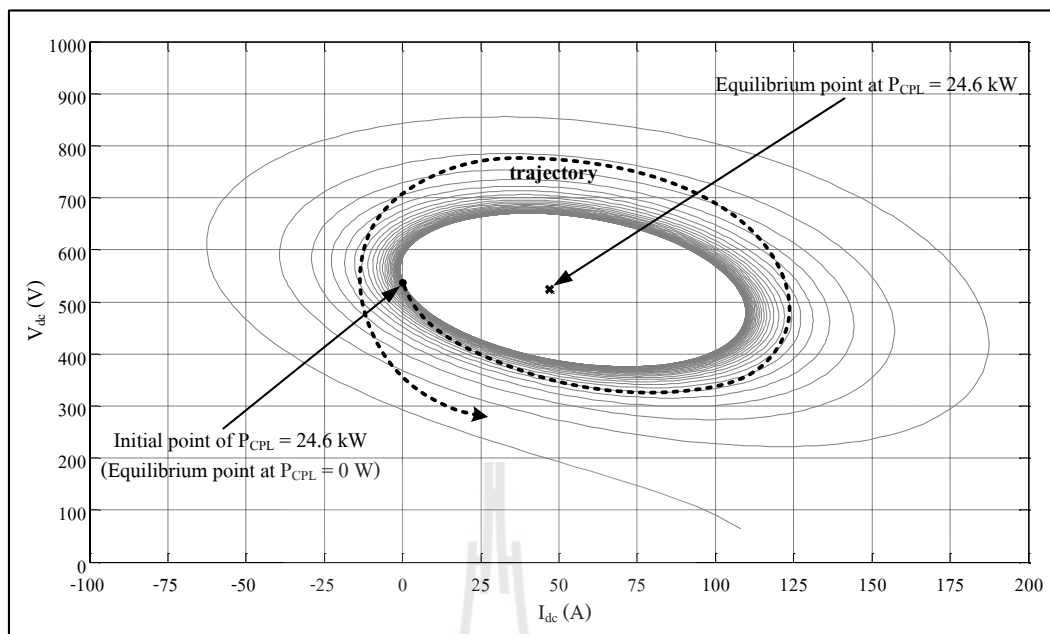


คงตัวมีค่าเท่ากับ 24.5 kW เป็นแบบโพลัสเสถียร ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพ ในขณะที่ รูปที่ 5.11 นั้น เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มจากจุดเริ่มต้นการทำงานที่ได้กำหนดไว้ โดยจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานของระบบที่ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 24.6 kW และจะออกห่างจากจุดปฏิบัติงานดังกล่าวมากยิ่งขึ้นอย่างไม่มีที่สิ้นสุดเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานที่ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 24.6 kW เป็นแบบโพลัสไม่เสถียร ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 24.5 kW

ดังนั้นจากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส จะสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 28.2 kW ซึ่งข้อสรุปนี้จะเป็นจริงสำหรับการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กเท่านั้น ในขณะที่ การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 24.5 kW



รูปที่ 5.10 trajectory เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW



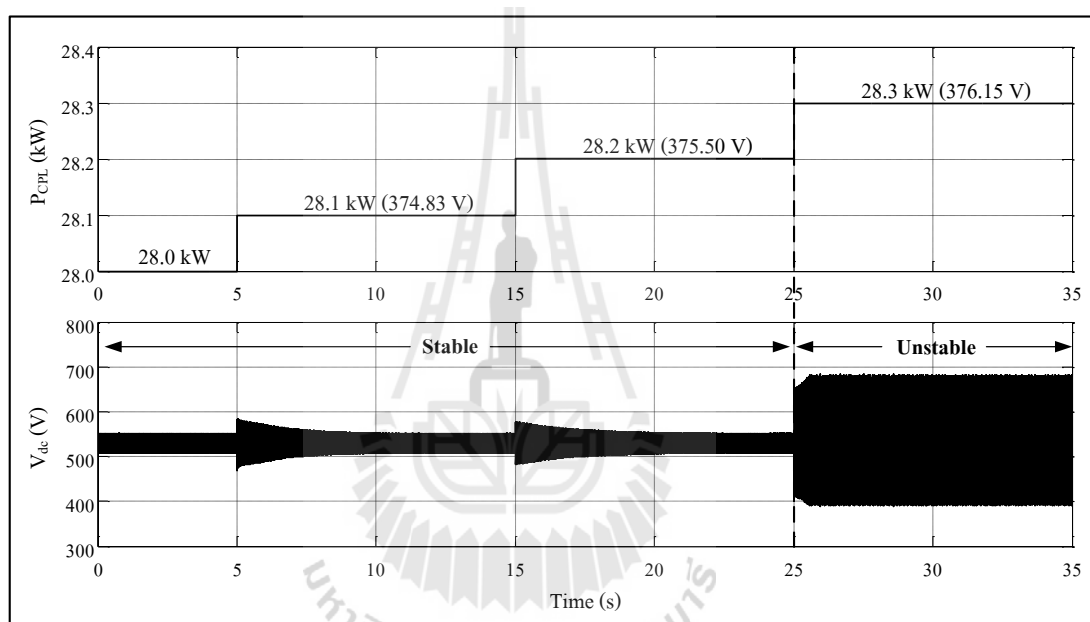
รูปที่ 5.11 trajectory เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW

นอกจากนี้แล้ว จากหลักการและขั้นตอนของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งได้นำเสนอไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.3.2 ในบทที่ 3 จะพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้แล้ว หากรูปแบบการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เป็นการเคลื่อนที่แบบมีการสั่นไกว จะสามารถประมาณการสั่นไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW จากกราฟการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในรูปที่ 5.10 จะสังเกตได้ว่า การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบมีการสั่นไกว ซึ่งสามารถประมาณการสั่นไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้ดังนี้ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรตรง ( $I_{dc}$ ) จะมีการสั่นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง 0 – 95.9 A และแรงดันที่ตกคร่อมความจุไฟฟ้าของวงจรตรง ( $V_{dc}$ ) จะมีการสั่นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง 395.7 – 647.4 V ก่อนที่การสั่นไกวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบ

### 5.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ

การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บน

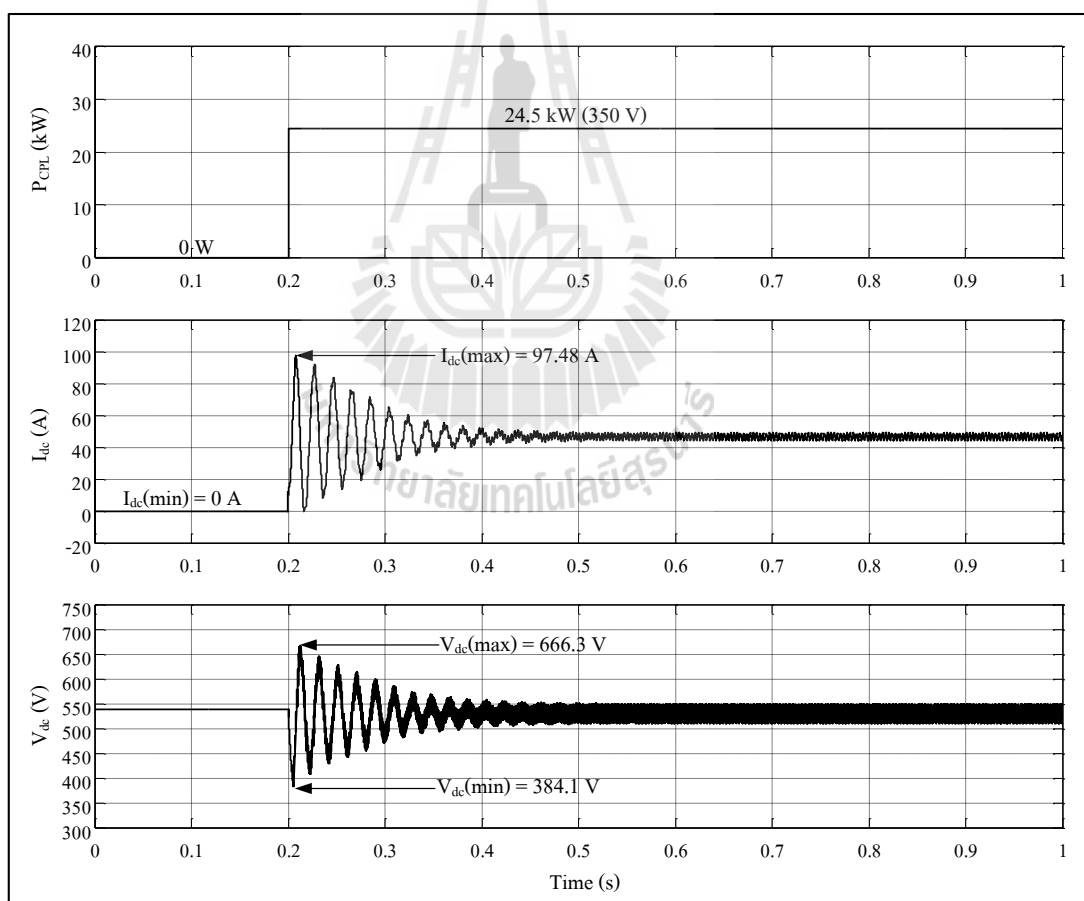
โปรแกรม MATLAB ซึ่งชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม สามารถดูได้จากภาคผนวก ก.3 ผลการยืนยันการขาดเสถียรภาพแสดงได้ดังรูปที่ 5.12 ถึงรูปที่ 5.14 โดยรูปที่ 5.12 จะเป็นการยืนยันการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ในขณะที่ รูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 นั้นจะเป็นการยืนยันการมีเสถียรภาพและการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่



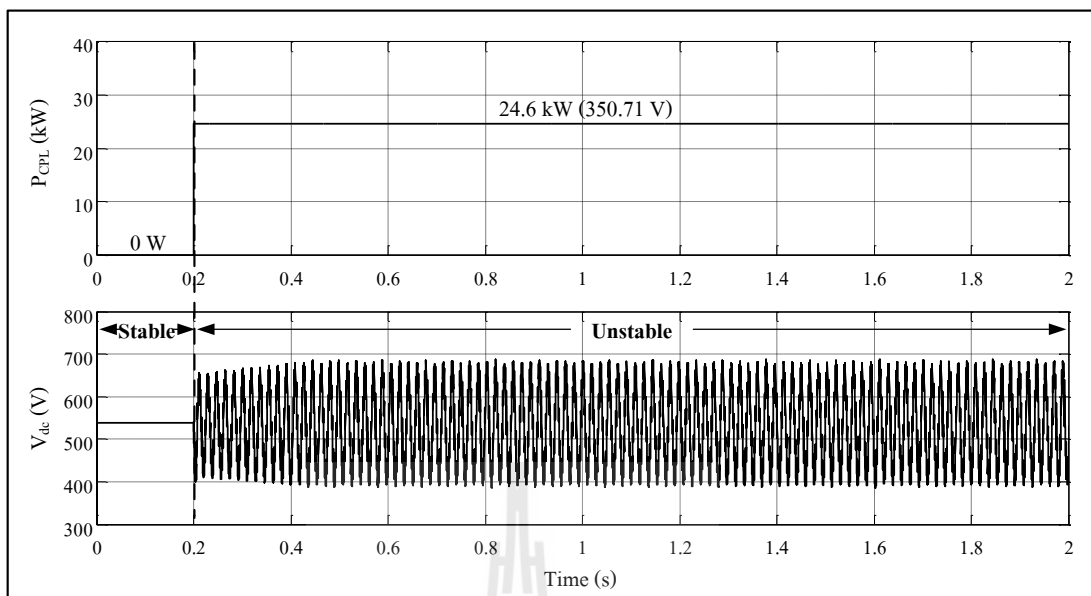
รูปที่ 5.12 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก

จากรูปที่ 5.12 ซึ่งเป็นการยืนยันการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ( $V_o^* = 375.50$  V) ไปเป็น 28.3 kW ( $V_o^* = 376.15$  V) ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จะพบว่า มีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นนั้น ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 28.5 kW ( $V_o^* = 377.49$  V) ดังนั้นความคลาด

เคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพที่เกิดขึ้นคือ 300 W หรือคิดเป็น 1.06 % ในขณะที่ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 28.2 kW ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ จะพบว่า มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นได้อีกครั้งหนึ่งว่า ถึงแม้ว่าจะเป็นกรวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก จะมีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยตรง หรือเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ จะให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ



รูปที่ 5.13 ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์  
เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW



รูปที่ 5.14 ผลการยืนยันการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์  
เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW

จากรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 ซึ่งเป็นการยืนยันการมีเสถียรภาพและการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ จะสังเกตได้ว่า ในรูปที่ 5.13 เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW ( $V_o^* = 350$  V) ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะยังคงมีเสถียรภาพ ในขณะที่ รูปที่ 5.14 นั้น เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW ( $V_o^* = 350.71$  V) ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 24.5 kW ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 จะพบว่า มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นได้อีกครั้งหนึ่งว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญชาตญาณขนาดใหญ่ สามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จะพบว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้ระบุว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 28.5 kW เท่านั้น นั่นหมายความว่า ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 24.6 kW ระบบจะมีเสถียรภาพอย่างแน่นอน

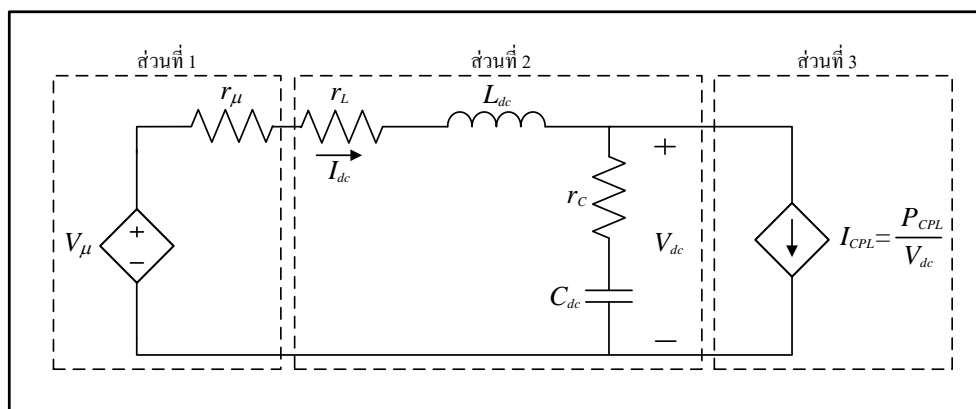
เนื่องจากส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่าเป็นลบ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วที่สภาวะดังกล่าว ระบบอาจจะขาดเสถียรภาพเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโพลภายในได้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้ ซึ่งการขาดเสถียรภาพในกรณีที่โพลค่าลึงไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 24.6 kW สามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.14 ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ จะมีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพที่เกิดขึ้นคือ 4 kW หรือคิดเป็น 16.33 % ซึ่งถือว่าเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าสูง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการแสดงให้เห็นได้อีกครั้งหนึ่งว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก นอกจากจะให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีโพลของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายในได้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก มีความคลาดเคลื่อนแล้ว ยังไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีโพลมีการเปลี่ยนแปลงภายในได้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้อีกด้วย

จากรูปที่ 5.13 นอกจากจะสามารถใช้ยืนยันการมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีโพลค่าลึงไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงภายในได้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้แล้ว ยังสามารถใช้ยืนยันการประมาณการสั้น โกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติการ เมื่อโพลค่าลึงไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW ได้อีกด้วย ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า  $I_{dc}$  จะมีการสั้น โกวสูงสุดอยู่ในช่วง 0 – 97.48 A และ  $V_{dc}$  จะมีการสั้น โกวสูงสุดอยู่ในช่วง 384.1 – 666.3 V ก่อนที่การสั้น โกวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติการของระบบ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสที่ได้ นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.3.2 ดังแสดงในรูปที่ 5.10 จะพบว่า มีความใกล้เคียงกัน โดยผลที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสนั้น  $I_{dc}$  จะมีการสั้น โกวสูงสุดอยู่ในช่วง 0 – 95.9 A และ  $V_{dc}$  จะมีการสั้น โกวสูงสุดอยู่ในช่วง 395.7 – 647.4 V ก่อนที่การสั้น โกวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติการของระบบ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั้น โกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติการได้อีกด้วย

การวิเคราะห์เสถียรภาพในบทที่ 5 นี้ นอกจากจะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นและวิธีการวิเคราะห์ระบบเฟส เพื่อคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบ ดังรายละเอียดที่ได้นำเสนอไปในข้างต้นแล้ว งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ สำหรับการรับประกันว่า การเปลี่ยนแปลงโพลของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุด การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่าง แน่นนอน โดยการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรเรียงกระแส สามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโพลเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม แสดงรายละเอียดได้ดัง หัวข้อที่ 5.4 ดังนี้

#### 5.4 การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจร เรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโพลเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มี ตัวควบคุม

การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรเรียงกระแสสามเฟส แบบบริดจ์ที่มีโพลเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการ ประมาณจากวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบแทนการประมาณจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาโดยตรง เพื่อลดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบ เชิงเส้นกำกับ ซึ่งวงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโพลเป็นวงจร แปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม แสดงดังรูปที่ 5.15 จากรูปจะพบว่า วงจรสมมูลอย่างง่ายของ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบ ไม่อิสระ  $V_{\mu}$  ที่มีความต้านทาน  $r_{\mu}$  ต่ออนุกรมอยู่กับแหล่งจ่าย ซึ่งใช้แทนแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โดยคำนึงถึงพลวัตของระบบส่งจ่าย กำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุลและไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 2 วงจรกรอง และ ส่วนที่ 3 โพลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่ต่อขนานกับระบบผ่านวงจรกรอง ซึ่งใช้แทนพลวัต ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ด้วยเหตุผลที่ว่า ตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ถูกออกแบบให้มีความไวสูงในการควบคุม ซึ่งทำให้วงจรแปลงผันแบบบัคค์มีการตอบสนองที่ ไวมาก จนกระทั่งมีพฤติกรรมเปรียบเสมือน โพลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังนั้นจึงสามารถที่ จะแทนวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมด้วยโพลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติได้



รูปที่ 5.15 วงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์  
ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม

จากรูปที่ 5.15 จะสังเกตได้ว่า วงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม มีส่วนประกอบที่เหมือนกับวงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ในบทที่ 4 ดังนั้นการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรสมมูลอย่างง่ายที่พิจารณาในบทที่ 5 จึงมีหลักการ ขั้นตอน และรายละเอียดเช่นเดียวกับการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรสมมูลอย่างง่ายที่พิจารณาในบทที่ 4 ซึ่งเป็นการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน ดังนั้นจากหลักการและขั้นตอนที่ได้รับการอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.4 ในบทที่ 4 ที่ผ่านมา จะได้ค่าของเมตริกซ์  $M$ ,  $x_{1,\min}$ ,  $x_{2,\min}$  และ  $V(x_{\min})$  ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 5 kW 10 kW 15 kW และ 20 kW ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (RAS) ของวงจรสมมูลอย่างง่ายของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 5 kW 10 kW 15 kW และ 20 kW ดังแสดงในรูปที่ 5.16

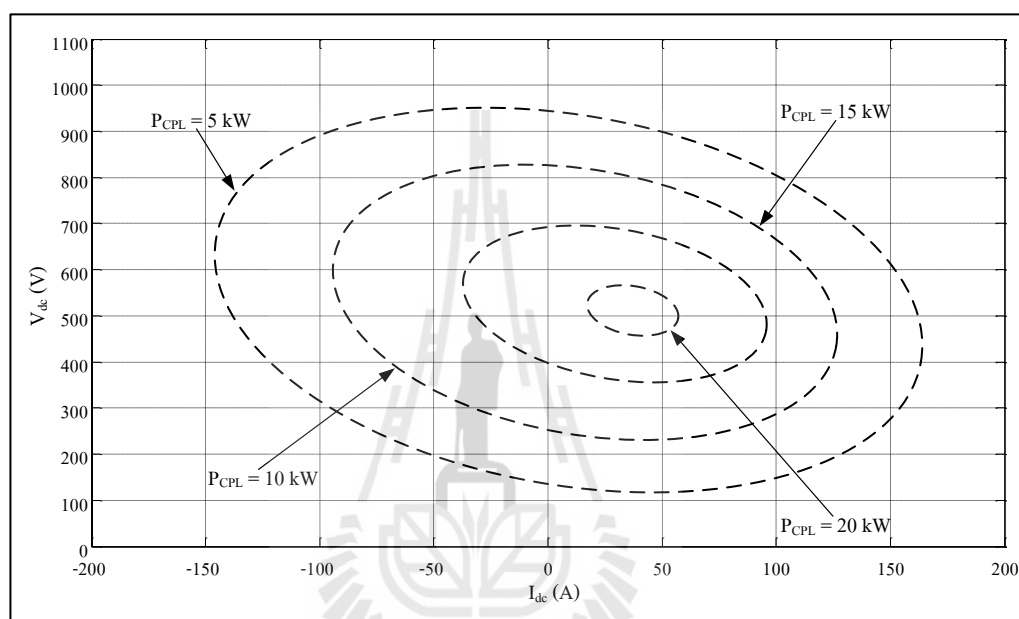
ตารางที่ 5.2 ค่าเมตริกซ์  $M$ ,  $x_{1,\min}$ ,  $x_{2,\min}$ ,  $V(x_{\min})$  ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ

$P_{CPL}$ (kW)	5	10	15	20
เมตริกซ์ $M$	$\begin{bmatrix} 1.12 & 0.09 \\ 0.09 & 0.16 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.75 & 0.30 \\ 0.30 & 0.52 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 4.68 & 0.38 \\ 0.38 & 0.65 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 7.58 & 0.61 \\ 0.61 & 1.05 \end{bmatrix}$



ตารางที่ 5.2 ค่าเมตริกซ์  $M$ ,  $x_{1,\min}$ ,  $x_{2,\min}$ ,  $V(x_{\min})$  ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (ต่อ)

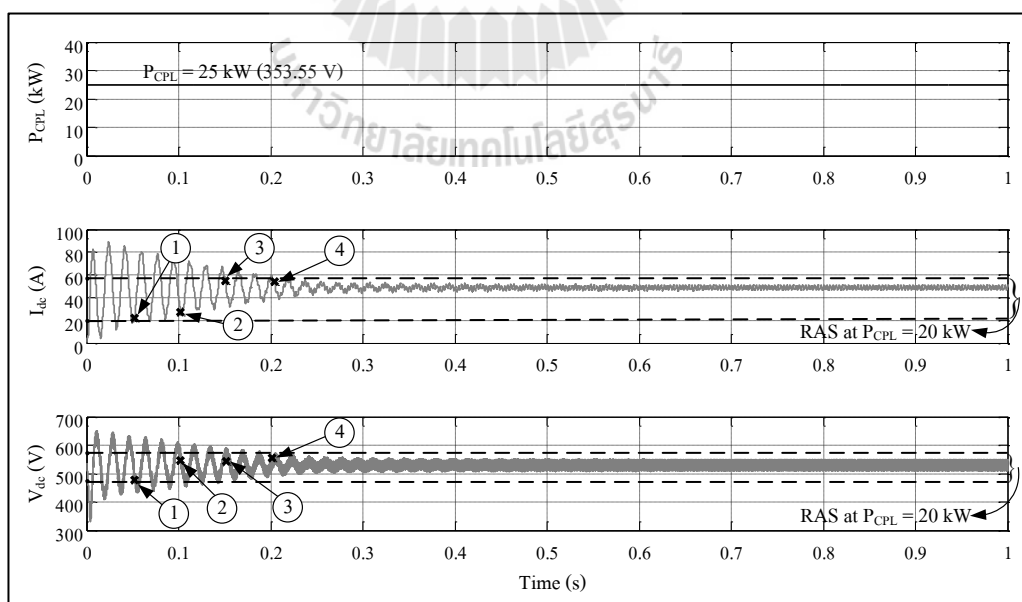
$P_{CPL}$ (kW)	5	10	15	20
$x_{2,\min}$	-418.60	-297.60	-174.90	-50.40
$x_{1,\min}$	33.87	24.09	14.16	4.08
$V(x_{1,\min}, x_{2,\min})$	25942.07	43951.94	18940.01	2544.20



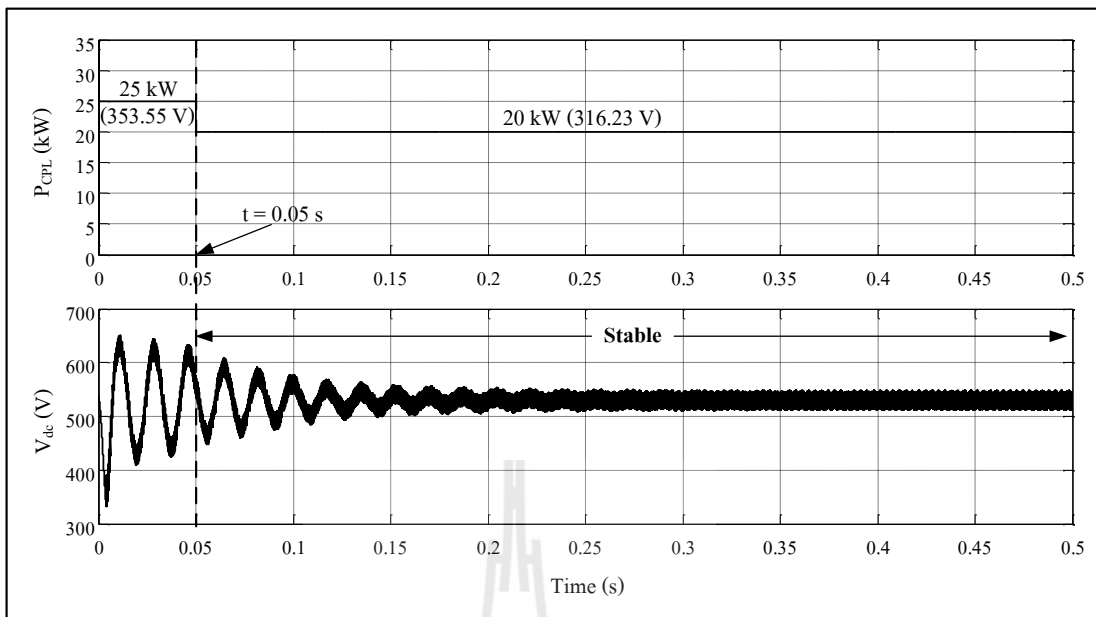
รูปที่ 5.16 RAS เมื่อ  $P_{CPL}$  มีค่าเท่ากับ 5 kW 10 kW 15 kW และ 20 kW

จากขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียบนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิ และซุงิโน ดังแสดงในรูปที่ 5.16 จะถูกนำไปใช้เป็นขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม สำหรับการรับประกันว่า การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบและยืนยันว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากวงจรสมมูลอย่างง่าย สามารถนำไปใช้เป็นขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุมได้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงดำเนินการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใดของวงจรเรียงกระแสสามเฟส

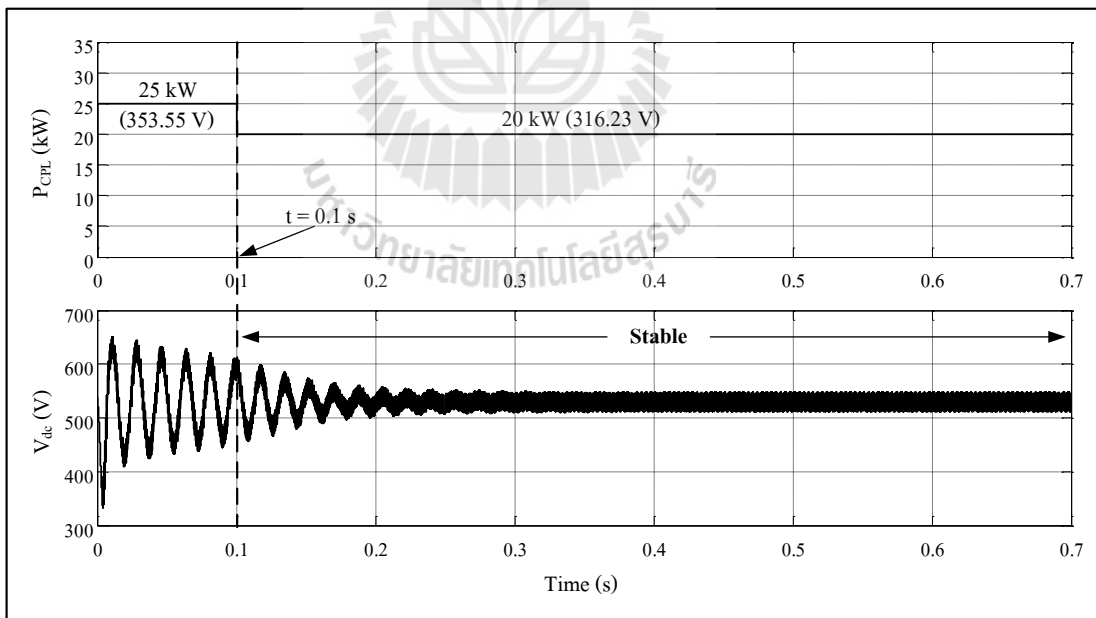
แบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม จากค่าโหลด 25 kW ( $V_o^* = 353.55$  V) ไปเป็น 20 kW ( $V_o^* = 316.23$  V) ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 4 จุด ดังแสดงในรูปที่ 5.17 ซึ่งจุดการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด 4 จุดที่พิจารณานี้ จะอยู่ในขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 20 kW และดำเนินการยืนยันการมีเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1 ถึงจุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4 ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลการยืนยันที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 5.18 ถึงรูปที่ 5.21 ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่า ทุก ๆ จุดการเปลี่ยนแปลงโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่อยู่ในขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ ระบบจะมีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากวงจรสมมูลอย่างง่าย สามารถนำไปใช้เป็นขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม สำหรับการรับประกันว่า การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอนได้



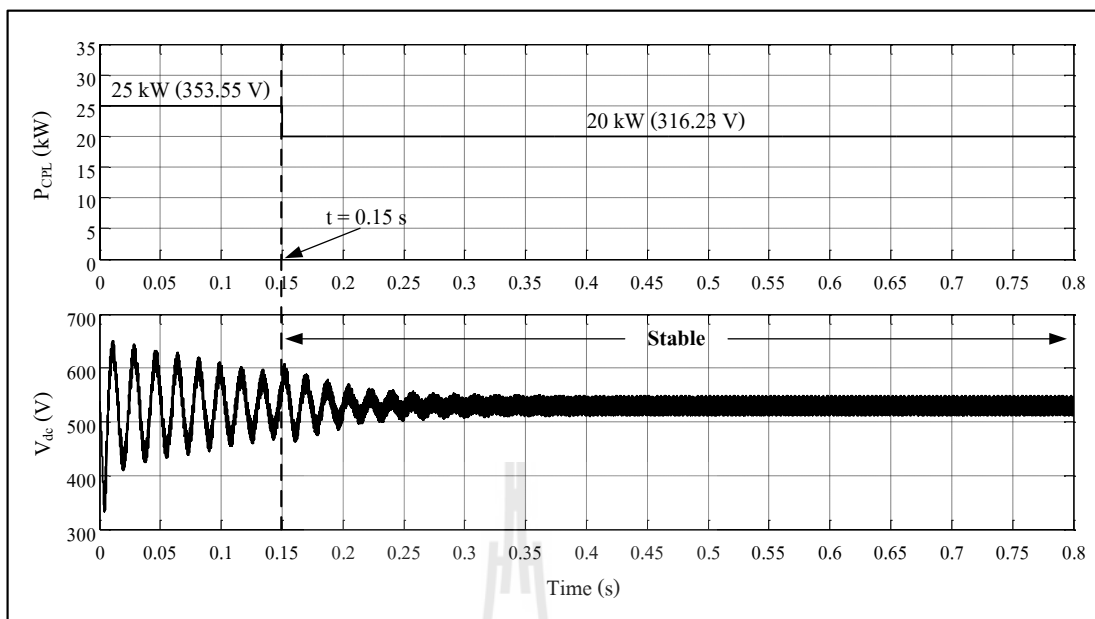
รูปที่ 5.17 สัญญาณ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม เมื่อ  $P_{CPL} = 25$  kW และมี RAS ที่  $P_{CPL} = 20$  kW



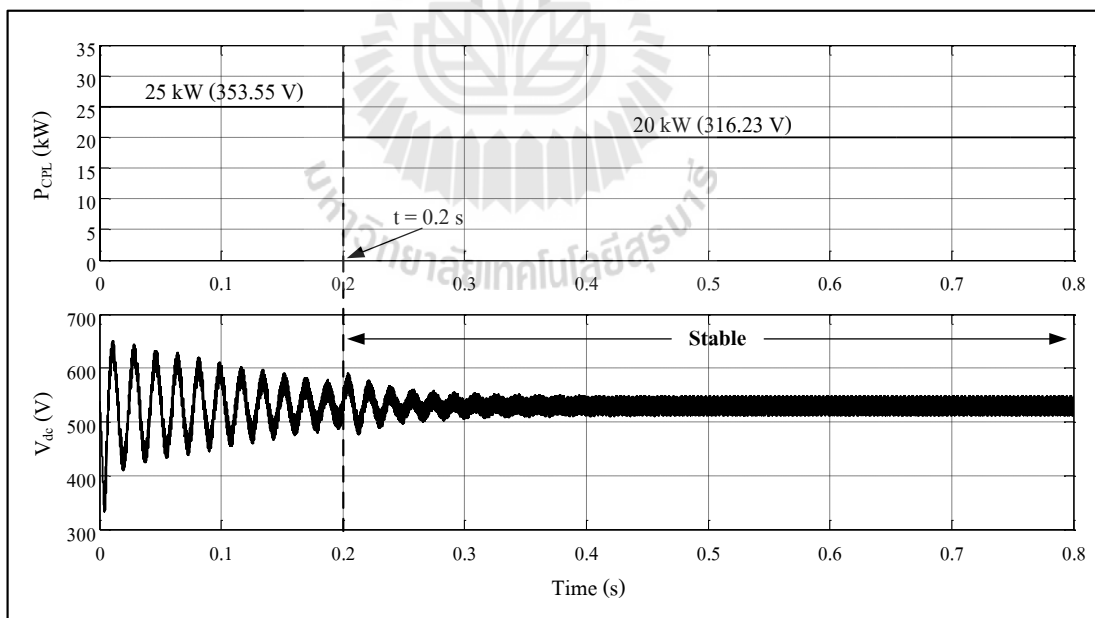
รูปที่ 5.18 ผลการขึ้นชั้นการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 1



รูปที่ 5.19 ผลการขึ้นชั้นการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 2



รูปที่ 5.20 ผลการขึ้นชั้นการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 3



รูปที่ 5.21 ผลการขึ้นชั้นการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก 25 kW ไปเป็น 20 kW ที่จุดการเปลี่ยนแปลงจุดที่ 4

## 5.5 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยมีการพิจารณาพลวัตของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมแทน โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ เพิ่มเติมจากบทที่ 4 ซึ่งผลจากการทำงานของไดโอดในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีลักษณะพฤติกรรมเหมือนกับสวิตช์ และผลการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิวิและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มากำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่สามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองกับผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ สามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ได้อาศัยแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากบทที่ 3 และบทที่ 4 นั่นคือ ใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบ ไฟฟ้าที่พิจารณา และใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟที่อาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ สำหรับการรับประกันว่า การเปลี่ยนแปลง โหลดของระบบแบบทันทีทันใดด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน ซึ่งการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ได้ดำเนินการประมาณจากวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบแทนการประมาณจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาโดยตรง ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ พบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากที่ระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้ว กล่าวคือ เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในสถานะอยู่ตัว ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์

เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก นอกจากจะให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก มีความคลาดเคลื่อนแล้ว ยังไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้อีกด้วย ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยตรง หรือเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ นอกจากจะสามารถประมาณการสั้น โกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้แล้ว ยังสามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก และภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำอีกด้วย และสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการ โดยตรงของเลียปุนอฟที่มุ่งเน้นไปที่การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปุนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน แสดงให้เห็นว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากวงจรมูลอย่างง่าย สามารถนำไปใช้เป็นขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่ มีตัวควบคุม สำหรับการรับประกันว่า การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอนได้ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า แนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากบทที่ 3 และบทที่ 4 สามารถใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นสำหรับงานวิจัยในอนาคต สามารถดำเนินการ โดยอาศัยองค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานได้

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยเริ่มต้นจากการศึกษาและค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจากการศึกษาและค้นคว้าพบว่า โหลดของระบบไฟฟ้ากำลังที่เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงานจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือน โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ นอกจากจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบแล้ว ยังส่งผลทำให้ระบบเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นแบบกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก เนื่องจากถ้าระบบไฟฟ้ากำลังขาดเสถียรภาพอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบ หรือส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง แต่วิธีการนี้มีข้อจำกัดคือ ถ้าค่าเจาะจงอยู่บนแกนจินตภาพจะไม่สามารถสรุปได้ว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้น มีเสถียรภาพหรือขาดเสถียรภาพ ซึ่งความไม่ชัดเจนดังกล่าวอาจทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้ แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นแล้ว ยังมีวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณใหญ่ โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีการที่ดำเนินการในโดเมนเวลา ประกอบด้วย การวิเคราะห์ระนาบเฟสและวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ และวิธีการที่ดำเนินการใน โดเมนความถี่ ประกอบด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนามเกณฑ์ของโพพอฟ และเกณฑ์วงกลม ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ด้วยวิธีการที่ดำเนินการในโดเมนเวลานั้นคือ การวิเคราะห์ระนาบเฟสและวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ เนื่องจากมีความยุ่งยากและซับซ้อนน้อยกว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ที่ดำเนินการในโดเมนความถี่ แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไม่ว่าจะใช้วิธีการใดจำเป็นต้องอาศัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ นิยมใช้วิธีดีคิว เพราะแบบจำลองที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูงและไม่ซับซ้อน ในขณะที่การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีนิยมใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพราะแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้จะมีความถูกต้องแม่นยำและไม่ซับซ้อน ซึ่งปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์หรรษาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ โดยที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟอาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟจากวิธีการที่แตกต่างกันสามวิธี คือ วิธีการของคราซอว์สกี วิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์ และวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน เป็นการดำเนินการเพื่อสร้างองค์ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับแนวคิดพื้นฐานและทฤษฎีบทที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของแต่ละวิธี และใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก นอกจากจะให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพแล้ว ยังไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดได้อีกด้วย ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หรรษาบเฟสและวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยตรง หรือเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ นอกจากจะสามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดได้อย่างถูกต้องแม่นยำอีกด้วย แต่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ และในทางปฏิบัติการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความยุ่งยากซับซ้อน ดังแสดงให้เห็นได้จากการที่ไม่สามารถคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการของคราซอว์สกีได้ จนกระทั่งต้องอาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์ แต่วิธีการนั้นนอกจากจะมีความยุ่งยากซับซ้อนแล้ว ยังมีข้อจำกัดของระบบที่สามารถใช้วิธีการนี้ได้ เช่น ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะต้องไม่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแบบไม่อิสระ เป็นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์หรรษาบเฟสจึงเป็นวิธีการที่สามารถดำเนินการได้ง่ายกว่า และมีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของ



เลียปูนอฟ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหนดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อหลีกเลี่ยงการขาดเสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหนดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดให้ได้ นั้น จะต้องใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส มาวิเคราะห์ โดยพิจารณาที่ละจุดการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปได้ทั้งหมด จนกระทั่งครบทุกจุดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งกว่าจะวิเคราะห์ได้ครบทุกจุดนั้น จะต้องใช้เวลาานาน ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการ โดยตรงของเลียปูนอฟจะเข้ามามีบทบาทและเป็นประโยชน์อย่างมาก เพราะสามารถประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้ โดยขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ สามารถที่จะพิจารณาให้เป็นขอบเขตของจุดเริ่มต้นการทำงานหรือจุดการเปลี่ยนแปลงโหนดแบบทันทีทันใดที่จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน ซึ่งจากการดำเนินการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจะพบว่า ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอ โดยทาคากิและซูจิโน จะมีขนาดที่ใกล้เคียงกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริง มากกว่าขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอ โดยเบรย์ตันและมอเซอร์ และขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอ โดยทาคากิและซูจิโนนี้ สามารถรับประกันได้ว่า การเปลี่ยนแปลง โหนดแบบทันทีทันใดด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวจะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน และนอกจากนั้นแล้วยังพบว่าการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอ โดยทาคากิและซูจิโน สามารถนำไปใช้กับระบบที่มีความซับซ้อน ได้ง่ายกว่าวิธีการที่นำเสนอ โดยเบรย์ตันและมอเซอร์อีกด้วย โดยองค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ที่ได้จากบทนี้คือ ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบ พร้อมทั้งนำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกัน และได้ใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการ โดยตรงของเลียปูนอฟที่อาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอ โดยทาคากิและซูจิโน เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ สำหรับการรับประกันว่า การเปลี่ยนแปลงโหนดของระบบแบบทันทีทันใดด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

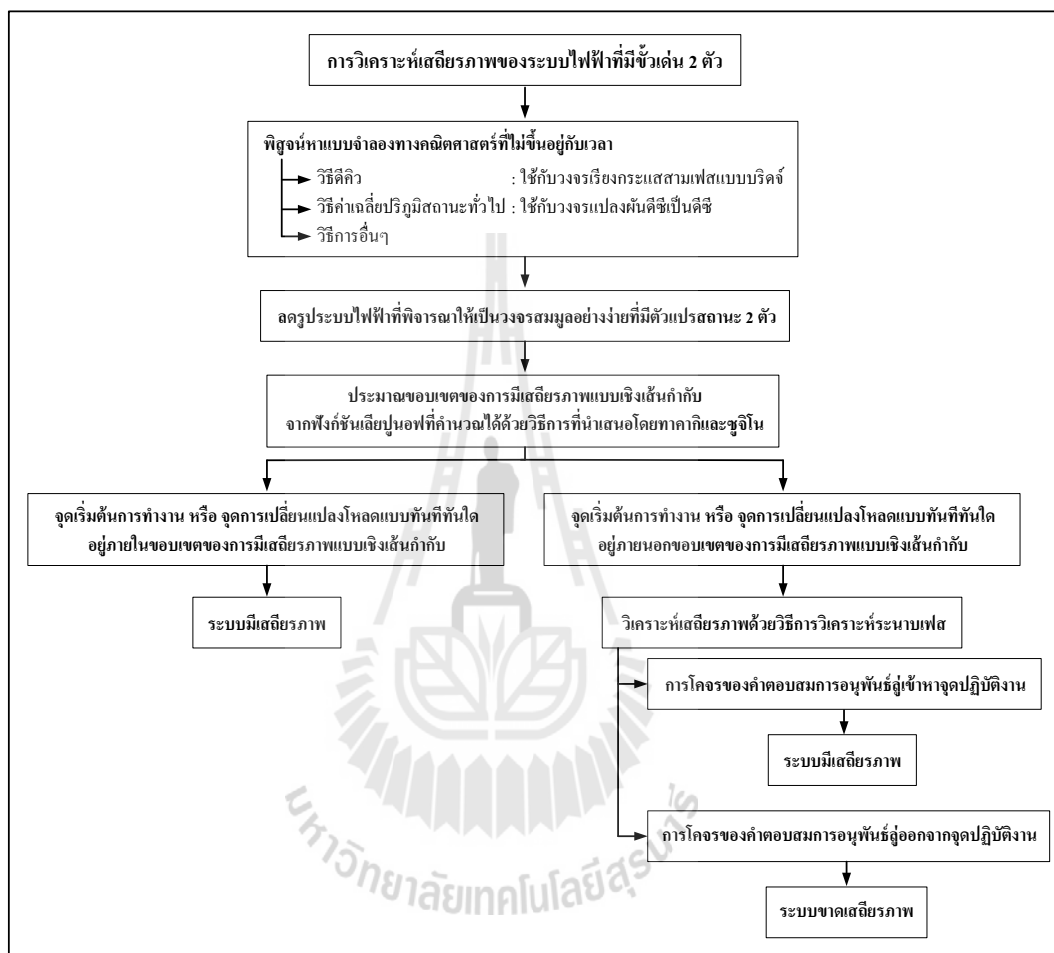
การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหนดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ แต่เมื่อพิจารณา

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา จะพบว่า เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลการทำงานของไดโอดในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีลักษณะพฤติกรรมเหมือนกับสวิตช์ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้วิธีดัดแปลง มาจำกัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ สามารถยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ที่พิสูจน์หาได้ด้วยวิธีดัดแปลง มีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพได้อาศัยองค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากบทที่ 3 และการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ได้ดำเนินการประมาณจากวงจรมูลอย่างง่ายของระบบแทนการประมาณจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาโดยตรง ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้ว กล่าวคือ เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสภาวะอยู่ตัว ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น นอกจากจะช่วยให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก มีความคลาดเคลื่อนแล้ว ยังไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้อีกด้วย ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะช่วยให้ผลการวิเคราะห์ในทั้งสองกรณีที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้อีก ในขณะที่ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้จากวงจรมูลอย่างง่าย สามารถนำไปใช้เป็นขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ สำหรับการรับประกันว่า การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตดังกล่าวนี้ จะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอนได้ โดยองค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้เพิ่มเติมจากบทนี้คือ ถ้าระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีจำนวนขั้วเด่นเพียงแค่ 2 ตัว เท่านั้น การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น สามารถดำเนินการวิเคราะห์ได้จากค่าเงาจุดเด่นของระบบได้ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี

การวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถทำได้โดยอาศัยการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับชั่วเด่นได้ แต่การหาคำตอบของสมการอนุพันธ์ เพื่อนำคำตอบที่หาได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับชั่วเด่น จะต้องคำนวณหาจากชุดสมการอนุพันธ์ของระบบทั้งหมด ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ ที่มุ่งเน้นไปที่การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน สามารถดำเนินการประมาณจากวงจรมูลอย่างง่ายของระบบแทนการประมาณจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาโดยตรง ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรรีขิงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีตัวควบคุม ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เริ่มต้นจากการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาของระบบ โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งวิธีคิวถูกนำมาใช้ในการจำกัดผลการทำงานของไดโอดในวงจรรีขิงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีลักษณะพฤติกรรมเหมือนกับสวิตช์ ในขณะที่วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปถูกนำมาใช้จำกัดผลการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัก์ที่มีตัวควบคุม ผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองกับผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ สามารถยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาที่ได้รับการพิสูจน์ มีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพได้อาศัยองค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากบทที่ 3 และบทที่ 4 ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ พบว่า ได้ข้อสรุปของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่เหมือนกับข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทที่ 3 และบทที่ 4 ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า แนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากบทที่ 3 และบทที่ 4 สามารถใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นสำหรับงานวิจัยในอนาคต สามารถดำเนินการ โดยอาศัยองค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานได้ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5

องค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น แต่ยังคงมีข้อเด่น 2 ข้อ สำหรับงานวิจัยในอนาคต ที่ได้จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ดังนี้



รูปที่ 6.1 แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยองค์ความรู้และแนวทาง  
ที่สรุปได้จากงานวิจัยวิทยานิพนธ์

จากแผนภาพในรูปที่ 6.1 จะพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีความซับซ้อน แต่ยังคงมีข้อเด่น 2 ข้อ โดยอาศัยองค์ความรู้และแนวทางที่สรุปได้จากงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จะเริ่มต้นจากการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยที่การพิสูจน์หาแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์จะใช้วิธีคิว ในขณะที่ การพิสูจน์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซีจะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป หรืออาจจะใช้วิธีการอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

จากนั้นจะทำการลดรูประบบไฟฟ้าที่พิจารณาให้เป็นวงจรสมมูลอย่างง่ายที่มีจำนวนตัวแปรสถานะเพียงแค่ 2 ตัว ซึ่งเป็นตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับขั้วเดิน และใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟที่อาศัยการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟด้วยวิธีการที่นำเสนอโดย ทาคาคิและซูจิโน มาประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ซึ่งขอบเขตที่ประมาณได้จากวงจรสมมูลอย่างง่ายจะถูกนำไปใช้เป็นขอบเขตของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา สำหรับการรับประกันว่า การเริ่มต้นการทำงานหรือการเปลี่ยนแปลงโหนดของระบบแบบทันทีทันใด ด้วยจุดใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตจะไม่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพอย่างแน่นอน และในกรณีที่จุดเริ่มต้นการทำงานหรือจุดการเปลี่ยนแปลงโหนดแบบทันทีทันใดที่พิจารณาอยู่นอกขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ประมาณได้ จะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เข้ามาช่วยวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยพิจารณาเป็นกรณี ๆ ไป โดยถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลู่เข้าหาจุดปฏิบัติงาน ระบบจะมีเสถียรภาพ แต่ถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลู่ออกจากจุดปฏิบัติงาน ระบบจะขาดเสถียรภาพ

## 6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีขั้วเดิน 2 ตัว เท่านั้น ซึ่งทำให้องค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ สามารถนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนได้ แต่ระบบดังกล่าวจะต้องเป็นระบบที่มีขั้วเดินเพียงแค่ 2 ตัว เท่านั้น ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตควรมีการพัฒนาองค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพ เพื่อให้สามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนและมีจำนวนขั้วเดินมากกว่า 2 ตัว ได้

- การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่มีความซับซ้อน งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการประมาณจากวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบแทนการประมาณจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาโดยตรง ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตควรมีการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาโดยตรง

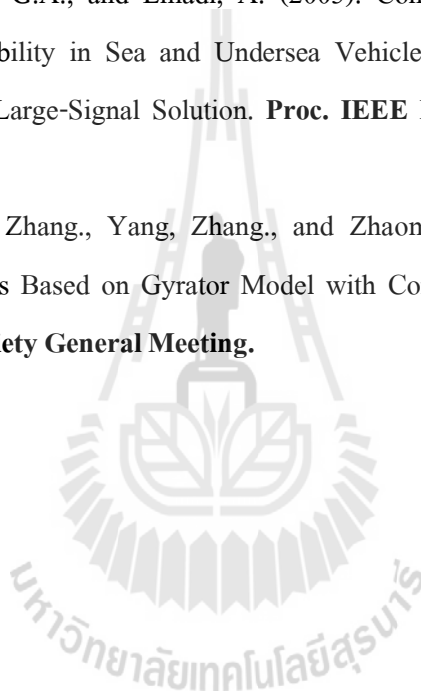
- การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ถือเป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization problem) นั่นคือ การหาค่าของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่มากที่สุดที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ดังนั้นควรมีการประยุกต์ใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เช่น การค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search: ATS) สำหรับการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ เพื่อให้ขอบเขตที่ประมาณได้มีความใกล้เคียงกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่แท้จริง มากที่สุดเท่าที่จะสามารถเป็นไปได้

## รายการอ้างอิง

- เทพพนม โสภานเพิ่ม (2554). การหาแบบจำลองและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่โหลดเป็น  
อิเล็กทรอนิกส์กำลังขนานกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: 11-57.
- Areerak, K-N., Bozhko, S., Asher, G., Lillo, L.de., Watson, A., Wu, T., and Thomas, D.W.P.  
(2009). The Stability Analysis of AC-DC Systems including Actuator Dynamics for  
Aircraft Power Systems. **13<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and  
Applications (EPE 2009)**.
- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P. (2008). DQ-Transformation  
Approach for Modeling and Stability Analysis of AC-DC Power System with Controlled  
PWM Rectifier and Constant Power Loads. **13<sup>th</sup> International Power Electronics and  
Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008)**.
- Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P. (2008). Stability Analysis and  
Modeling of AC-DC System with Mixed Load Using DQ-Transformation Method. **IEEE  
International Symposium on Industrial Electronics (ISIE08)**. 19-24.
- Chaijarunudomrung, K., Areerak, K-N., and Areerak, K-L. (2010). Modeling and Stability  
Analysis of AC-DC Power System with Controlled Rectifier and Constant Power Loads.  
**WSEAS Transactions on Power Systems**. 31-41.
- Chanpittayagit, C., Areerak, K-N., Areerak, K-L. (2014). Modeling of AC-DC Power System  
Feeding a Controlled Buck-Boost Converter. **11<sup>th</sup> International Conference on  
Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information  
Technology (ECTI-CON)**.
- Didier, Marx., Pierre, Magne., Babak, Nahid-Mobarakeh., Serge, Pierfedrici., and Bernard, Davat.  
(2012). Large Signal Stability Analysis Tools in DC Power Systems With Constant  
Power Loads and Variable Power Loads – A Review. **IEEE Trans. on Power  
Electronics**. 27(4): 1773- 1786.

- Didier, Marx., Serge, Pierfedrici., Babak, Nahid-Mobarakeh., and Bernard, Davat. (2009). Contribution to Determination of Domain of Attraction in Power Systems:Application to Drives With Input Filter. **Industry Applications Society Annual Meeting (IAS 2009)**.
- Dimitri, Jeltsema., and Jecquelien, M.A. Scherpen. (2005). On Brayton and Moser's Missing Stability Theorem. **IEEE Trans. On Circuit and Systems**. 52(9): 550-552.
- Emadi, A., Fahimi, B., and Ehsani, M. (1999). On the Concept of Negative Impedance Instability in the More Electric Aircraft Power Systems with Constant Power Loads. **Soc. Automotive Eng. Joutnal**. 689-699.
- 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.
- Griffo, A., and Wang, J. (2012). Large Signal Stability Analysis of 'More Electric' Aircraft Power Systems with Constant Power Loads. **IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems**. 48(1): 477-489.
- Hassan K. Khalil. (1996). **Nonlinear System**. Unuted State of Amarica: Prentice-Hall.
- Jalla, M.M., Emadi, A., Williamson, G.A., and Fahimi, B. (2004). Modeling of multiconverter more electric ship power systems using the generalize state space averaging method. **30<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society**. 1: 508-513.
- Jean-Jacques E. Slotine., and Weiping, Li. (1991). **Applied Nonlinear Control**. Unuted State of Amarica: Prentice-Hall.
- Jusoh, AB. (2004). The instability effect of constant power loads. **Power and Energy Conference**. 689-699.
- Liqui, Han., Jiabin, Wang., and Howe, D. (2007). State-space average modeling of 6- and 12-pulse diode rectifier. **2007 European conference on Power Electronics and Application**. 1-10.
- Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D., and Ehsani, M. (1997). Analysis of Power Electronic Converters Using the Generalized State-Space Averaging Approach. **IEEE Trans. on Circuit and Systems**. 44: 767-770.

- Matousek, R., Svarc, I., Pivonka, P., Osamera., and Seda, M. (2009). Simple Methods for Stability Analysis of Nonlinear Control System. **Proceeding of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS).**
- Middlebrook, R.D. (1967). Input Filter Consideration in Design and Application of Switching Regulators. **IEEE Industry Application Society Annual Meeting.** 366-382.
- Mohan, N., Underland, T.M., and Robbins, W.P. (2003). Power Electronics: Converters, Applications, and Design. **John Wiley & Son.**
- Rivetta, C., Williamson, G.A., and Emadi, A. (2005). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Sea and Undersea Vehicles: Statement of the Problem and Comprehensive Large-Signal Solution. **Proc. IEEE Electric Ship Tech. Symposium.** 313-320.
- Weijing, Du., Junming, Zhang., Yang, Zhang., and Zhaoming, Qian. (2011). Large Signal Stability Analysis Based on Gyrator Model with Constant Power Load. **IEEE Power and Energy Society General Meeting.**

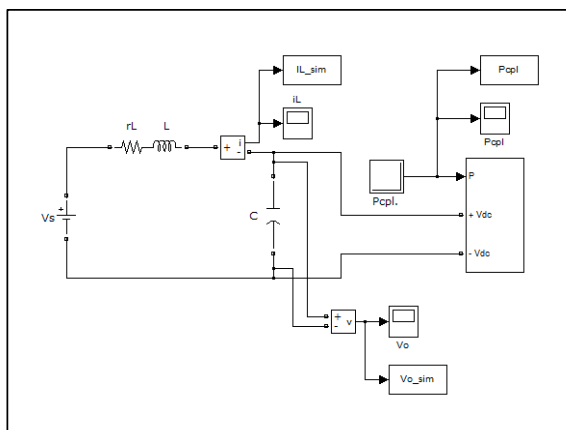




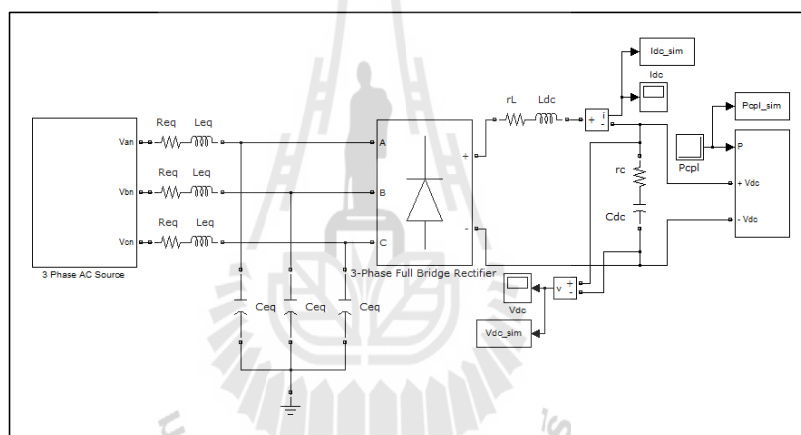


ภาคผนวก ก

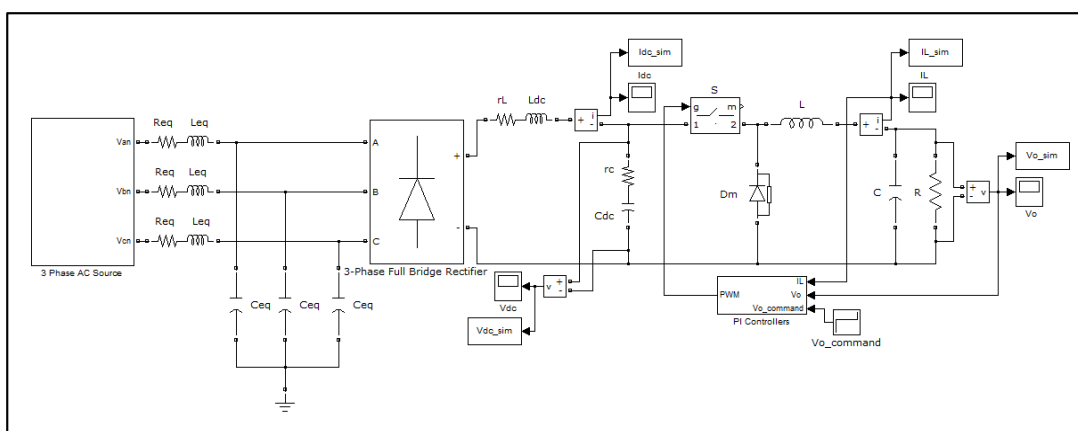
ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB



รูปที่ ก.1 วงจรไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ



รูปที่ ก.2 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ



รูปที่ ก.3 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม



ภาคผนวก ข

โปรแกรมการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจาก  
ฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ตันและมอเซอร์

```

*****
โปรแกรมการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่
คำนวณได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยเบรย์ทันและมอเซอร์
*****
% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบ
Vs=120;
rL=0.1;
L=50e-3;
C=500e-6;
Pcpl=10;
% คำนวณ Vomin จากเงื่อนไขของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของเบรย์ทันและมอเซอร์
Vomin=sqrt((L*Pcpl)/(C*rL));
% กำหนดขอบเขตของ IL สำหรับการหาค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ระบบยังคงมี
เสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ
IL=0:0.1:100;
% หาค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ
Px=(-1/2).*rL.*(IL.^2)+(Vs.*IL)+(Pcpl.*log(abs(Vomin)))-(IL.*Vomin); % ฟังก์ชันศักย์ผสม
Vx=((rL/L).*Px)+((1/(2*L)).*(((rL.*IL)-Vomin +Vs).^2))
+((1/(2*C)).*(((Pcpl./Vomin)-IL).^2)); % ฟังก์ชันเลียปูนอฟ
MaxVx=max(max(Vx));
% สร้างเส้นกราฟโครงร่าง เพื่อสร้างขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ
n=1;
m=1;
CheckBoundary=0;
for IL=-30:0.1:30
    for Vo=-300:1:300
        Px=(-1/2).*rL.*(IL.^2)+(Vs.*IL)+(Pcpl.*log(abs(Vo)))-(IL.*Vo);
        Vx=((rL/L).*Px)+((1/(2*L)).*(((rL.*IL)-Vo+Vs).^2))
+((1/(2*C)).*(((Pcpl./Vo)-IL).^2));
        if Vx==NaN

```

```

        Vx=10000000000;
    end
    if Vx<=MaxVx && Vx>0
        CheckBoundary=CheckBoundary+1;
        IL_RAS(n,m)=IL;
        Vo_RAS(n,m)=Vo;
        m=m+1;
    end
end
n=n+1;
m=1;
end
[IL,Vo]=meshgrid(IL_RAS,Vo_RAS);
Px=(-1/2).*rL.*(IL.^2)+(Vs.*IL)+(Pcpl.*log(abs(Vo)))-(IL.*Vo);
Vx=((rL/L).*Px)+((1/(2*L)).*(((rL.*IL)-Vo+Vs).^2))+((1/(2*C)).*(((Pcpl./Vo)IL).^2));
figure(1)
mesh(IL,Vo,Vx)
figure(2)
contour(IL,Vo,Vx,1)

```



ภาคผนวก ค

โปรแกรมการก่อสร้างเมตริกซ์เชิงเส้น  
สำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันเคอเนลและการประมาณขอบเขตของ  
การมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิน

```

*****
โปรแกรมการแก้สมการเมตริกซ์เชิงเส้นสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟและ
การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับด้วยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิ
และซูจิโน
*****

% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบ
f=50;
Req=0.1;
Leq=24e-6;
Ceq=2e-9;
rL=0.1;
Ldc=7.5e-3;
Cdc=1000e-6;
rc=0.5;
ru=(3*Leq*2*pi*f)/pi;
Vs=532.5532;
Pcpl=10000;
% คำนวณหาจุดปฏิบัติการของระบบ ณ จุดใดๆ ที่ไม่ได้อยู่ที่จุดกำเนิด
Vdceq=(Vs+(sqrt((Vs^2)-(4*1*(ru+rL)*Pcpleq))))/2;
Idceq=Pcpl/Vdceq;
% แก้สมการเมตริกซ์เชิงเส้นเพื่อคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ
CheckCondition=0;
x2min=0;
x2max=0;
while CheckCondition==0
    fx2min=1/(x2max+Vdceq);
    fx2max=1/(x2min+Vdceq);
    A1=[(-(ru+rL+rc)/Ldc) (-(1/Ldc)+((rc*Pcpl)/(Ldc*Vdceq))*fx2max));
        (1/Cdc) ((Pcpl/(Cdc*Vdceq))*fx2max)];

```

```

A2=[(-(ru+rL+rc)/Ldc) (-((1/Ldc)+((rc*Pcpl)/(Ldc*Vdceq))*fx2min));
    (1/Cdc) ((Pcpl/(Cdc*Vdceq))*fx2min)];

setlmis([]);
M=lmivar(1,[2 1]);
lmiterm([-1 1 1 M],1,1);    % M > 0
lmiterm([1 1 1 0],1);      % I
lmiterm([2 1 1 M],1,A1,'s'); % (A1')M + M(A1) < 0
lmiterm([3 1 1 M],1,A2,'s'); % (A2')M + M(A2) < 0

lmis=getlmis
[tmin,xfeas]=feasp(lmis);
M=dec2mat(lmis,xfeas,M);
M_Transpose=M';
if M==M_Transpose
    CheckTranspose=1;
else
    CheckTranspose=0;
end
if tmin<=0 && CheckTranspose==1
    MatrixM=M;
    x2_min=x2min;
    x2_max=x2max;
    CheckCondition=0;
    x2min=x2min-0.1;
    x2max=x2max+0.1;
else
    CheckCondition=1;
end
end
M=MatrixM;
x2min=x2_min;

```



```

% คำนวณหาขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ
a=M(1,1);
b=M(1,2);
c=M(2,1);
d=M(2,2);
x1min=(-b*x2min)/a;
Vxmin=(a*(x1min^2))+((b+c)*x1min*x2)+(d*(x2min^2));
% สร้างเส้นกราฟโครงร่าง เพื่อสร้างขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ
n=1;
m=1;
CheckBoundary=0;
for x1=-30:0.1:30
    for x1=-300:1:300
        Vx=(a*(x1^2))+((b+c)*x1*x2)+(d*(x2^2));
        if Vx<=Vxmin
            CheckBoundary=CheckBoundary+1;
            x1_RAS(n,m)=x1+Idceq;
            X2_RAS(n,m)= x2+Vdceq;
            m=m+1;
        end
    end
    n=n+1;
    m=1;
end
[Idc,Vdc]=meshgrid(x1_RAS,x2_RAS);
Vx=(a.*(Idc.^2))+((b+c).*Idc.*Vdc)+(d.*(Vdc.^2));
figure(1)
mesh(Idc,Vdc,Vx)
figure(2)
contour(Idc,Vdc,Vx,1)

```



ภาคผนวก ง

โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณค่าในสถานะคงตัว  
ด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและราฟสัน

```

*****
โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณค่าในสถานะคงตัวด้วยการคำนวณ
เชิงตัวเลขของนิวตันและราฟสัน
*****
% กำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบ
Vs=230;
f=50;
Req=0.1;
Leq=24e-6;
Ceq=2e-9;
rL=0.1;
Ldc=7.5e-3;
Cdc=1000e-6;
rc=0.5;
L=25e-3;
C=1250e-6;
R=5;
Kpv=0.2;
Kiv=32;
Kpi=0.0744;
Kii=29.7398;
ru=(3*Leq*2*pi*f)/pi;
Pcpl=15000;
Pload=Pcpl;
VoCommand=sqrt(Pload*R);
Ptotal=Pload;
Z=sqrt(Req^2+(2*pi*f*Leq)^2);
Gamma=atand((2*pi*f*Leq)/Req);
% กำหนดค่าตอบเริ่มต้นและค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้
Vbus(1)=230;

```

```

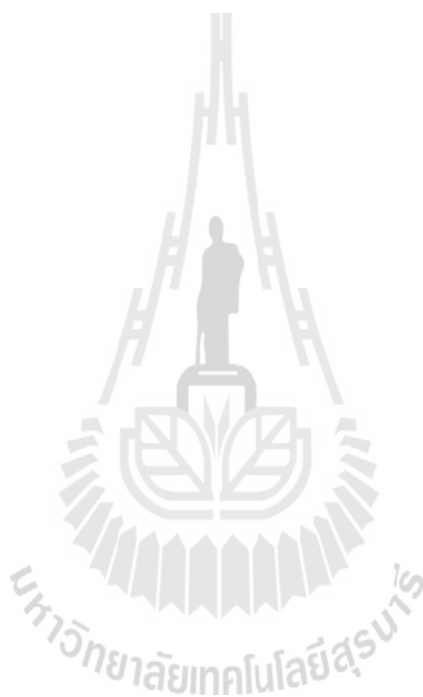
Lambda(1)=0;
ea_Vbus=100;
ea_Lambda=100;
es=1e-6;
k=1;
% คำนวณมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้วยการ
% คำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและกราฟสัน
while 1
    f1=(Vbus(k)*Vs*cosd(Gamma-Lambda(k)))/Z-(((Vbus(k)^2)*cosd(Gamma))/Z)-Ptotal/3;
    f2=(Vbus(k)*Vs*sind(Gamma-Lambda(k)))/Z-(((Vbus(k)^2)*sind(Gamma))/Z);
    f1_Vbus=(Vs*cosd(Gamma-Lambda(k)))/Z-(((2*Vbus(k))*cosd(Gamma))/Z);
    f1_Lambda=(Vbus(k)*Vs*sind(Gamma-Lambda(k)))/Z;
    f2_Vbus=(Vs*sind(Gamma-Lambda(k)))/Z-(((2*Vbus(k))*sind(Gamma))/Z);
    f2_Lambda=-((Vbus(k)*Vs*cosd(Gamma-Lambda(k)))/Z);
    Vbus(k+1)=Vbus(k)-(((f2_Lambda*f1)-(f1_Lambda*f2))/((f1_Vbus*f2_Lambda)
        -(f1_Lambda*f2_Vbus)));
    Lambda(k+1)=Lambda(k)-(((f1_Vbus*f2)-(f2_Vbus*f1))/((f1_Vbus*f2_Lambda)
        -(f1_Lambda*f2_Vbus)));
    Pload=(VoCommand^2)/R;
    Ploss=(ru+rL)*(Idc^2);
    Ptotal=Pload+Ploss;
    ea_Vbus=abs((Vbus(k+1)-Vbus(k))/Vbus(k+1))*100;
    ea_Lambda=abs((Lambda(k+1)-Lambda(k))/Lambda(k+1))*100;
    if ea_Vbus<=es&&ea_Lambda<=es
        Lambda_degree=Lambda(k);
        Lambda_radius=Lambda(k)*(pi/180);
        Vbusd=Vbus(k);
        Break
    end
    k=k+1;

```

```

end
% คำนวณหาค่าในสภาวะคงตัวค่าอื่น ๆ
Idc=(VsVbus*cosd(Lambda)+i*Vbus*sind(Lambda))/(Z*cosd(Gamma)+i*(Z*sind(Gamma)));
Idc=(abs(Idc)*sqrt(3))/(sqrt(3/2)*2*sqrt(3)/pi);
Edc1=(3*sqrt(3)*sqrt(2)*Vbus(k+1))/pi;
Vdc=Edc1-(ru+rL)*Idc;
IL=Vo/R;
Vo=VoCommand;
Xv=IL/Kiv;
Xi=Vo/(Kii*Vdc);

```





ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่  
ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

อภิชัย สุยะพันธ์, กองพัน อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์. การวิเคราะห์เสถียรภาพไม่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดัชนีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37, ขอนแก่น, 19-21 พฤศจิกายน 2557, Vol. 2, หน้า 797-800.

อภิชัย สุยะพันธ์, กองพัน อารีรักษ์, กองพล อารีรักษ์. การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับด้วยการค้นหาแบบตามูเชิงปรับตัว. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, อุดรธานี, 18-20 พฤศจิกายน 2558, Vol. 2, หน้า 619-622.



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## การวิเคราะห์เสถียรภาพไม่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว Nonlinear Stability Analysis of DC Power Systems having Constant Power Loads

อภิสิทธิ์ สุยะพันธ์ กองพันธ์ อารีรักษ์\* และกองพล อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี \*email : kongpan@sut.ac.th

### บทคัดย่อ

โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเมื่อนำมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรอง จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าวเป็นสิ่งที่ยากยิ่งมาก ดังนั้นในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ รวมถึงเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธี โดยจะนำเสนอสามวิธีที่นิยมใช้กัน ได้แก่ การทำให้เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์ระนาบเฟส และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ โดยที่การทำให้เป็นเชิงเส้นเป็นวิธีการที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเชิงเส้นผ่านแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก ในขณะที่การวิเคราะห์ระนาบเฟสและวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟเป็นวิธีการที่ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยอาศัยแบบจำลองสัญญาณขนาดใหญ่ การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพที่นำเสนอในบทความนี้ จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

**คำสำคัญ:** การวิเคราะห์เสถียรภาพไม่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์ระนาบเฟส วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

### Abstract

Constant power loads when connected to the system via a DC-link filter can directly degrade the system stability. Therefore, the stability analysis is very important for such system. This paper presents three different approaches for the stability analysis. These are linearization technique, phase-plane analysis, and Lyapunov's direct method. The linearization method is based on the linear control theory using the small-signal model, while the phase-plane and Lyapunov's direct methods are based on the nonlinear control theory via the large signal model. The intensive time-domain simulation using MATLAB is used to verify the instability results predicted from all three methods. The results show that the proposed method can correctly predict the unstable point due to the constant power load.

**Keywords:** Nonlinear stability analysis, phase-plane analysis, Lyapunov's direct method, constant power loads

### 1. บทนำ

ปัจจุบัน วงจรแปลงกึ่งกำลัง เช่น วงจรแปลงหม้ออินเวอร์ต ดิจิทัลเป็น ดิจิทัล เป็นเอช และเอชเป็นเอช ได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง การดูแลบำรุงรักษาค่า และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย แต่วงจรแปลงกึ่งกำลังเมื่อมีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเหมือนโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power loads) ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็น ค่าตัวต้านทานติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม และอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบได้ [1] ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นแบบกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงเป็นสิ่งที่ยากยิ่งมาก เนื่องจากถ้าระบบไฟฟ้ากำลังขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อความเสียหายต่อระบบได้ จากอดีตจนถึงปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายได้นำเสนอวิธีการในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ทำให้สามารถคาดการณ์การขาดเสถียรภาพของระบบได้ ในบทความนี้จะพิจารณาวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ นอกจากจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบดังที่กล่าวไปในข้างต้นแล้ว ยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearities) เกิดขึ้น กล่าวคือเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear systems) ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอวิธีการในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบตามวิธี คือ วิธีหนึ่ง การทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) เป็นวิธีการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในระบบให้มีความเป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์ จากนั้นใช้ทฤษฎีค่าเฉพาะ (eigenvalue theorem) วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ [2] วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดแต่มีข้อจำกัดคือ ใช้ได้กับระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นไม่สูงมากนักและการวิเคราะห์เสถียรภาพมีความถูกต้องเฉพาะในช่วงการทำงานที่แคบ (small range operating) หรือเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal) ในขณะที่อีกสองวิธีที่เหลือเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง ดังนั้นจึงสามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพได้ในช่วงการทำงานที่กว้าง (large range operating) หรือเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณใหญ่ (large-signal) ซึ่งวิธีที่สอง คือ การวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase-plane analysis) [2] เป็นวิธีการทางกราฟิกซึ่งจะสร้างการโคจรของค่าตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ (state variables) สองตัว เป็นวิธีการที่ง่าย มีการคำนวณไม่ซับซ้อนและได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ แต่วิธีการนี้เหมาะสำหรับระบบที่มีอันดับไม่เกินสอง

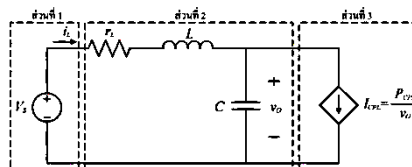


ถ้าอันดับของระบบเกินสองอาจทำการแปลงรูปแบบให้เป็นกลุ่มของระบบอันดับสองได้ แต่จะเกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการสร้างการโคจรของค่าตอบสนองการอนุพันธ์ของระบบและการตีความผล ซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้ วิธีที่สาม คือ วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method) [2] เป็นวิธีการที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมนับเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพราะนอกจากจะให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำแล้วยังสามารถที่จะทำการประมาณขอบเขตของกรณีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (region of asymptotic stability or domain of attraction) ได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ต้องคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณา จากนั้นนำฟังก์ชันที่คำนวณได้ไปตรวจสอบเสถียรภาพตามทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่มีวิธีการทั่วไปสำหรับการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ และในทางปฏิบัติการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟมีความยุ่งยากซับซ้อน แต่ก็มีนักวิจัยได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟไว้อย่างมากมาย ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดในการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยในบทความนี้ได้ใช้วิธีการที่มีเสนอโดยเบรย์ทอนและมอเซอร์ (Brayton-Moser) [3] ในการคำนวณหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ เนื่องจากวิธีการนี้เป็นวิธีการที่นำเสนอการสร้างฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ที่อยู่ภายใต้กฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's laws) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับระบบที่พิจารณา การตรวจสอบความถูกต้องจะอาศัยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่นำเสนอในบทความนี้กับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถคาดเดาจุดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และนอกจากนี้ยังทำให้ทราบถึงข้อจำกัดของแต่ละวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตได้

บทความนี้ประกอบไปด้วยสี่ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นบทนำ ส่วนที่สองเป็นการอธิบายระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่สามกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพและการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์และส่วนที่สี่เป็นการสรุปเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยในอนาคต

2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

บทความนี้พิจารณา ระบบไฟฟ้ากำลังดีซีอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยสามส่วนคือ ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอิสระ  $V_s$  ซึ่งใช้แทนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแส และสมมติให้มีค่าคงที่ ส่วนที่ 2 วงจรกรอง (LC filter) โดยที่  $L$  คือความเหนี่ยวนำ  $C$  คือความจุไฟฟ้าและ  $r_L$  คือความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ของวงจรถอง



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ซึ่งความต้านทาน ความเหนี่ยวนำและความจุไฟฟ้าจะสมมติให้มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นและมีค่าคงที่ และส่วนที่ 3 แหล่งจ่ายกระแสไม่อิสระแบบอุดมคติซึ่งใช้แทนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่ต่อขนานกับระบบผ่านวงจรถอง  $i_L$  คือ กระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำ และ  $v_o$  คือแรงดันที่ตกคร่อมความจุไฟฟ้าของวงจรถอง จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ สมการพลวัต (dynamic equations) ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 คือ

$$\begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} &= V_s - r_L i_L - v_o \\ C \frac{dv_o}{dt} &= i_L - \frac{P_{oL}}{v_o} \end{aligned} \quad (1)$$

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาคือสมการที่ (1) เป็นสำคัญ

3. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

กำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทความนี้แสดงดังตารางที่ 1 โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นเพียงค่าพารามิเตอร์ตัวอย่าง ซึ่งขึ้นอยู่กับระบบที่สนใจ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า	หมายเหตุ
$V_s$	120 V	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
$r_L$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
$L$	50 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรถอง
$C$	500 $\mu$ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรถอง
$i_L(0)$	0 A	ค่าเริ่มต้นของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำ
$v_o(0)$	120 V	ค่าเริ่มต้นของแรงดันที่ตกคร่อมความจุไฟฟ้า

3.1 การทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization)

จากสมการที่ (1) สังเกตได้ว่ามันเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นปรากฏอยู่ในสมการ  $v_o$  ดังนั้นการทำให้เป็นเชิงเส้นจะอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ได้ดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} \delta x &= A(x_o, u_o)\delta x + B(x_o, u_o)\delta u \\ \delta y &= C(x_o, u_o)\delta x + D(x_o, u_o)\delta u \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ A B C และ D คือเมทริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงาน (operating points or equilibrium points) ของระบบ โดยที่จุดปฏิบัติงานของระบบคำนวณได้จาก  $\dot{x} = \dot{v}_o = 0$  ดังนั้นจุดปฏิบัติงานของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 เขียนได้ดังสมการที่ (3)

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

$$(i_L, v_o) = \left( \frac{2P_{CPL}}{V_S + \sqrt{V_S^2 - 4r_L P_{CPL}}}, \frac{V_S + \sqrt{V_S^2 - 4r_L P_{CPL}}}{2} \right) \quad (3)$$

การวิเคราะห์เสถียรภาพตามวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นจะพิจารณาค่าเฉพาะของเมทริกซ์จาโคเบียน A โดยเมทริกซ์จาโคเบียน A ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 คำนวณได้ดังสมการที่ (4) ดังนี้

$$A(x_o, u_o) = \begin{bmatrix} \frac{\partial i_L}{\partial i_L} & \frac{\partial i_L}{\partial v_o} \\ \frac{\partial v_o}{\partial i_L} & \frac{\partial v_o}{\partial v_o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{P_{CPL}}{Cv_o^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ค่าเฉพาะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

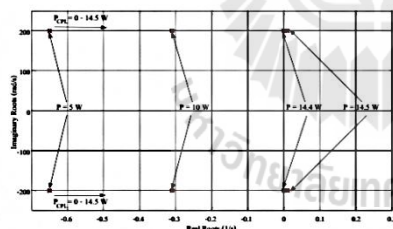
$$\det [\lambda I - A] = 0 \quad (5)$$

ดังนั้น ระบบจะมีเสถียรภาพ ถ้าส่วนจริงของค่าเฉพาะมีค่าน้อยกว่าศูนย์ เงื่อนไขดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (6)

$$\text{real } \lambda_i < 0 \quad (6)$$

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

ค่าเฉพาะที่คำนวณได้เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 – 14.5 W แสดงดังรูปที่ 2 จะสังเกตได้ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 14.4 W และในขณะที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 14.4 W ความถี่ของสมการที่ (6) (จะถือว่าระบบขาดเสถียรภาพ แต่วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น [2] กล่าวไว้ว่า ถ้าค่าเฉพาะจะอยู่บนแกนจินตภาพจะยังสรุปไม่ได้ว่าระบบมีเสถียรภาพหรือขาดเสถียรภาพ ซึ่งความไม่ชัดเจนดังกล่าวถือเป็นข้อจำกัดของวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น

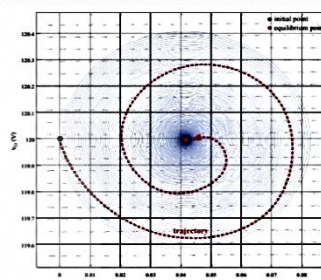


รูปที่ 2 ค่าเฉพาะที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

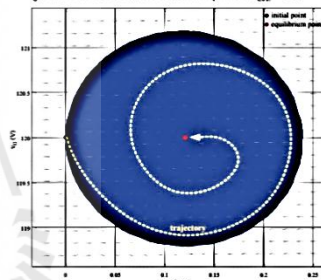
### 3.2 การวิเคราะห์ระนาบเฟส (Phase-Plane Analysis)

จากสมการที่ (1) สามารถสร้างการโคจรของค่าคอมสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 5 W 14.4 W และ 14.5 W ดังแสดงในรูปที่ 3 ถึงรูปที่ 5 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 การโคจรของค่าคอมสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มจากจุดเริ่มต้นและเข้าหาจุดปฏิบัติงานของระบบเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพ ในขณะที่รูปที่ 5 นั้นการโคจรของค่าคอมสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มจากจุดเริ่มต้นและออกห่างจากจุดปฏิบัติงานของระบบมากยิ่งขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าระบบ

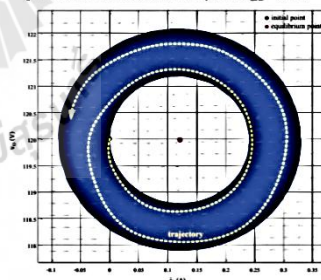
ขาดเสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 จะมีเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 14.4 W และจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 14.4 W



รูปที่ 3 การโคจรของค่าคอมสมการอนุพันธ์ที่ P<sub>CPL</sub> = 5 W



รูปที่ 4 การโคจรของค่าคอมสมการอนุพันธ์ที่ P<sub>CPL</sub> = 14.4 W



รูปที่ 5 การโคจรของค่าคอมสมการอนุพันธ์ที่ P<sub>CPL</sub> = 14.5 W

### 3.3 วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method)

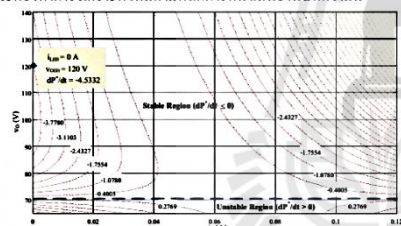
จากขั้นตอนที่นำเสนอรายละเอียดไว้ใน [3] จะได้ฟังก์ชันเบรย์ตันมอเซอร์ (Brayton-Moser's Mixed Potential function) ที่สัมพันธ์กับสมการที่ (1) ดังสมการที่ (7) และฟังก์ชันเลียปูนอฟสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 แสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$P(i_L, v_o) = -\frac{1}{2}r_L i_L^2 + \int_0^{v_o} \frac{P_{CPL}}{v_o} dv_o + (V_S - v_o)i_L \quad (7)$$

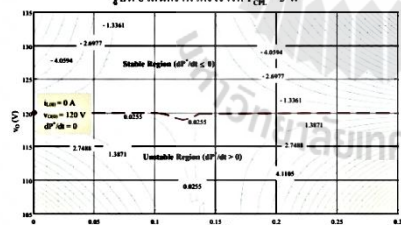
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

$$P^*(i_L, v_o) = \frac{r_L}{L} P(i_L, v_o) + \frac{1}{2L} (V_s - r_L i_L - v_o)^2 + \frac{1}{2C} \left( \frac{P_{CPL}}{v_o} - i_L \right)^2 \quad (8)$$

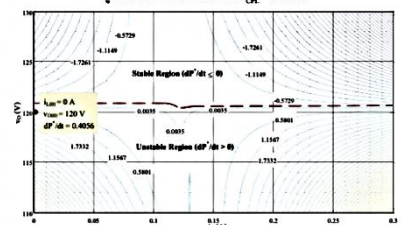
เห็นกราฟโครงร่าง (contour plot) ของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเทียบกับเวลา ( $dP^*/dt$ ) เมื่อระบบมีค่าเริ่มต้น  $i_L(0) = 0$  A  $v_o(0) = 120$  V และโหลดกำลังไฟที่คงตัวมีค่าเท่ากับ 5 W 14.4 W และ 14.5 W แสดงในรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 8 ตามลำดับ ตามทฤษฎีเซตอินแวเรียนต์ (Invariant Set Theorems) ถ้า  $dP^*/dt \leq 0$  ระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มต้นเข้าสู่เซตอินแวเรียนต์ (invariant set) ซึ่งในที่นี้คือจุดปฏิบัติงานของระบบ จึงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ และเมื่อพิจารณาเส้นกราฟโครงร่างที่  $P_{CPL} = 5$  W และ 14.4 W พบว่า  $dP^*/dt \leq 0$  จึงสรุปได้ว่าที่สภาวะดังกล่าวระบบมีเสถียรภาพ ในขณะที่  $P_{CPL} = 14.5$  W เส้นกราฟโครงร่างปรากฏ  $dP^*/dt > 0$  ระบบจึงขาดเสถียรภาพที่จุดการทำงานนี้ แต่อย่างไรก็ตามข้อสรุปดังกล่าวจะเป็นจริงสำหรับค่าเริ่มต้น  $i_L(0) = 0$  A และ  $v_o(0) = 120$  V เท่านั้น ถ้าค่าเริ่มต้นของระบบมีการเปลี่ยนแปลงจะต้องทำการวิเคราะห์ใหม่ตามหลักการที่นำเสนอในบทความนี้



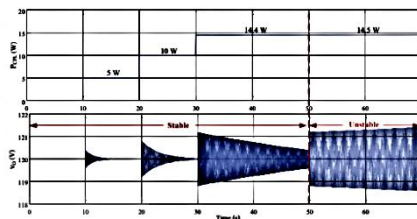
รูปที่ 6 เส้นกราฟโครงร่างที่  $P_{CPL} = 5$  W



รูปที่ 7 เส้นกราฟโครงร่างที่  $P_{CPL} = 14.4$  W



รูปที่ 8 เส้นกราฟโครงร่างที่  $P_{CPL} = 14.5$  W



รูปที่ 9 การขึ้นอันดับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์  
รูปที่ 9 เป็นการขึ้นอันดับการขาดเสถียรภาพของระบบด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB จากรูปจะสังเกตได้ว่าเมื่อโหลดกำลังไฟที่คงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 14.5 W ระบบจะขาดเสถียรภาพ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้ง 3 วิธีที่ได้นำเสนอในบทความนี้พบว่ามีความสอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ที่นำเสนอในบทความนี้สามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ยังคงสามารถใช้วิธีที่ได้นำเสนอในบทความนี้วิเคราะห์เสถียรภาพได้ แต่การที่พารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้จุดขาดเสถียรภาพของระบบเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

#### 4. สรุป

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทั้ง 3 วิธี ที่เสนอในบทความนี้สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น เมื่อค่าจะจ่ออยู่บนแกนจินตภาพจะไม่สามารถบอกได้ว่าระบบนั้นมีเสถียรภาพหรือไม่ วิธีการวิเคราะห์หระนาบเฟส เมื่อระบบที่พิจารณามีตัวแปรสถานะมากกว่าสองตัวแปร จะไม่สามารถสร้างการโครงของค่าคอบสมการอนุพันธ์ของระบบได้ ในขณะที่วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ นอกจากจะสามารถใช้ได้กับทุกระบบแล้ว ยังสามารถที่จะทำการประมาณขอบเขตของกรณีเสถียรภาพได้อีกด้วย เพียงแต่ต้องเลือกวิธีการที่เหมาะสมในการสร้างฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณา ดังนั้นวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ สามารถใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีซับซ้อนสำหรับงานวิจัยในอนาคตได้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Emadi, B. Fahimi, and M. Ehsani, "On the Concept of Negative Impedance Instability in the More Electric Aircraft Power Systems with Constant Power Loads", *Soc. Automotive Eng. Journal*, 1999
- [2] J.J. Slotine and W. Li, "Applied nonlinear control", London, Prentice Hall, 1991
- [3] A. Griffo, J. Wang, "Large Signal Stability Analysis of 'More Electric' Aircraft Power Systems with Constant Power Loads", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 48, n. 1, January 2012

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON-38) 18 - 20 พฤศจิกายน 2558 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

## การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับด้วยการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

### Estimating Region of Asymptotic Stability Using an Adaptive Tabu Search

อภิชัย สุยะพันธ์ กองพัน อารีรักษ์ และ กองพล อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี email : kongpan@sut.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้ากำลังที่ซับซ้อนอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ผลการประมาณที่ได้จากการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวจะนำมาเปรียบเทียบกับผลการประมาณที่ได้จากวิธีการโดยตรงที่อาศัยทฤษฎีเสถียรภาพของเบรย์ตันและมอเซอร์ การตรวจสอบความถูกต้องของขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ได้จากวิธีที่นำเสนอในบทความนี้ จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่าการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวสามารถประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้อย่างถูกต้อง

**คำสำคัญ:** ขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

#### Abstract

This paper presents the application of adaptive tabu search to estimate a region of asymptotic stability for simple DC power systems with an ideal constant power load. The resulting estimated region from the proposed technique is compared with those from the direct method based on the Brayton-Moser stability theory. The reported regions of asymptotic stability are validated by the simulation using MATLAB. The results show that the adaptive tabu search algorithm can correctly estimate the region of asymptotic stability.

**Keywords:** region of asymptotic stability, Adaptive Tabu Search, constant power loads

#### 1. บทนำ

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method) เป็นวิธีการที่มีความสำคัญและได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพราะนอกจากจะให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถที่จะทำการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (region of asymptotic stability or domain of attraction : RAS) ได้อีกด้วย ซึ่งขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ คือ ขอบเขตที่รับประจักษ์

ว่าไม่ว่าระบบจะเริ่มขึ้นจากจุดเริ่มต้นใด ๆ ที่อยู่ภายในขอบเขตนี้ หรือระบบอาจจะถูกรบกวนแต่ยังคงอยู่ภายในขอบเขตนี้ ทั่วทั้งทุกระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มต้นดังกล่าวจนกระทั่งเข้าสู่จุดสมดุล (operating points or equilibrium points) ของระบบอีกครั้ง ดังนั้นจึงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ [1 - 2] วิธีการโดยตรงสำหรับการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ จะอาศัยการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเสถียรภาพที่นำเสนอโดยเบรย์ตันและมอเซอร์ (Brayton-Moser) [3] ในการสร้างเงื่อนไขให้กับฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณา จากนั้นใช้การคำนวณเชิงตัวเลข (numerical computation) เพื่อหาค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันเลียปูนอฟ และสร้างเส้นกราฟโคจรร่วม (contour plot) ของฟังก์ชันเลียปูนอฟที่มากที่สุดที่คำนวณได้ เพื่อสร้างขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ซึ่งวิธีการโดยตรงนี้ค่อนข้างมีความยุ่งยากและซับซ้อน อีกทั้งเมื่อระบบที่พิจารณามีความซับซ้อนมากขึ้น มันก็จะมีจำนวนตัวแปรสถานะของระบบเพิ่มขึ้น จะทำให้การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น จากอดีตจนถึงปัจจุบันมีงานวิจัยเพียงบางส่วนได้นำเสนอวิธีการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับด้วยวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ เช่น การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับด้วยจินตคณิตกอริทึม [4] เป็นต้น แต่วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ในปัจจุบันมีหลากหลายวิธี หนึ่งในนั้นคือ การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search : ATS) ซึ่งยังไม่ได้มีการนำเสนอการประยุกต์ใช้สำหรับการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ง่ายอย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ โดยการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวเป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาขึ้นจากอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่ (Tabu Search : TS) โดย กองพัน อารีรักษ์ และ สราวุฒิ สุจิตจร [5] เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการค้นหาค่าตอบที่ดีที่สุดขึ้น โดยการเพิ่มสองกลไกเข้าไปในอัลกอริทึมสำหรับกลไกแรกคือ การเดินย้อนรอย (back-tracking) และกลไกที่สองคือ การปรับรัศมีในการค้นหาค่าตอบ (adaptive radius) การตรวจสอบความถูกต้องของขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว จะอาศัยการเปรียบเทียบกับผลกับขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ได้

จากการประมาณด้วยวิธีการ ไลอตรง และตรวจสอบความถูกต้องของขอบเขตของกรณีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ได้จากวิธีการประมาณทั้งสองวิธีที่นำเสนอในบทความนี้ โดยอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการ ไลอตรงของเลียปูนอฟ และตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่าการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว สามารถประมาณขอบเขตของกรณีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้อย่างถูกต้อง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการประมาณขอบเขตของกรณีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตได้

บทความนี้ประกอบไปด้วยห้าส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นบทนำ ส่วนที่สองเป็นการอธิบายสมการทางคณิตศาสตร์ของขอบเขตของกรณีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ส่วนที่สามเป็นการอธิบายระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่สี่กล่าวถึงการประมาณขอบเขตของกรณีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับและการตรวจสอบความถูกต้องของการประมาณ และส่วนที่ห้าเป็นการสรุปเพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยในอนาคต

**2. สมการทางคณิตศาสตร์ของขอบเขตของกรณีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ**

จากทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟและทฤษฎีเซตอินยง (Invariant Set Theorems) ขอบเขตของกรณีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ สามารถได้ดังสมการที่ (1)

$$RAS = \{ x : P^*(x) \leq l, \frac{dP^*(x)}{dt} < 0 \} \quad (1)$$

โดยที่  $x$  คือ ตัวแปรสถานะของระบบที่พิจารณา  $P^*(x)$  คือ ฟังก์ชันเลียปูนอฟของระบบที่พิจารณา

จากสมการที่ (1) จะพบว่า การประมาณขอบเขตของกรณีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ เป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด นั่นคือ การหาค่า  $l$  ที่มากที่สุด ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพ จึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ได้ดังสมการที่ (2)

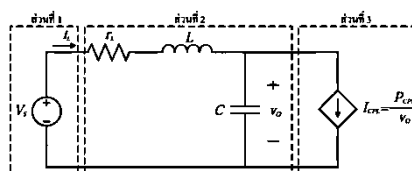
$$\begin{aligned} &\text{maximize } l \\ &\text{subject to } \frac{dP^*(x)}{dt} < 0 \text{ when } P^*(x) \leq l \end{aligned} \quad (2)$$

จากปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ดังสมการที่ (2) สามารถเขียนใหม่เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลข ได้ดังสมการที่ (3)

$$\begin{aligned} &\text{maximize } P^*(x) \\ &\text{subject to } \frac{dP^*(x)}{dt} < 0 \end{aligned} \quad (3)$$

**3. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา**

บทความนี้พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังคืออย่างง่ายที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยสามส่วนคือ ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอิสระ  $V_s$  ซึ่งใช้แทน



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแส และสมมติให้มีค่าคงที่ ส่วนที่ 2 วงจรกรอง โดยที่  $L$  คือความเหนี่ยวนำ  $C$  คือความจุไฟฟ้าและ  $r_L$  คือความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ของวงจรกรอง ซึ่งความต้านทานความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า จะสมมติให้มีคุณสมบัติความถี่สูงซึ่งใช้แทน โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่ต่อจนกับระบบผ่านวงจรกรอง โดยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติเป็นพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลัง เช่น วงจรแปลงผันเอชเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอช และเอชเป็นเอช เมื่อมีการควบคุม ซึ่งโหลดในลักษณะนี้จะนอกจากจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบแล้ว ยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้น กล่าวคือเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น  $I_L$  คือ กระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำ และ  $v_o$  คือแรงดันที่ตกคร่อมความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ สมการพลวัตของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 คือ

$$\begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} &= V_s - r_L i_L - v_o \\ C \frac{dv_o}{dt} &= i_L - \frac{P_{CPL}}{v_o} \end{aligned} \quad (4)$$

จากขั้นตอนที่นำเสนอรายละเอียดไว้ใน [3] จะได้ฟังก์ชันเบรย์ทันโมเซอร์ที่สัมพันธ์กับสมการที่ (1) ดังสมการที่ (5) และฟังก์ชันเลียปูนอฟสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 แสดงได้ดังสมการที่ (6)

$$P(i_L, v_o) = -\frac{1}{2} r_L i_L^2 + \int_0^{v_o} \frac{P_{CPL}}{v_o} dv_o + (V_s - v_o) i_L \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P^*(i_L, v_o) &= \frac{r_L}{L} P(i_L, v_o) + \frac{1}{2C} \left( \frac{P_{CPL}}{v_o} - i_L \right)^2 \\ &\quad + \frac{1}{2L} (V_s - r_L i_L - v_o)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

**4. การประมาณขอบเขตของกรณีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา**

กำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 1 สำหรับการประมาณขอบเขตของกรณีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับในบทความนี้ แสดงดังตารางที่ 1 โดยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นเพียงค่าพารามิเตอร์ตัวอย่าง ซึ่งขึ้นอยู่กับระบบที่สนใจ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON-38) 18 - 20 พฤศจิกายน 2558 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_s$	120 V	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
$r_L$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ
$L$	50 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$C$	500 $\mu$ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$P_{CPL}$	0-15 W	โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ
$i_L(0)$	0 A	ค่าเริ่มต้นของกระแสที่ไหลผ่านความเหนี่ยวนำ
$v_o(0)$	120 V	ค่าเริ่มต้นของแรงดันที่ตกคร่อมความจุไฟฟ้า

4.1 การประมาณด้วยวิธีการโดยตรง

จากทฤษฎีเสถียรภาพของเบรย์ทันและมอเซอร์สามารถสร้างเงื่อนไขให้กับฟังก์ชันเลียปูนอฟ ในสมการที่ (5) และสมการที่ (6) ได้ดังสมการที่ (7)

$$v_o > v_{o,min} = \sqrt{\frac{L \cdot P_{CPL}}{C \cdot r_L}} \quad (7)$$

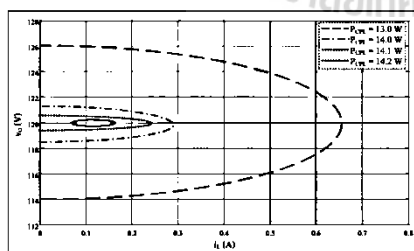
ดังนั้นจากสมการที่ (3) สามารถเขียนใหม่ได้ ดังสมการที่ (8)

$$\begin{aligned} & \text{maximize } P^*(i_L, v_{o,min}) \\ & \text{subject to } \frac{dP^*(i_L, v_{o,min})}{dt} < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) ใช้การคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อหาค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันเลียปูนอฟ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 - 14.2 W ได้ดังตารางที่ 2 จากนั้นนำค่าที่คำนวณได้ไปสร้างเส้นกราฟโครงร่างของฟังก์ชันเลียปูนอฟ จะได้ขอบเขตของกรณีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 - 14.2 W แสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันเลียปูนอฟจากการประมาณด้วยวิธีการโดยตรง

$P_{CPL}$ (W)	10	13	14	14.1	14.2
$v_{o,min}$ (V)	100.00	114.02	118.32	118.74	119.17
$P^*(i_L, v_{o,min})$	4092.10	481.05	161.83	150.50	142.76

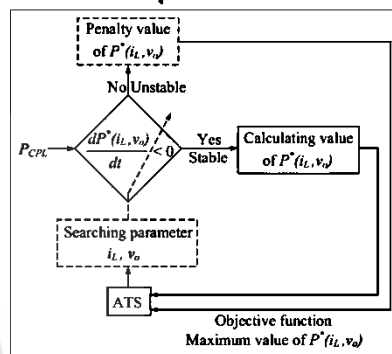


รูปที่ 2 RAS ที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการโดยตรง

4.2 การประมาณด้วยการค้นหาแบบควาเชิงปรับตัว

จากปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สมการที่ (3) สามารถประยุกต์ใช้

การค้นหาแบบควาเชิงปรับตัว เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 ได้ดังแผนภาพบล็อกโตะแกรมที่แสดงดังรูปที่ 3

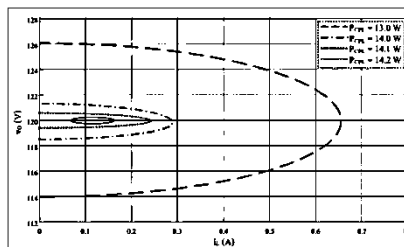


รูปที่ 3 บล็อกโตะแกรมการค้นหาแบบควาเชิงปรับตัว

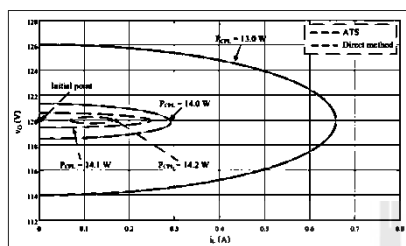
จากรูปที่ 3 อัลกอริทึมการค้นหาแบบควาเชิงปรับตัว จะดำเนินการค้นหา  $i_L$  และ  $v_o$  จนกระทั่งได้ค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันเลียปูนอฟ ที่ระบบยังคงมีเสถียรภาพ ซึ่งผลการค้นหาค่าตอบ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 - 14.2 W แสดงได้ดังตารางที่ 3 โดยค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่เหมาะสมสำหรับการค้นหาค่าตอบของระบบที่พิจารณาเป็นดังนี้ คือ จำนวนค่าตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 ตัว จำนวนค่าตอบรอบข้างเท่ากับ 40 ตัว รัศมีการค้นหาค่าตอบเท่ากับ 50 และตัวปรับคูณสเกลริทึมเท่ากับ 1.5 จากนั้นนำค่าที่ได้จากการค้นหาไปสร้างเส้นกราฟโครงร่างของฟังก์ชันเลียปูนอฟ จะได้ขอบเขตของกรณีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 - 14.2 W แสดงดังรูปที่ 4

ตารางที่ 3 ค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันเลียปูนอฟจากการค้นหาแบบควาเชิงปรับตัว

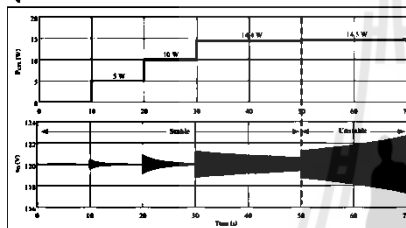
$P_{CPL}$ (W)	10	13	14	14.1	14.2
$i_L$ (A)	0.0981	0.1131	0.1185	0.1186	0.1197
$v_o$ (V)	100.000	114.017	118.322	118.743	119.164
$P^*(i_L, v_o)$	4092.100	481.046	161.826	150.500	142.760



รูปที่ 4 RAS ที่ได้จากการประยุกต์ใช้การค้นหาแบบควาเชิงปรับตัว



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบ RAS ที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการทั้งสองวิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 6 การอินทิเกรตการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

รูปที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบผลการประมาณที่ได้จากการค้นหาแบบคาบเชิงปรับตัวกับผลการประมาณที่ได้จากวิธีการโดยตรง จากรูปจะสังเกตเห็นว่า ผลการประมาณขอบเขตที่ได้จากวิธีการทั้งสองวิธีที่ได้นำเสนอในบทความนี้มีความสอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถประยุกต์ใช้การค้นหาแบบคาบเชิงปรับตัว เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้ การตรวจสอบความถูกต้องของขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่ได้จากการประมาณจะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ จากทฤษฎีเจคอบินยง ถ้าระบบมีค่าเริ่มต้น (initial point) ที่อยู่ในขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มต้นดังกล่าว จนกระทั่งเข้าสู่จุดสมดุลของระบบ ดังนั้นจึงทำให้ระบบมีเสถียรภาพ และเมื่อพิจารณาขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับในรูปที่ 5 โดยกำหนดให้ระบบมีค่าเริ่มต้น  $i_s(0) = 0$  A และ  $v_o(0) = 120$  V จะพบว่าเมื่อ  $P_{CFL} = 13$  W, 14 W และ 14.1 W จุดเริ่มต้นของระบบ อยู่ภายในขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ จึงสรุปได้ว่าที่สภาวะดังกล่าวระบบมีเสถียรภาพ ในขณะที่  $P_{CFL} = 14.2$  W จุดเริ่มต้นของระบบ อยู่ภายนอกขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ดังนั้นระบบจึงขาดเสถียรภาพที่จุดการทำงานนี้ แต่อย่างไรก็ตามข้อสรุปดังกล่าวจะเป็นจริงสำหรับค่าเริ่มต้น  $i_s(0) = 0$  A และ  $v_o(0) = 120$  V เท่านั้น ถ้าค่าเริ่มต้นของระบบมีการเปลี่ยนแปลงจะต้องทำการวิเคราะห์เสถียรภาพใหม่ตามทฤษฎีเจคอบินยง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ดังแสดง

ในรูปที่ 6 จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนของจุดขาดเสถียรภาพอยู่เล็กน้อย โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อ  $P_{CFL} = 14.2$  W ในขณะที่ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อ  $P_{CFL} = 14.5$  W ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากความผิดพลาดของการประมาณด้วยวิธีการ โดยตรงหรือความผิดพลาดของอัลกอริทึมการค้นหาแบบคาบเชิงปรับตัว แต่เกิดจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้จากวิธีการที่นำเสนอ โดยบริษัทและมอเซอร์ที่มีขอบเขตความปลอดภัย (safety margin) [3] ดังนั้นถ้าต้องการให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพมีความใกล้เคียงกับผลการจำลองสถานการณ์มากยิ่งขึ้น ต้องทำการพิสูจน์หาฟังก์ชันเลียปูนอฟใหม่ โดยไม่พึ่งทฤษฎีของเลียปูนอฟและมอเซอร์ จากนั้นการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับสามารถดำเนินการโดยอาศัยแนวทางที่ได้นำเสนอไว้ในบทความนี้ได้เช่นเดียวกัน โดยข้อได้เปรียบของวิธีการค้นหาแบบคาบเชิงปรับตัวเมื่อเทียบกับวิธีการ โดยตรง คือ เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

5. สรุป

การประยุกต์ใช้การค้นหาแบบคาบเชิงปรับตัว เพื่อประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับที่นำเสนอในบทความนี้ สามารถประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคต เมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณา มีความซับซ้อนหรือมีตัวแปรสถานะของระบบเป็นจำนวนมาก จึงทำให้เกิดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการประมาณด้วยวิธีการโดยตรง การประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับด้วยการค้นหาแบบคาบเชิงปรับตัวจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. K. Khalil, "Nonlinear systems", 2<sup>nd</sup> Ed., 1996, Prentice Hall
- [2] J.J. Stoline and W. Li, "Applied nonlinear control", London, Prentice Hall, 1991
- [3] Dimitri Jeltsema and Jacquelin M. A. Scherpen, "On Brayton and Moser's Missing Stability Theorem", *IEEE Trans. Circuits and Systems II*, Vol. 52 No. 9, September 2005, pp. 550-552
- [4] Benjamin P. Loop, Scoot D. Sudhoff, Stanislaw H. Zak and Edwin L. Zivi, "An optimization Approach to Estimating Stability Region Using Genetic Algorithms", *American Control Conference*, USA, June 2005
- [5] D. Puangdownreong, K-N. Areerak, K-L. Areerak, S. Sujitjorn, and T. Kulworawanichapong, "Application of adaptive tabu search to system identification", *IASTED International Conference on Modeling, Identification, and Control (MIC2005)*, Innsbruck, Austria, February 2005, pp. 178-183

## ประวัติผู้เขียน

นายอภิชัย สุขะพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดเชียงใหม่ เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนบ้านดงมะเฟือง ชั้นประถมศึกษาปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนบ้านห้วยกาน ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนธีรกานท์บ้านโอง จังหวัดลำพูน และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ด้วยเกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2556 และในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยระหว่างศึกษาได้ทำหน้าที่เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าพื้นฐาน ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน และปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้าพื้นฐาน ในระหว่างการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ผู้วิจัยมีความสนใจในด้านการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ทฤษฎีระบบควบคุม การสร้างแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งจากการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ทำให้ผู้วิจัยมีผลงานตีพิมพ์ปรากฏดั่งภาคผนวก จ. จำนวน 2 ฉบับ