



## รายงานการวิจัย

การวิเคราะห์เสถียรภาพไม่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลัง

เอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

**Nonlinear Stability Analysis of AC-DC Power System**

**Feeding Constant Power Loads**



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การวิเคราะห์เสถียรภาพไม่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลัง

เอชเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

**Nonlinear Stability Analysis of AC-DC Power System**

**Feeding Constant Power Loads**

หัวหน้าโครงการวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2559

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพไม่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังเอเชียเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม ซึ่งวงจรแปลงผันดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การวิเคราะห์เสถียรภาพจะเริ่มต้นด้วยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก ผ่านแบบจำลองที่ทำให้เป็นเชิงเส้น และอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง หลังจากนั้นจะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพไม่เป็นเชิงเส้น หรือวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ที่อาศัยการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลงบนระนาบของตัวแปรสถานะที่ทรงอิทธิพล มาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นที่อาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้อง ทั้งในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก และภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองได้อีกด้วย ซึ่งผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งหมดได้รับการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บน โปรแกรม MATLAB

## **Abstract**

This research presents the nonlinear 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 nonlinear stability analysis or the large signal stability analysis called phase-plane analysis is applied to analyze the stability via the phase portrait of the dominant state variables. 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. All stability results are verified by the intensive simulation of MATLAB and SIMULINK.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย การวิเคราะห์เสถียรภาพไม่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังเอซียเป็นดีซี ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ นายอภิชัย สุยะพันธ์ ที่เป็น ผู้ช่วยวิจัย ที่มีความทุ่มเท และการเอาใจใส่อย่างยิ่งในการทำงานวิจัย สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณ พนักงานศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 3 ทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

กองพัน อารีรักษ์

กันยายน 2559



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
<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 และหน่วยงานที่ใช้ประโยชน์จากผลการวิจัย.....	4
1.6 การจัดรูปเล่มรายงานการวิจัย.....	4
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 บทนำ.....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	6
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	9
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น.....	12
2.5 สรุป.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม.....	17
3.1	บทนำ.....	17
3.2	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	17
3.2.1	ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	17
3.2.2	การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ด้วยวิธีการผสมผสานกัน ระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป.....	19
3.2.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	33
3.3	การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา.....	36
3.3.1	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น.....	36
3.3.2	การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส.....	41
3.3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	53
3.4	สรุป.....	57
4	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	59
4.1	สรุป.....	59
4.2	ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต.....	61
	รายการอ้างอิง.....	62
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. โปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณ ค่าในสภาวะคงตัวด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและราฟสัน.....	65
	ภาคผนวก ข. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บน โปรแกรม MATLAB.....	69

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง..... 7
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ..... 9
2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ..... 12
3.1	พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 ..... 33



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ..... 14
3.1	วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ..... 18
3.2	วงจรสมมูลของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า ที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว ..... 20
3.3	วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว ..... 20
3.4	วงจรสมมูลของไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว ..... 21
3.5	วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิว ..... 22
3.6	สัญญาณการสวิตซ์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ..... 24
3.7	สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส ..... 29
3.8	สัญญาณ $V_{dc}$ และ $V_o$ เมื่อ $V_o^*$ เปลี่ยนแปลงจาก 100 V ไปเป็น 250 V ที่เวลา 1 วินาที ..... 35
3.9	สัญญาณ $V_{dc}$ และ $V_o$ เมื่อ $V_o^*$ เปลี่ยนแปลงจาก 300 V ไปเป็น 200 V ที่เวลา 1 วินาที ..... 35
3.10	ค่าเฉลี่ยของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ $P_{CPL} = 15 \text{ kW}$ ( $V_o^* = 273.86 \text{ V}$ ) ..... 40
3.11	ค่าเฉลี่ยที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ ..... 41
3.12	แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ..... 42
3.13	รูปแบบการเคลื่อนที่ของการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ ..... 43
3.14	วงรอบขีดจำกัด ..... 45
3.15	trajectory บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ต่าง ๆ เมื่อ $P_{CPL} = 15 \text{ kW}$ ( $V_o^* = 273.86 \text{ V}$ ) ..... 47
3.16	trajectory เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW ..... 49
3.17	trajectory เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW ..... 49
3.18	trajectory เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW ..... 51
3.19	trajectory เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW ..... 51
3.20	การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ..... 53

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21 ผลการขึ้นชั้นการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW.....	54
3.22 ผลการขึ้นชั้นการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ $P_{CPL}$ มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW.....	55
ข.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็น วงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม.....	70



# 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 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานด้วยตัวควบคุมพีไอ ซึ่งเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและโหลดของระบบมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ด้วยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ โดยจะเลือกวิธีการใดวิธีการหนึ่งจากวิธีที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น และนำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ เพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าว และทำให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณา มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งการยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม MATLAB

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

1.2.2 เพื่อหาแนวทางในการเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้อง ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

1.2.3 เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สำหรับงานวิจัยที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานด้วยตัวควบคุมพีไอ

1.3.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีคิ่วและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

1.3.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน จะใช้วิธีการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

1.3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ด้วยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ จะใช้วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

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 และหน่วยงานที่ใช้ประโยชน์จากผลการวิจัย

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

1.5.2 ได้แนวทางในการเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้อง ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

1.5.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว สำหรับงานวิจัยที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต

1.5.4 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ

1.5.5 ผลที่ได้จากการวิจัย จะนำไปสอนนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า ทั้งระดับปริญญาตรี และปริญญาโท เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไปในอนาคต

## 1.6 การจัดรูปเล่มรายงานการวิจัย

รายงานการวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 บท แต่ละบทมีรายละเอียดที่นำเสนอดังต่อไปนี้

**บทที่ 1** เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตเบื้องต้นและขอบเขตของการวิจัย รวมถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

**บทที่ 2** กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงการสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัย

**บทที่ 3** นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัลค์ที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยเนื้อหาในเบื้องต้นของบทจะกล่าวถึงการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิวิและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ

ระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และการวิเคราะห์ระนาบเฟส พร้อมทั้งนำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน เพื่อแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ

บทที่ 4 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปของการทำวิจัยนี้ พร้อมทั้งนำเสนอปัญหาและข้อเสนอแนะ เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคต

ภาคผนวกมี 2 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. แสดงรายละเอียดของโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณค่าในสภาวะคงตัวด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและราฟสัน ภาคผนวก ข. แสดงรายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB



## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดัน สัญญาณขาออกด้วยตัวควบคุมพีไอ ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการค้นคว้า วิจัย และพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในแต่ละหัวข้อได้นำเสนอโดยเรียงลำดับตามปีที่ตีพิมพ์ อธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป รวมถึงสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรม เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัย

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปัจจุบัน วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้รับความนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน แต่เมื่อนำวงจรดังกล่าวมาต่อกับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรอง จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งการขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง 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 เมื่อพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ ในวงจรแปลงผันกำลัง ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 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 ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป 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 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่เป็นเวลาของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี นิยมใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้จะมีความถูกต้องแม่นยำ และไม่ซับซ้อน ในขณะที่การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่เป็นเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ทั้งแบบที่มีการควบคุมแรงดันบัคไฟตรงหรือแบบที่ไม่มีการควบคุมแรงดันบัคไฟตรง นิยมใช้วิธีดีคิว ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้จะมีความยืดหยุ่นสูง และไม่ซับซ้อนมากนัก ดังนั้นสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานด้วยตัวควบคุมพีไอ ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ สามารถพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่เป็นเวลาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพได้โดยใช้วิธีการร่วมกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

## 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 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

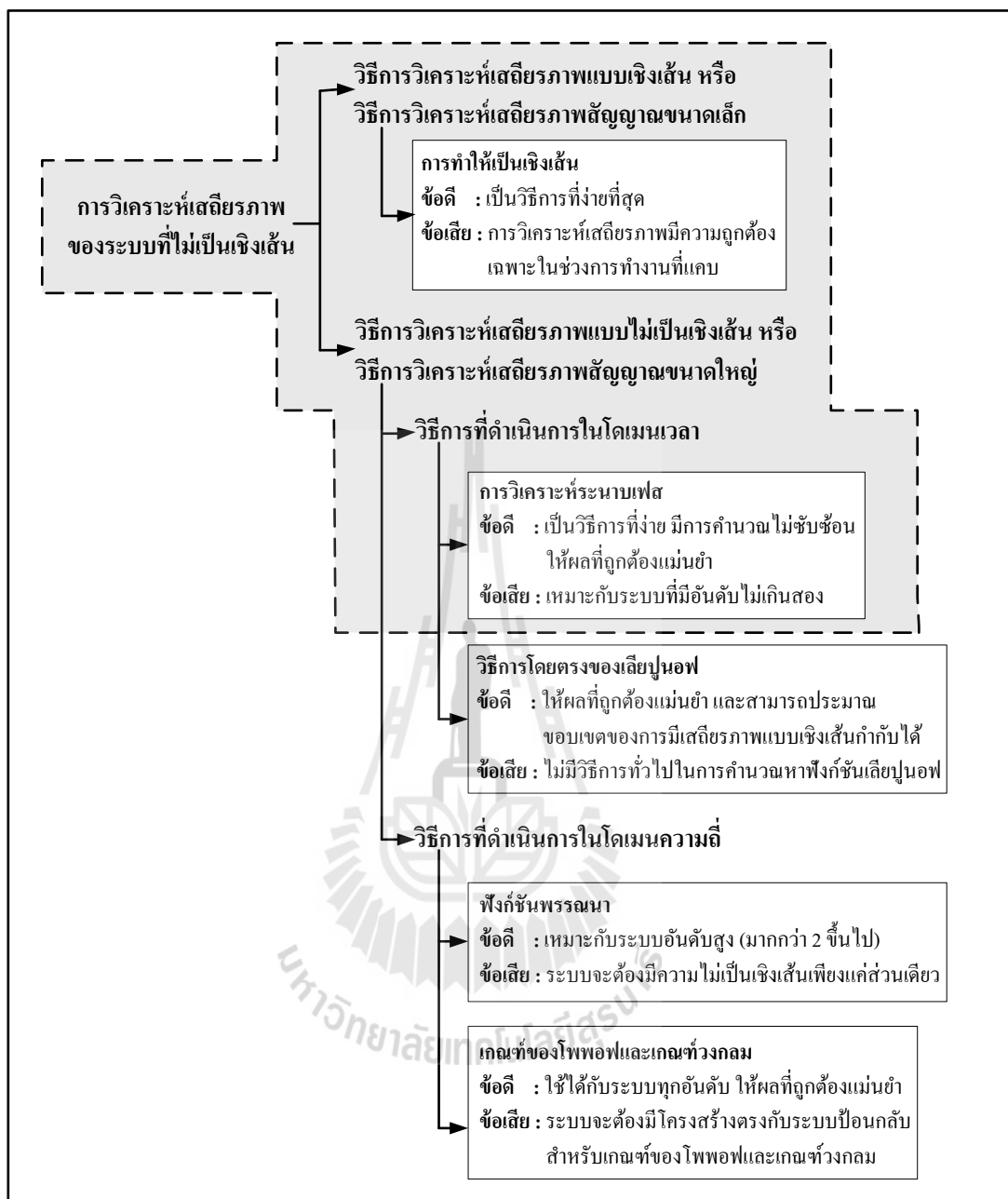
ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

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.	บทความนี้นำเสนอวิธีการสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น 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.	บทความนี้แนะนำวิธีการสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและโหลดกำลังไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยมุ่งเน้นการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้โดยอาศัยวิธีการที่นำเสนอโดยทาคากิและซูจิโน
2012	A. Griffo., and J. Wang.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน 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 และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ 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

ในโดเมนความถี่มีความยุ่งยากและซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ที่ดำเนินการในโดเมนเวลา เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย มีการคำนวณไม่ซับซ้อนและให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ รวมทั้งนำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น เพื่อแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ เพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าว และทำให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณามีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพไม่ว่าจะอาศัยวิธีการใดที่ได้กล่าวมาแล้ว จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ดังนั้นรายละเอียดการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์เสถียรภาพจะได้รับการอธิบายไว้ในแต่ละส่วนที่เหมาะสมของรายงานการวิจัยนี้ด้วยเช่นกัน

## 2.5 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ ได้กล่าวถึง ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งถือเป็นองค์ความรู้พื้นฐานและเป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัยนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นแนวทางในการเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

## บทที่ 3

### การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม

#### 3.1 บทนำ

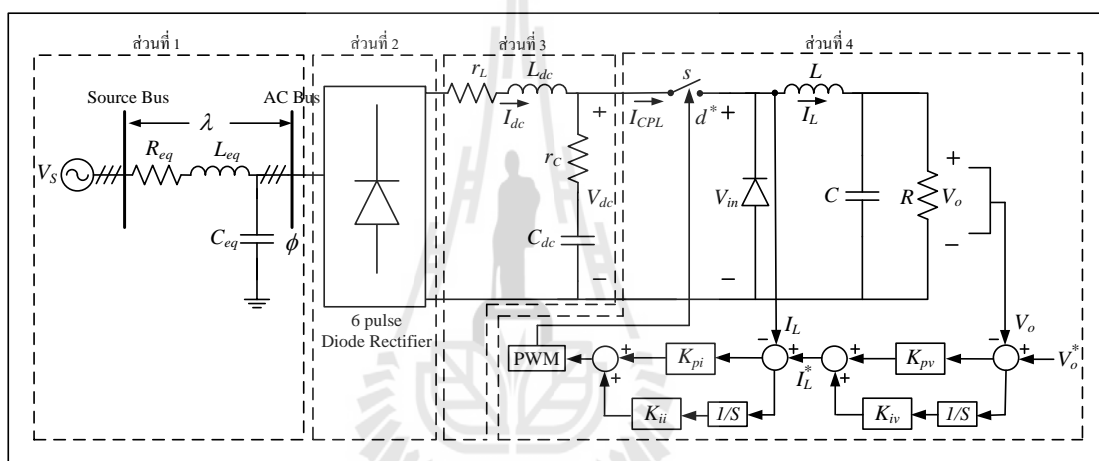
ในบทที่ 3 นี้จะเป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม โดยเนื้อหาในเบื้องต้นของบทจะกล่าวถึงการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ ซึ่งการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะได้รับการอธิบายไว้พอสังเขป จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นและวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งจะมีการแทรกแนวคิดพื้นฐานและทฤษฎีบทที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของแต่ละวิธีไว้ในเนื้อหาด้วย พร้อมทั้งนำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน เพื่อแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำ

#### 3.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

##### 3.2.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุล โดยที่  $V_s$  คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล  $R_{eq}$ ,  $L_{eq}$  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 และ

ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ ของวงจรกรอง ตามลำดับ และส่วนที่ 4 วงจรแปลงผันแบบบักก์ ที่มีการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยที่  $R, L$  และ  $C$  คือ ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ตามลำดับ  $K_{pv}, K_{iv}, K_{pi}$  และ  $K_{ii}$  คือ พารามิเตอร์ของตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ซึ่งเป็นตัวควบคุมพีไอ โดยมี โครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ลูป คือ ลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์ และลูปการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบักก์ โดยวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุม ที่เชื่อมต่อกับระบบผ่านวงจรกรอง จะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 3.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุม

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุม จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ แต่เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา จะพบว่า เป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลการทำงานของไดโอดในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีลักษณะพฤติกรรมเหมือนกับสวิตช์ และผลการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุม ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาและค้นคว้าการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้นจากการศึกษาและค้นคว้าพบว่า การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของ

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์นิยมใช้วิธีดีคิว (DQ Method) เพราะแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้จะมีความยืดหยุ่นสูงและไม่ซับซ้อน ในขณะที่ การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี นิยมใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method : GSSA method) ซึ่งแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้มีความถูกต้องแม่นยำและไม่ซับซ้อน ดังนั้นสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม จะสามารถพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปได้ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 3.2.2 ดังนี้

### 3.2.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบในรูปแบบที่ 3.1 ด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ในงานวิจัยนี้จะได้รับการอธิบายไว้พอสังเขปเท่านั้น ซึ่งการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบดังกล่าวแบบละเอียดสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากวิทยานิพนธ์ปริญญาโทของ เทพพนม โสภภาพิม (เทพพนม โสภภาพิม, 2554) ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสามารถอธิบายได้ดังนี้

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะต้องเป็นไปตามสมมติฐานดังต่อไปนี้

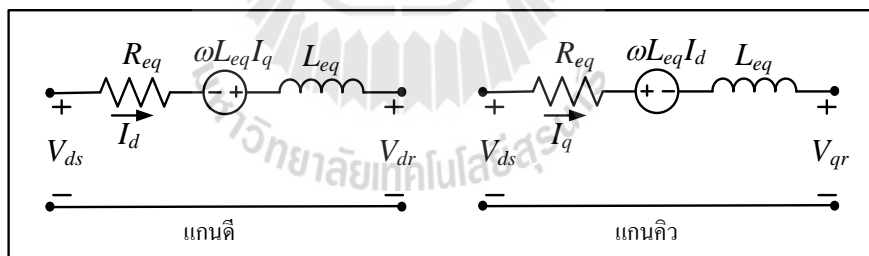
1. วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ทำงานในช่วงโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสเป็นแบบสมดุล
3. ไม่พิจารณาฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบ
4. มุมความเหลื่อม (Overlap angle)  $\mu$  ต้องน้อยกว่า 60 องศา

พิจารณาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุล นั่นคือส่วนที่ 1 ในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล วงจรอนุกรมของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า และวงจรขนานของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้า เมื่อทำการแปลงให้อยู่ในรูปของแกนหมุนดีคิว ด้วยการแปลงดีคิวที่อาศัยวิธีการแปลงของปาร์ค (Park's

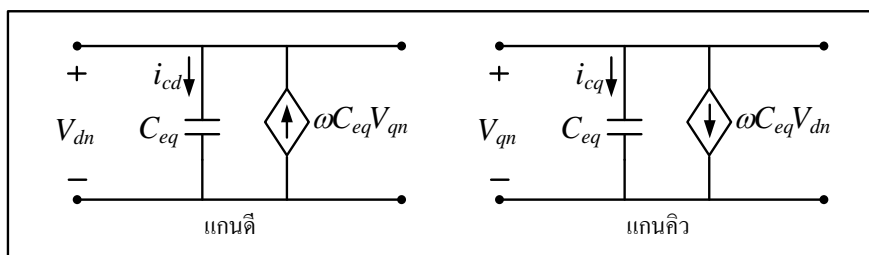
Transform) ซึ่งเป็นวิธีการแปลงปริมาณทางไฟฟ้าจากแกนสามเฟส ( $abc$ ) ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าสองเฟสบนแกนหมุนดีคิว ( $dq$ ) ดังนั้นจะได้สมการที่ใช้คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว แสดงได้ดังสมการที่ (3-1) และจะได้วงจรสมมูลของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว และวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ตามลำดับ

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

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



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลของตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว



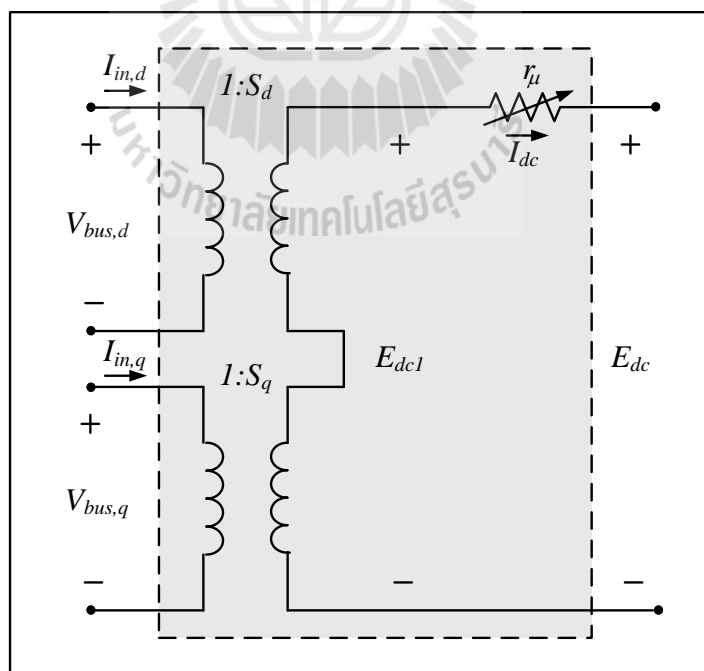
รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว

ผลจาก  $L_{eq}$  ด้านไฟฟ้ากระแสสลับ จะส่งผลให้เกิดมุมความเหลื่อมขึ้น ซึ่งทำให้แรงดันสัญญาณขาออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ลดลง ผลกระทบนี้สามารถพิจารณาให้แทนด้วยความต้านทานแบบปรับค่าได้  $r_\mu$  ที่บริเวณด้านไฟฟ้ากระแสตรง (Mohan, Underland, and Robbins, 2003) ซึ่งความต้านทานแบบปรับค่าได้  $r_\mu$  สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-2) ดังนี้

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

โดยที่  $\omega$  คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

พิจารณาไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ นั่นคือส่วนที่ 2 ในรูปที่ 3.1 ร่วมกับการพิจารณาให้ผลกระทบของมุมความเหลื่อมอยู่ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อทำการแปลงให้อยู่ในรูปของแกนหมุนดีคิว ด้วยการแปลงดีคิวที่อาศัยวิธีการแปลงของปาร์ก ดังนั้นจะได้วงจรสมมูลของไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว ดังแสดงในรูปที่ 3.4

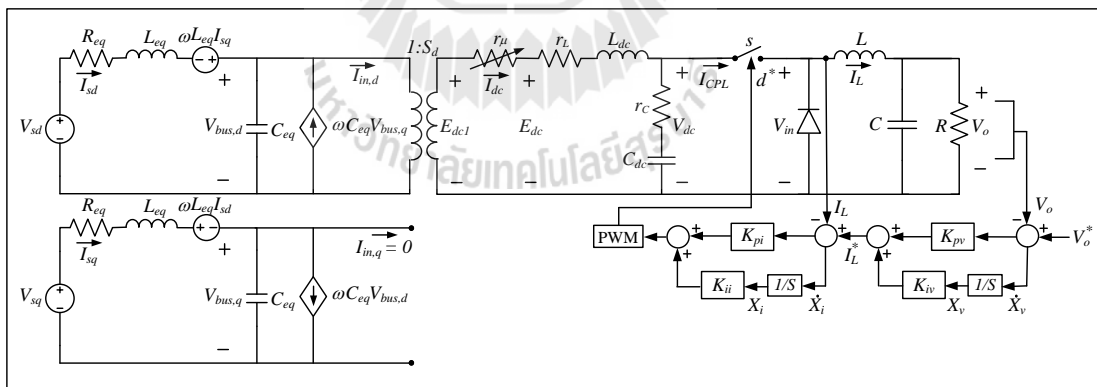


รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่อยู่บนแกนหมุนดีคิว

จากรูปที่ 3.4 จะพบว่า ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ สามารถแทนด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่บนแกนตีและแกนคิกได้ โดยมีอัตราส่วนของหม้อแปลงคือ  $S_d$  และ  $S_q$  ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราส่วนของหม้อแปลงดังกล่าวได้ดังสมการที่ (3-3) และ  $E_{dc1}$  แทนแรงดันไฟฟ้าสัญญาณขาออก โดยไม่พิจารณาผลกระทบของมุมความเหลื่อม ในขณะที่  $E_{dc}$  เป็นแรงดันไฟฟ้าสัญญาณขาออกของวงจรที่พิจารณาผลกระทบของมุมความเหลื่อม

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

เมื่อกำหนดให้ มุมการหมุนของแกนคิกเท่ากับมุมเฟสที่บัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ( $\phi_1 = \phi$ ) จะทำให้  $S_q = 0$  และส่งผลให้  $I_{in,q} = 0$  ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าที่อยู่บนแกนคิกจะถูกกำจัดทิ้งไป ดังนั้นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโพลเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม ในรูปที่ 3.1 สามารถแทนด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายที่อยู่บนแกนหมุนคิกได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ดังนี้



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนคิก

จากรูปที่ 3.5 จะสังเกตได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาซึ่งถูกแทนด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายที่อยู่บนแกนหมุนคิก ยังเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม ดังนั้นจึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มากำจัดผลการ



สวิตซ์ดังกล่าว เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาให้เป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะใช้สัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (Complex Fourier Series) ของตัวแปรสถานะของวงจรเป็นตัวแปรสถานะของแบบจำลอง ซึ่งอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

โดยทั่วไป สัญญาณ  $f(t)$  ใด ๆ ที่เป็นสัญญาณรายคาบ ซึ่งมีคาบเป็น  $T$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (3-4)

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} ; \omega_s = \frac{2\pi}{T} \quad (3-4)$$

โดยที่  $\langle x \rangle_k(t)$  คือ สัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-5)

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t f(t) e^{-jk\omega_s t} dt \quad (3-5)$$

และคุณสมบัติที่จำเป็นของสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อน สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนคิควินรูปที่ 3.5 โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป แสดงได้ดังนี้

1. คุณสมบัติของอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แสดงได้ดังสมการที่ (3-6)

$$\frac{d}{dt} \langle x \rangle_k = \left\langle \frac{dx}{dx} \right\rangle_k - jk\omega_s \langle x \rangle_k \quad (3-6)$$

2. คุณสมบัติของความสัมพันธ์ของการคูณ แสดงได้ดังสมการที่ (3-7)

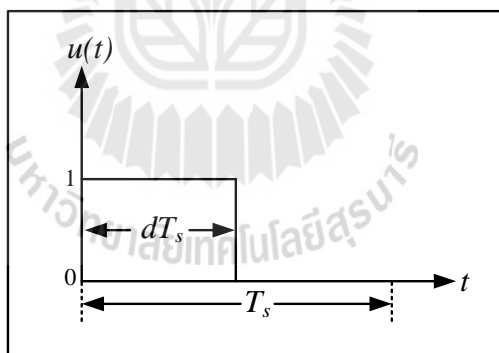
$$\langle xy \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_i \langle y \rangle_{k-i} \quad (3-7)$$

3. ถ้า  $f(t)$  คือ ค่าจริง แสดงได้ดังสมการที่ (3-8)

$$\langle x \rangle_{-k} = \overline{\langle x \rangle_k} = \langle x \rangle_k^* \quad (3-8)$$

จากสมการที่ (3-4) และสมการที่ (3-5) ค่าตัวแปร  $k$  จะเป็นตัวบ่งบอกความถูกต้องของการใช้อนุกรมฟูรีเยร์เชิงซ้อน ถ้า  $k$  มีค่าเป็นอนันต์ ค่าความผิดพลาดจากการประมาณจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และถ้าสัญญาณไม่ปรากฏการสั่นไหว จะกำหนดให้  $k = 0$  ซึ่งเรียกว่า การประมาณอันดับศูนย์ (zero-order approximation) หรือถ้าสัญญาณมีการสั่นไหว จะกำหนดให้  $k = -1, 0, 1$  ซึ่งเรียกว่า การประมาณอันดับหนึ่ง (first-order approximation)

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีคิวในรูปที่ 3.5 ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป จะเริ่มต้นจากการวิเคราะห์วงจร โดยยังไม่พิจารณาตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาฟังก์ชันการสวิตช์ (switching function) ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม และทำงานภายใต้เงื่อนไขโหมคการนำกระแสแบบต่อเนื่อง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์แสดงได้ดังสมการที่ (3-9)



รูปที่ 3.6 สัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์

$$u(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < dT_s \\ 0, & dT_s < t < T_s \end{cases} \quad (3-9)$$

โดยที่  $d$  คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle) ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม

$T_s$  คือ คาบการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์

จากรูปที่ 3.5 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) ดังนั้นสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{CPL}$  กับ  $I_L$  และระหว่าง  $V_{in}$  กับ  $V_{dc}$  ที่อยู่ในรูปของ  $u(t)$  แสดงได้ดังสมการที่ (3-10) ดังนี้

$$\begin{cases} I_{CPL} = u(t)I_L \\ V_{in} = u(t)V_{dc} \end{cases} \quad (3-10)$$

จากการวิเคราะห์วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานบนแกนหมุนดีคิว ในรูปที่ 3.5 ในกรณีที่ไม่มีพิจารณาตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ด้วยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์และกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ ร่วมกับสมการที่ (3-9) และสมการที่ (3-10) ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา แสดงได้ดังสมการที่ (3-11) ดังนี้

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

จากสมการที่ (3-11) จะสังเกตได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบยังเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจากผลการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ซึ่งในที่นี้คือ  $u(t)$  ดังนั้นจึงใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มากำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นแบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ตัวแปรสถานะของแบบจำลองในสมการที่ (3-11) สามารถเขียนเป็นสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์ของ  $I_{sd}, I_{sq}, V_{bus,d}, V_{bus,q}, I_{dc}, V_{dc}, I_L$  และ  $V_o$  โดยเลือกใช้การประมาณอันดับศูนย์ นั่นคือไม่คิดผลของการสั้นไกวของสัญญาณ จะสามารถกำหนดตัวแปรสถานะทั้ง 8 ตัวแปร แสดงได้ดังสมการที่ (3-12) ดังนี้

$$\begin{cases} \langle I_{sd} \rangle_0 = I_{sds} \\ \langle I_{sq} \rangle_0 = I_{sq} \\ \langle V_{bus,d} \rangle_0 = V_{bus,d} \\ \langle V_{bus,q} \rangle_0 = V_{bus,q} \\ \langle I_{dc} \rangle_0 = I_{dc} \\ \langle V_{dc} \rangle_0 = V_{dc} \\ \langle I_L \rangle_0 = I_L \\ \langle V_o \rangle_0 = V_o \end{cases} \quad (3-12)$$

จากนั้นใช้สมการที่ (3-5) เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์เชิงซ้อนของสัญญาณการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ในสมการที่ (3-9) ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์สำหรับการประมาณอันดับศูนย์ของสัญญาณการสวิตช์ แสดงได้ดังสมการที่ (3-13) ดังนี้

$$\langle u \rangle_0 = d \quad (3-13)$$

โดยที่  $d$  คือ ค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบักก์ในกรณีที่ไม่มีความควบคุม

นำสมการที่ (3-6) ถึงสมการที่ (3-8) และสมการที่ (3-13) มาประยุกต์ใช้กับสมการที่ (3-11) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนแกนหมุนดีควในรูปที่ 3.5 ในกรณีที่ไม่พิจารณาตัวควบคุมฟีดแบ็กของวงจรแปลงผันแบบบักก์ แสดงได้ดังสมการที่ (3-14) ดังนี้

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \dot{I}_{sd} = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\
 \dot{I}_{sq} = -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\
 \dot{V}_{bus,d} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} = \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\
 \dot{I}_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} + \frac{r_C d}{L_{dc}} I_L \\
 \dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{d}{C_{dc}} I_L \\
 \dot{I}_L = \frac{d}{L} V_{dc} - \frac{1}{L} V_o \\
 \dot{V}_o = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o
 \end{array} \right. \quad (3-14)$$

สมการที่ (3-14) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบในกรณีที่ไม่พิจารณาตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์ จะนำไปสู่การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่พิจารณาตัวควบคุมพีไอได้ดังนี้

พิจารณาวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุมในรูปที่ 3.5 พบว่า วงจรแปลงผันแบบบักก์มีตัวควบคุมพีไอ ซึ่งโครงสร้างภายในของตัวควบคุมจะแบ่งออกเป็น 2 ลูป คือ ลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ( $I_L$ ) เป็นลูปภายใน และ ลูปการควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบักก์ ( $V_o$ ) เป็นลูปภายนอก ซึ่งเมื่อวิเคราะห์โครงสร้างของระบบควบคุมในรูปที่ 3.5 จะสามารถเขียนสมการของตัวควบคุมพีไอให้อยู่ในรูปของ  $d^*$  แสดงได้ดังสมการที่ (3-15) ดังนี้

$$d^* = -K_{pi} I_L - K_{pv} K_{pi} V_o + K_{iv} K_{pi} X_v + K_{ii} X_i + K_{pv} K_{pi} V_o^* \quad (3-15)$$

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

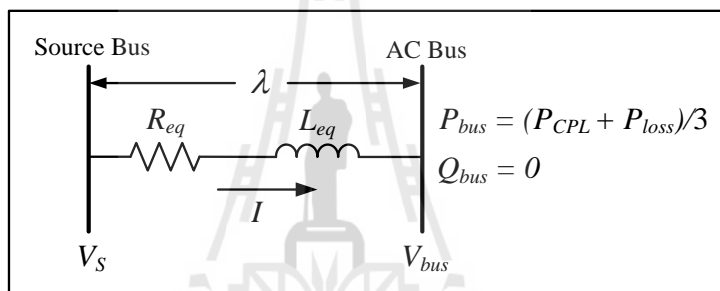
พิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานบนแกนหมุนดีคิวในรูปแบบที่ 3.5 ในกรณีทีพิจารณาตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบักก์ สามารถดำเนินการโดยการแทนค่า  $d$  ในสมการที่ (3-14) ด้วย  $d^*$  จากสมการที่ (3-15) ดังนั้นจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลาของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปแบบที่ 5.1 ซึ่งพิสูจน์หาได้โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป แสดงได้ดังสมการที่ (3-16) ดังนี้

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{I}_{sd} &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sd} + \omega I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \cos(\lambda) \\
 \dot{I}_{sq} &= -\omega I_{sd} - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{sq} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} \sqrt{\frac{3}{2}} V_m \sin(\lambda) \\
 \dot{V}_{bus,d} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sd} + \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\
 \dot{V}_{bus,q} &= \frac{1}{C_{eq}} I_{sq} - \omega V_{bus,d} \\
 \dot{I}_{dc} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} V_{bus,d} - \frac{(r_\mu + r_L + r_C)}{L_{dc}} I_{dc} - \frac{1}{L_{dc}} V_{dc} - \frac{r_C K_{pi}}{L_{dc}} I_L^2 \\
 &\quad - \frac{r_C K_{pv} K_{pi}}{L_{dc}} I_L V_o + \frac{r_C K_{iv} K_{pi}}{L_{dc}} I_L X_v + \frac{r_C K_{ii}}{L_{dc}} I_L X_i + \frac{r_C K_{pv} K_{pi}}{L_{dc}} I_L V_o^* \\
 \dot{V}_{dc} &= \frac{1}{C_{dc}} I_{dc} + \frac{K_{pi}}{C_{dc}} I_L^2 + \frac{K_{pv} K_{pi}}{C_{dc}} I_L V_o - \frac{K_{iv} K_{pi}}{C_{dc}} I_L X_v - \frac{K_{ii}}{C_{dc}} I_L X_i - \frac{K_{pv} K_{pi}}{C_{dc}} I_L V_o^* \\
 \dot{I}_L &= -\frac{K_{pi}}{L} V_{dc} I_L - \frac{K_{pv} K_{pi}}{L} V_{dc} V_o - \frac{V_o}{L} + \frac{K_{iv} K_{pi}}{L} V_{dc} X_v + \frac{K_{ii}}{L} V_{dc} X_i + \frac{K_{pv} K_{pi}}{L} V_{dc} V_o^* \\
 \dot{V}_o &= \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_o \\
 \dot{X}_v &= -V_o + V_o^* \\
 \dot{X}_i &= -I_L - K_{pv} V_o + K_{iv} X_v + K_{pv} V_o^*
 \end{aligned} \right\} \quad (3-16)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (3-16) 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  $\lambda$  ซึ่งงานวิจัยนี้จะคำนวณหาค่า  $\lambda$  โดยอาศัยการนำทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า (power flow) มาวิเคราะห์ระบบทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับในรูปแบบที่ 3.1 ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการคำนวณหาค่า  $\lambda$  ได้ดังนี้

เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุล การพิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้า จึงสามารถที่จะพิจารณาเพียงแค่เฟสเดียวได้ และเนื่องจากสายส่งกำลังไฟฟ้าของระบบเป็นสายส่งระยะสั้น ซึ่งความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้าจะมีค่าน้อยมาก จึงสามารถละทิ้งความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้าในการวิเคราะห์ได้ ดังนั้นแผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 ดังนี้



รูปที่ 3.7 สายส่งกำลังไฟฟ้าหนึ่งเฟส

จากรูปที่ 3.7 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

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

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

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

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

ดังนั้นจะได้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า แสดงได้ดังสมการที่ (3-17) ดังนี้

$$\begin{cases} \frac{V_{bus}V_S}{Z} \cos(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \cos(\gamma) = P_{bus} \\ \frac{V_{bus}V_S}{Z} \sin(\gamma - \lambda) - \frac{V_{bus}^2}{Z} \sin(\gamma) = Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-17)$$

โดยที่ กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เมื่อพิจารณาที่บัสแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ จะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-18) ดังนี้

$$\begin{cases} P_{bus} = \frac{1}{3} \left( \frac{V_o^{*2}}{R} + P_{loss} \right); P_{CPL} = \frac{V_o^{*2}}{R} \\ Q_{bus} = 0 \end{cases} \quad (3-18)$$

โดยที่  $V_o^*$  คือ แรงดันสัญญาณขาออกที่กำหนดให้กับระบบ

$P_{loss}$  คือ กำลังสูญเสียเนื่องจาก  $r_\mu$  และ  $r_L$

จากสมการที่ (3-17) และสมการที่ (3-18) สามารถเขียนเป็น โปรแกรมสำหรับการ คำนวณหาค่า  $\lambda$  โดยอาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและกราฟด้วย M-file บนโปรแกรม



MATLAB ได้ โดยรายละเอียดของโปรแกรมสามารถดูได้จากภาคผนวก ก. ซึ่งการทำงานของโปรแกรมจะดำเนินการคำนวณหาค่า  $V_{bus}$  และ  $\lambda$  ด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขของนิวตันและราฟสัน โดยการปรับปรุงค่า  $V_{bus}$  และ  $\lambda$  ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ  $1 \times 10^{-6}$  เมื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรม จะได้ค่า  $V_{bus}$  และ  $\lambda$  ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับแรงดันสัญญาณขาออกที่กำหนดให้กับระบบ ( $V_o^*$ ) หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า  $V_{bus}$  และ  $\lambda$  ที่คำนวณได้เป็นค่าในสภาวะคงตัว หรือเป็นค่า ณ จุดปฏิบัติงานของระบบ ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมจะได้ค่า  $V_{bus,0}$  และ  $\lambda_0$

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

$$I_{dc,0} = \frac{\sqrt{3} \left| \frac{V_S e^{j0} - V_{bus,0} e^{-j\lambda_0}}{Z e^{j\gamma}} \right|}{\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi}} \quad (3-19)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dc,0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} (\sqrt{2} \cdot V_{bus,0}) - \frac{3\omega L_{eq}}{\pi} I_{dc,0} - r_L I_{dc,0} \\ V_{o,0} = V_o^* \\ I_{L,0} = \frac{V_o}{R} \\ X_{V,0} = \frac{I_{L,0}}{K_{iv}} \\ X_{i,0} = \frac{V_{o,0}}{K_{ii} V_{dc,0}} \end{array} \right. \quad (3-20)$$

และนอกจากนั้นแล้ว จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ดังสมการที่ (3-16) จะสังเกตได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวมีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอของวงจร

แปลงผันแบบบัทช์ ประกอบอยู่ในสมการ  $\dot{I}_{dc}$ ,  $\dot{V}_{dc}$ ,  $\dot{I}_L$  และ  $\dot{X}_i$  ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้อง ออกแบบตัวควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัทช์ เพื่อให้ผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออก ( $V_o$ ) มีผลการตอบสนองที่ดี ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมฟีดแบ็คของวงจรแปลงผันแบบบัทช์ ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิม เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีขั้นตอนการออกแบบ ที่ง่ายไม่ซับซ้อน และให้ผลการตอบสนองที่ดี โดยการออกแบบตัวควบคุมฟีดแบ็คของวงจรแปลงผัน แบบบัทช์ด้วยวิธีการดั้งเดิม สำหรับรูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าสามารถออกแบบได้จากสมการที่ (3-21) และสมการที่ (3-22) ในขณะที่ รูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถออกแบบได้จากสมการที่ (3-23) และสมการที่ (3-24) ซึ่งรายละเอียดการพิสูจน์หาสมการที่ใช้สำหรับการ ออกแบบ ตัวควบคุมทั้ง 2 รูป สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากวิทยานิพนธ์ปริญญาโทของ เทพพนม โสภภาพิม (เทพพนม โสภภาพิม, 2554) ได้เช่นเดียวกัน

$$K_{pi} = \frac{2N\zeta_i\omega_{nv}L}{V_{in}}; N > 4 \quad (3-21)$$

$$K_{ii} = \frac{N^2\omega_{nv}^2L}{V_{in}}; N > 4 \quad (3-22)$$

$$K_{pv} = K_1C = \frac{1}{R} \quad (3-23)$$

$$K_{iv} = \frac{K_1}{R_1} = \frac{1}{R^2C} \quad (3-24)$$

โดยที่  $\zeta_i$  คือ อัตราส่วนการหน่วงของรูปกระแสไฟฟ้า

$\zeta_v$  คือ อัตราส่วนการหน่วงของรูปแรงดันไฟฟ้า

$\omega_i$  คือ ความกว้างแถบของรูปกระแสไฟฟ้า

$\omega_v$  คือ ความกว้างแถบของรูปแรงดันไฟฟ้า

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

ดังนั้นจะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟีดแบ็คของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ออกแบบด้วยวิธีการดั้งเดิมคือ  $K_{pv} = 0.2$ ,  $K_{pi} = 32$ ,  $K_{iv} = 0.0744$  และ  $K_{ii} = 29.7398$

### 3.2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ที่พิสูจน์หาได้โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาและเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในสมการที่ (3-16) จะอาศัยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์หาได้โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (DQ + GSSA model) ซึ่งได้มาจากการแก้สมการอนุพันธ์ของระบบดังสมการที่ (3-16) ด้วยฟังก์ชัน ode45 ของโปรแกรม MATLAB กับผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ (Exact topology model) โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม สามารถดูได้จากภาคผนวก ข. และกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ แสดงดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1

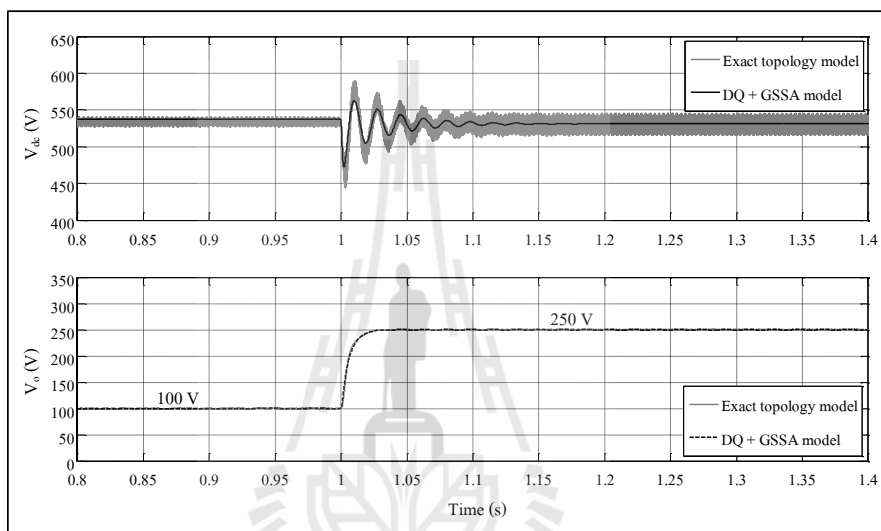
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$V_S$	230 V <sub>rms/phase</sub>	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบสมดุล
$f$	50 Hz	ความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
$R_{eq}$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานของสายส่งกำลังไฟฟ้า
$L_{eq}$	24 $\mu$ H	ความเหนี่ยวนำของสายส่งกำลังไฟฟ้า
$C_{eq}$	2 nF	ความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า
$r_L$	0.1 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$L_{dc}$	7.5 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรกรอง
$r_C$	0.5 $\Omega$	ความต้านทานภายในตัวเก็บประจุของวงจรกรอง
$C_{dc}$	1000 $\mu$ F	ความจุไฟฟ้าของวงจรกรอง
$L$ ( $\Delta I_L = 0.5$ A)	25 mH	ความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันแบบบัคค์

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 (ต่อ)

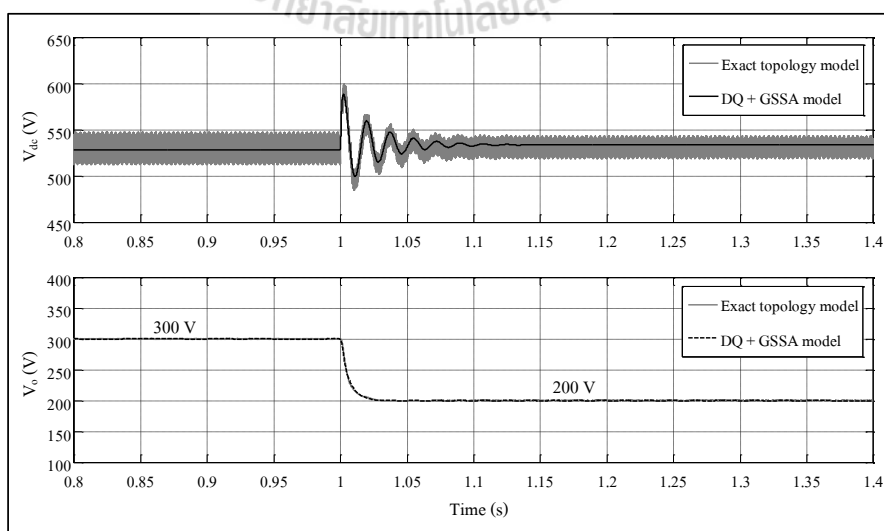
พารามิเตอร์	ค่า	รายละเอียด
$C (\Delta V_o = 20 \text{ mV})$	1250 $\mu\text{F}$	ความจุไฟฟ้าของวงจรแปลงผันแบบบัคค์
$R$	5 $\Omega$	ความต้านทานของวงจรแปลงผันแบบบัคค์
$K_{pv}$	0.2	ตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันแบบบัคค์
$K_{pi}$	32	
$K_{iv}$	0.0744	
$K_{ii}$	29.7398	
$f_s$	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคค์
$I_{sd}(0)$	0 A	ค่าเริ่มต้นการทำงานของระบบ ซึ่งคำนวณได้จากการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในสถานะอยู่ตัว โดยการพิจารณาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมมูลให้เป็นค่าคงที่ ด้วยค่าแรงดันที่ได้จากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ จากนั้นลัดวงจรที่ตัวเหนี่ยวนำ และเปิดวงจรที่ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง และวงจรแปลงผันแบบบัคค์
$I_{sq}(0)$	0 A	
$V_{bus,d}(0)$	0 V	
$V_{bus,q}(0)$	0 V	
$I_{dc}(0)$	0 A	
$V_{dc}(0)$	537.991 V	
$I_L(0)$	0 A	
$V_o(0)$	0 V	
$X_v(0)$	0	
$X_i(0)$	0	

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุมที่พิสูจน์หาได้โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 โดยรูปที่ 3.8 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกดีซี ( $V_{dc}$ ) และแรงดันสัญญาณขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ ( $V_o$ ) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกดีซีและแรงดันสัญญาณขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันสัญญาณขาออกที่กำหนดให้กับระบบ ( $V_o^*$ ) จาก 100 V ไปเป็น 250 V ที่เวลา 1 วินาที ในขณะที่ รูปที่ 3.9 เป็นการเปรียบเทียบผลการตอบสนองเช่นเดียวกับรูปที่ 3.8 แต่พิจารณาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันสัญญาณขาออกที่กำหนดให้กับระบบ ( $V_o^*$ ) จาก 300 V ไป

เป็น 200 V ที่เวลา 1 วินาที ซึ่งจากรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 จะสังเกตได้ว่า ผลการตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีลักษณะของรูปสัญญาณที่สอดคล้องกับผลการตอบสนองที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ทั้งในสถานะชั่วคราวและสถานะอยู่ตัว ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับการที่พิสูจน์มาจากการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้



รูปที่ 3.8 สัญญาณ  $V_{dc}$  และ  $V_o$  เมื่อ  $V_o^*$  เปลี่ยนแปลงจาก 100 V ไปเป็น 250 V ที่เวลา 1 วินาที



รูปที่ 3.9 สัญญาณ  $V_{dc}$  และ  $V_o$  เมื่อ  $V_o^*$  เปลี่ยนแปลงจาก 300 V ไปเป็น 200 V ที่เวลา 1 วินาที

### 3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-16) และกำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ แสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส โดยรายละเอียดแสดงได้ในหัวข้อที่ 3.3.1 และหัวข้อที่ 3.3.2 ตามลำดับ จากนั้นในหัวข้อที่ 3.3.3 จะเป็นการนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งนำเสนอการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น กับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง หรือเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ สามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

#### 3.3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น

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

พิจารณาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (autonomous system) ซึ่งแทนด้วยแบบจำลองตัวแปรสถานะ (state-variable models) ดังสมการที่ (3-25)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (3-25)$$

โดยที่  $\mathbf{x}$  คือ ตัวแปรสถานะของระบบ

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

กำหนดให้  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  เป็นฟังก์ชันที่สามารถหาอนุพันธ์ได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นสามารถกระจายฟังก์ชัน  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  รอบ ๆ จุดปฏิบัติการ  $\mathbf{x}_0$  ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ได้สมการที่ (3-26)

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \mathbf{f}_{\text{h.o.t.}}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (3-26)$$

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

กรณีที่พิจารณาเฉพาะการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง พจน์อันดับสูงจะถูกตัดออกไป และจากการใช้การกระจายอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งกับชุดสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยพิจารณารอบ ๆ จุดปฏิบัติการ  $\mathbf{x}_0$  ดังนั้นจะสามารถประมาณระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ (3-25) ให้เป็นระบบที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแทนด้วยแบบจำลองตัวแปรสถานะได้ดังสมการที่ (3-27) ดังนี้

$$\begin{cases} \delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \\ \delta \mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{x} + \mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (3-27)$$

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 (3-27) คือ แบบจำลองของระบบที่เป็นเชิงเส้น หรืออาจมีชื่อเรียกว่าแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่พิจารณาระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นในรูปของการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยรอบ ๆ จุดปฏิบัติการ

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้น สามารถอาศัยวิธีการพื้นฐานของทฤษฎีบทควบคุมที่เป็นเชิงเส้น นั่นคือ ทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยจะพิจารณาค่าเจาะจง (eigenvalues) ของเมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  ซึ่งค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3-28) ดังนี้

$$\det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}) = 0 \quad (3-28)$$

โดยที่  $\lambda$  คือ ค่าเฉพาะของระบบ

ดังนั้นระบบจะมีเสถียรภาพ ถ้าส่วนจริงของค่าเฉพาะมีค่าน้อยกว่าศูนย์ เงื่อนไขดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (3-29)

$$\operatorname{Re}(\lambda_i) < 0 \quad (3-29)$$

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

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จะได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังสมการที่ (3-16) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง ดังนั้นจะได้แบบจำลองของระบบซึ่งเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ (3-27) และจะได้เมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  สำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าเฉพาะเพื่อนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยทฤษฎีบทค่าเฉพาะ ดังแสดงในสมการที่ (3-30)

จากสมการที่ (3-30) จะพบว่า เมตริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  มีค่าขึ้นอยู่กับ  $V_{dc,0}$ ,  $I_{L,0}$  และ  $V_{o,0}$  ซึ่งค่าดังกล่าวนี้คำนวณได้จากสมการที่ (3-20) ดังนั้นจากสมการที่ (3-20) และสมการที่ (3-30) จะสามารถคำนวณหาค่าเฉพาะของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีค่าเท่ากับ 15 kW ( $V_o^* = 273.86$  V) ผ่านคำสั่ง “eig(A)” ของโปรแกรม MATLAB ได้ โดยเส้นทางเดินของค่าเฉพาะ แสดงได้ดังรูปที่ 3.10

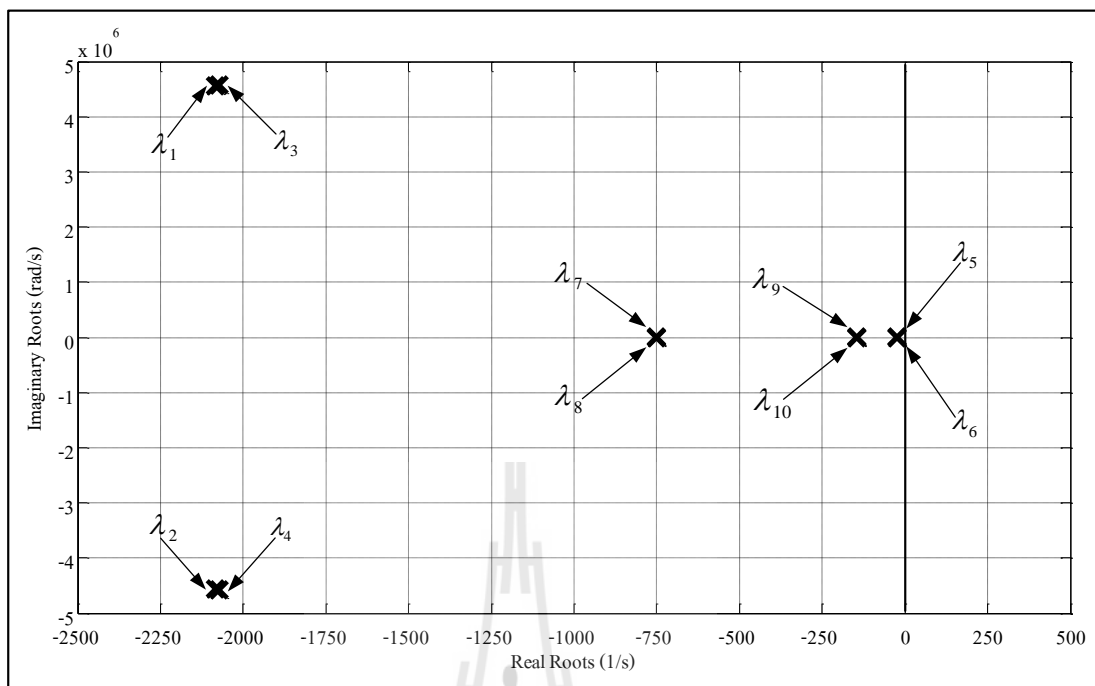


$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \begin{bmatrix}
-\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & \omega & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-\omega & -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} & 0 & -\frac{1}{L_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{1}{C_{eq}} & 0 & 0 & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{1}{C_{eq}} & -\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_{dc}} & 0 & -\frac{(r_\mu + r_L + r_c)}{L_{dc}} & -\frac{1}{L_{dc}} & a(5,7) & -\frac{r_c K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{iv} K_{pi} I_{L,0}}{L_{dc}} & \frac{r_c K_{ii} I_{L,0}}{L_{dc}} \\
0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{dc}} & 0 & a(6,7) & \frac{K_{pv} K_{pi} I_{L,0}}{C_{dc}} & -\frac{K_{iv} K_{pi} I_{L,0}}{C_{dc}} & -\frac{K_{ii} I_{L,0}}{C_{dc}} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a(7,6) & \frac{K_{pi} V_{dc,0}}{(K_{pv} K_{pi} V_{dc,0} + 1)} & \frac{K_{vi} K_{pi} V_{dc,0}}{C_{dc}} & \frac{K_{ii} V_{dc,0}}{C_{dc}} & \frac{K_{ii} V_{dc,0}}{C_{dc}} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{L}{C} & \frac{L}{RC} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -K_{pv} & -K_{iv} & 0
\end{bmatrix}_{10 \times 10} \quad (3-30)$$

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

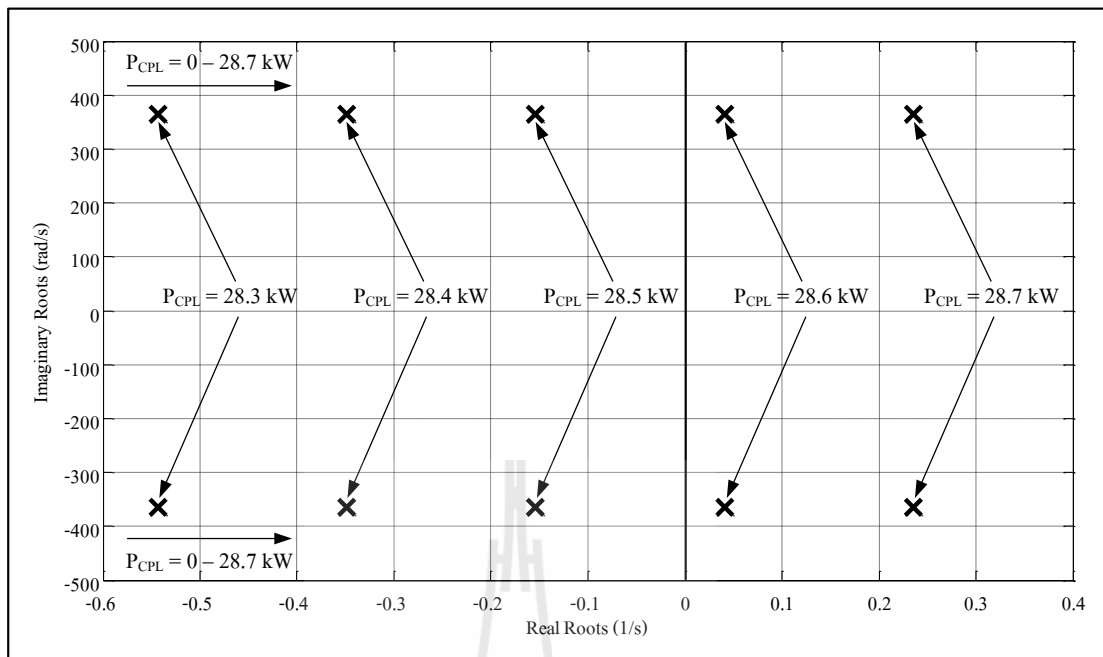
$$a(6,7) = \frac{2K_{pi} I_{L,0}}{C_{dc}} + \frac{K_{pv} K_{pi} V_{o,0}}{C_{dc}} - \frac{K_{iv} K_{pi} X_{v,0}}{C_{dc}} - \frac{K_{ii} X_{i,0}}{C_{dc}} - \frac{K_{pv} K_{pi} V_o^*}{C_{dc}}$$

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



รูปที่ 3.10 ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ  $P_{CPL} = 15 \text{ kW}$  ( $V_o^* = 273.86 \text{ V}$ )

จากรูปที่ 3.10 จะพบว่า ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วยค่าเจาะจง  $\lambda_1 - \lambda_{10}$  ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าส่วนจริงของค่าเจาะจง  $\lambda_2$  และ  $\lambda_{10}$  กับค่าส่วนจริงของค่าเจาะจง  $\lambda_5$  และ  $\lambda_6$  จะมีค่าเท่ากับ 6.25 ซึ่งมีค่ามากกว่า 5 ดังนั้นค่าเจาะจง  $\lambda_5$  และ  $\lambda_6$  เป็นค่าเจาะจงเด่นหรือเป็นขั้วเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา และเมื่อพิจารณาค่าแห่งของขั้วเด่นดังกล่าวจะพบว่า อยู่ตรงตำแหน่งที่ใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ ซึ่งคำนวณได้จาก  $1/\sqrt{L_{dc}C_{dc}} = 365.15$  ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ขั้วเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของวงจรกรอง ( $L_{dc}$  และ  $C_{dc}$ ) ซึ่งค่าเจาะจงเด่นหรือค่าขั้วเด่นนี้จะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา สามารถวิเคราะห์ได้จากค่าเจาะจงเด่นของระบบได้ ซึ่งเส้นทางเดินของค่าเจาะจงเด่นของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0–28.7 kW แสดงได้ดังรูปที่ 3.11 ดังนี้



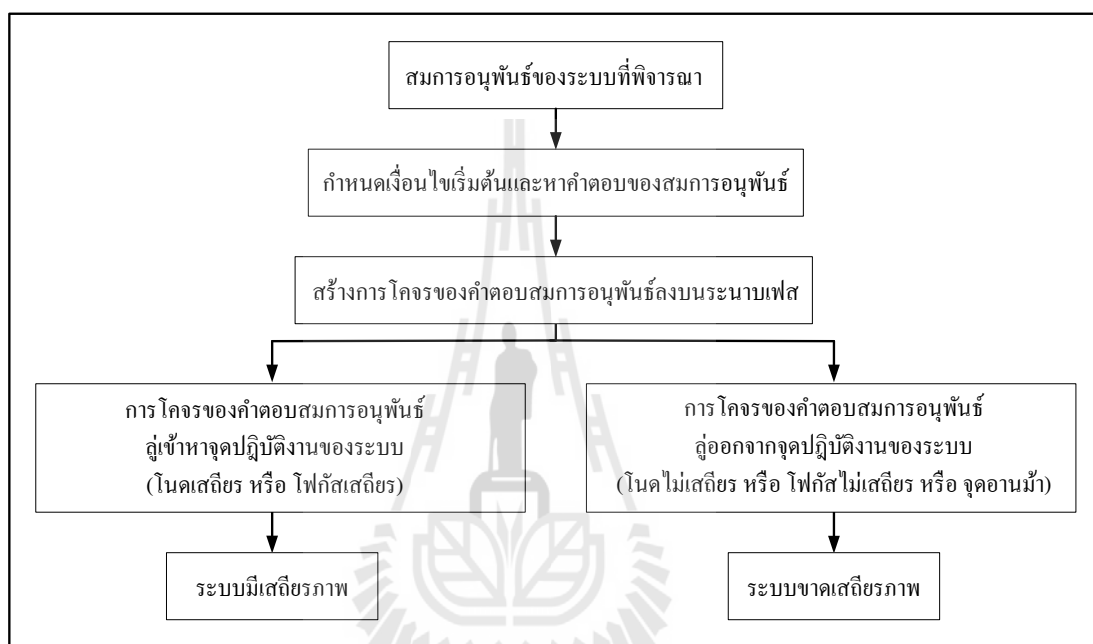
รูปที่ 3.11 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

จากรูปที่ 3.11 จะสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 28.6 kW ( $V_o^* = 378.15$  V) ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีค่ามากกว่าศูนย์ ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (3-29) ที่กล่าวไว้ว่า ระบบจะมีเสถียรภาพ ถ้าส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ ระบบจะขาดเสถียรภาพ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 จะขาดเสถียรภาพเมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 28.5 kW ( $V_o^* = 377.49$  V)

### 3.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

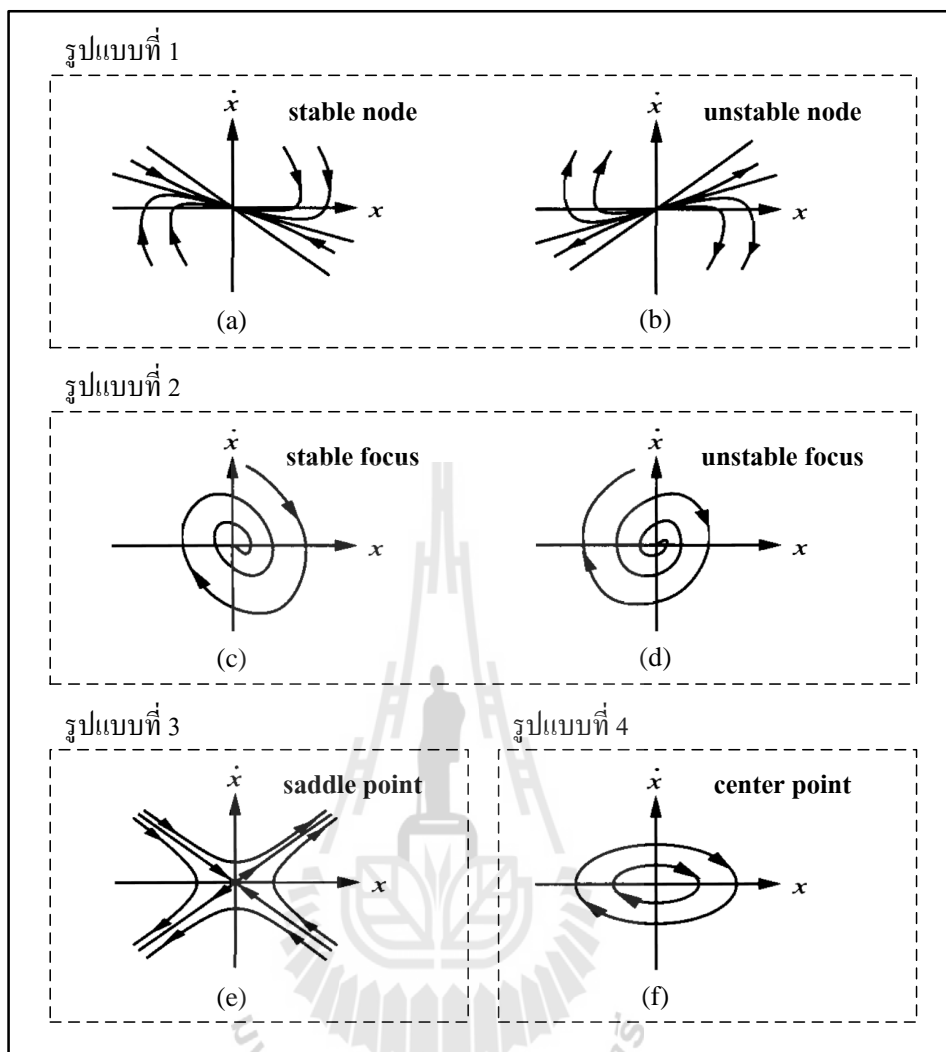
การวิเคราะห์ระนาบเฟสเป็นวิธีการทางกราฟิกสำหรับศึกษาพฤติกรรมของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นอันดับสอง (second-order nonlinear system) ซึ่งนำเสนอโดย อองรี ปวงกาเร (Henri Poincare) นักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส แนวคิดพื้นฐานของวิธีการนี้คือ การสร้างวิถีการโคจร (motion trajectory) ที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขเริ่มต้น (initial conditions) ต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน โดยแต่ละวิถีการโคจรนั้น ได้มาจากการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ของระบบจากเงื่อนไขเริ่มต้นที่พิจารณา และมีชื่อเรียกว่า การโคจรระนาบเฟส (phase plane trajectory) หรือการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ (trajectory) ลงบนปริภูมิสถานะ (state space) ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะของระบบสองตัว ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ระนาบเฟส (phase plane) จากนั้นจะตรวจสอบคุณลักษณะสมบัติของระบบ

รวมถึงข้อมูลเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบจากวิธีการ โจรบนระนาบเฟสที่ได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส จะพบว่า เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง ซึ่งอาศัยทฤษฎีบทควบคุมของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น หรืออาจเรียกว่า เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสสามารถแสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 3.12 ดังนี้



รูปที่ 3.12 แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

จากแผนภาพในรูปที่ 3.12 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส จะตั้งต้นจากสมการพลวัตหรือสมการอนุพันธ์ของระบบที่พิจารณา จากนั้นจะกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานให้กับระบบ และหาคำตอบของสมการอนุพันธ์จากเงื่อนไขเริ่มต้นที่ได้กำหนดไว้ นำคำตอบของสมการอนุพันธ์ที่หาได้ไปสร้างการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบเฟส จากนั้นจะตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาจากการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบเฟสสร้างที่ได้ ซึ่งรูปแบบการเคลื่อนที่ของการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพของระบบ แบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.13 รูปแบบการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์

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

กำหนดให้ จุดปฏิบัติงานของระบบอยู่ที่จุดกำเนิด (origin)

รูปแบบที่ 1 คือ โหนดเสถียรหรือโหนดไม่เสถียร (stable or unstable node) ลักษณะการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในรูปแบบนี้ จะไม่มีการสั่นไหว (oscillation) โดยการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์เข้าสู่หาจุดปฏิบัติงาน ดังนั้นจุดปฏิบัติงานดังกล่าวจะถูกเรียกว่า โหนดเสถียร (stable node) ดังแสดงในรูปที่ 3.13(a) ซึ่งแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพ ในทางกลับกัน ถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ดูออกจากจุดปฏิบัติงาน ดังนั้นจุดปฏิบัติงานดังกล่าวจะถูกเรียกว่า โหนดไม่เสถียร (unstable node) ดังแสดงในรูปที่ 3.13(b) ซึ่งแสดงว่าระบบขาดเสถียรภาพ

รูปแบบที่ 2 คือ โฟกัสเสถียรหรือโฟกัสไม่เสถียร (stable or unstable focus) ลักษณะการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในรูปแบบนี้ จะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานอย่างน้อยหนึ่งรอบก่อนที่จะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานดังกล่าว นั่นคือ เป็นการเคลื่อนที่แบบมีการสั่น ไกว โดยถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์เคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานและเข้าหาจุดปฏิบัติงานในเวลาต่อมา ดังนั้นจุดปฏิบัติงานดังกล่าวจะถูกเรียกว่า โฟกัสเสถียร (stable focus) ดังแสดงในรูปที่ 3.13(c) ซึ่งแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพ ในทางกลับกัน ถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์เคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานและออกห่างจากจุดปฏิบัติงานมากยิ่งขึ้นอย่างไม่มีการสิ้นสุดเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นจุดปฏิบัติงานดังกล่าวจะถูกเรียกว่า โฟกัสไม่เสถียร (unstable focus) ดังแสดงในรูปที่ 3.13(d) ซึ่งแสดงว่าระบบขาดเสถียรภาพ

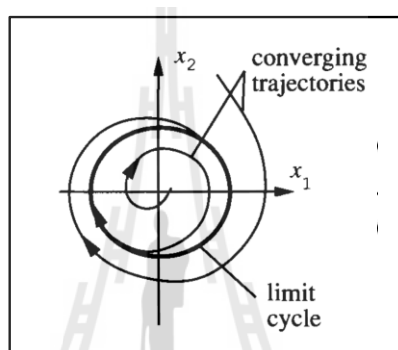
รูปแบบที่ 3 คือ จุดอานม้า (saddle point) เมื่อพิจารณาวิถีการโคจรบนระนาบเฟสของการเคลื่อนที่ในรูปแบบนี้ จะพบว่า มีลักษณะคล้ายกับอานม้า โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของแต่ละการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์นั้น จะไม่มีการสั่น ไกว ดังแสดงในรูปที่ 3.13(e) ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า มีการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ 2 เส้น ซึ่งเป็นเส้นตรงและพาดผ่านจุดปฏิบัติงานของระบบ โดยเส้นที่หนึ่งจะลู่ออกจากจุดปฏิบัติงาน ในขณะที่อีกเส้นหนึ่งจะลู่ออกจากจุดปฏิบัติงาน และการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในการเคลื่อนที่อื่น ๆ ที่นอกเหนือจากเส้นตรงทั้งสองเส้นดังกล่าวข้างต้น จะมีการเคลื่อนที่ลู่ออกจากจุดปฏิบัติงานของระบบทั้งหมด ดังนั้นจุดปฏิบัติงานดังกล่าวจึงถูกเรียกว่า จุดอานม้า ซึ่งระบบที่มีจุดปฏิบัติงานในลักษณะนี้ ส่วนใหญ่ระบบจะไม่มีเสถียรภาพ

รูปแบบที่ 4 คือ จุดศูนย์กลาง (center point) ลักษณะการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในรูปแบบนี้ จะมีการเคลื่อนที่เป็นรูปร่างวงรี โดยมีจุดปฏิบัติงานของระบบเป็นจุดศูนย์กลางของวงรี ดังนั้นจุดปฏิบัติงานนี้จึงถูกเรียกว่า จุดศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 3.13(f) ซึ่งระบบที่มีจุดปฏิบัติงานในลักษณะนี้ จะมีเสถียรภาพแบบไร้ส่วนเพื่อ แต่การมีเสถียรภาพแบบไร้ส่วนเพื่อนั้น ระบบจะมีการสั่น ไกวของสัญญาณที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับจุดปฏิบัติงานของระบบ ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ให้เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ เพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อส่วนประกอบหรือโครงสร้างของระบบ หรืออาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของตัวควบคุมได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาให้การมีเสถียรภาพแบบไร้ส่วนเพื่อเป็นการไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งแสดงว่าระบบที่มีจุดปฏิบัติงานเป็นแบบจุดศูนย์กลาง จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ

ดังนั้นจากรูปแบบการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ทั้ง 4 รูปแบบ จะสามารถสรุปได้ว่า ถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลู่ออกจากจุดปฏิบัติงานของระบบ ไม่ว่าจะ เป็นจุดปฏิบัติงานแบบโนดเสถียรหรือโฟกัสเสถียร ระบบจะมีเสถียรภาพ ในขณะที่

ถ้าการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลู่ออกจากจุดปฏิบัติงานของระบบ ไม่ว่าจะเป็นจุดปฏิบัติงานแบบโนดไม่เสถียร หรือ โฟกัสไม่เสถียร หรือจุดอานม้า หรือจุดศูนย์กลาง ระบบจะขาดเสถียรภาพ

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



รูปที่ 3.14 วงรอบขีดจำกัด (J.J. Slotine, and W. Li, 1991)

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีวงรอบขีดจำกัดสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสได้เช่นกัน โดยที่วงรอบขีดจำกัดของระบบจะปรากฏเป็นเส้นโค้งปิด (close curve) บนระนาบเฟส ซึ่งทุก ๆ การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์จะเคลื่อนที่จากเงื่อนไขเริ่มต้นที่พิจารณาจากนั้นจะเข้าสู่เส้นโค้งปิดนี้ และจะเคลื่อนที่ตามเส้นโค้งปิดดังกล่าวเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 3.14 การเคลื่อนที่ของการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ตามวงรอบขีดจำกัดนี้ จะทำให้เกิดลักษณะของการสั่นไกวที่ขนาดและคาบมีค่าคงที่

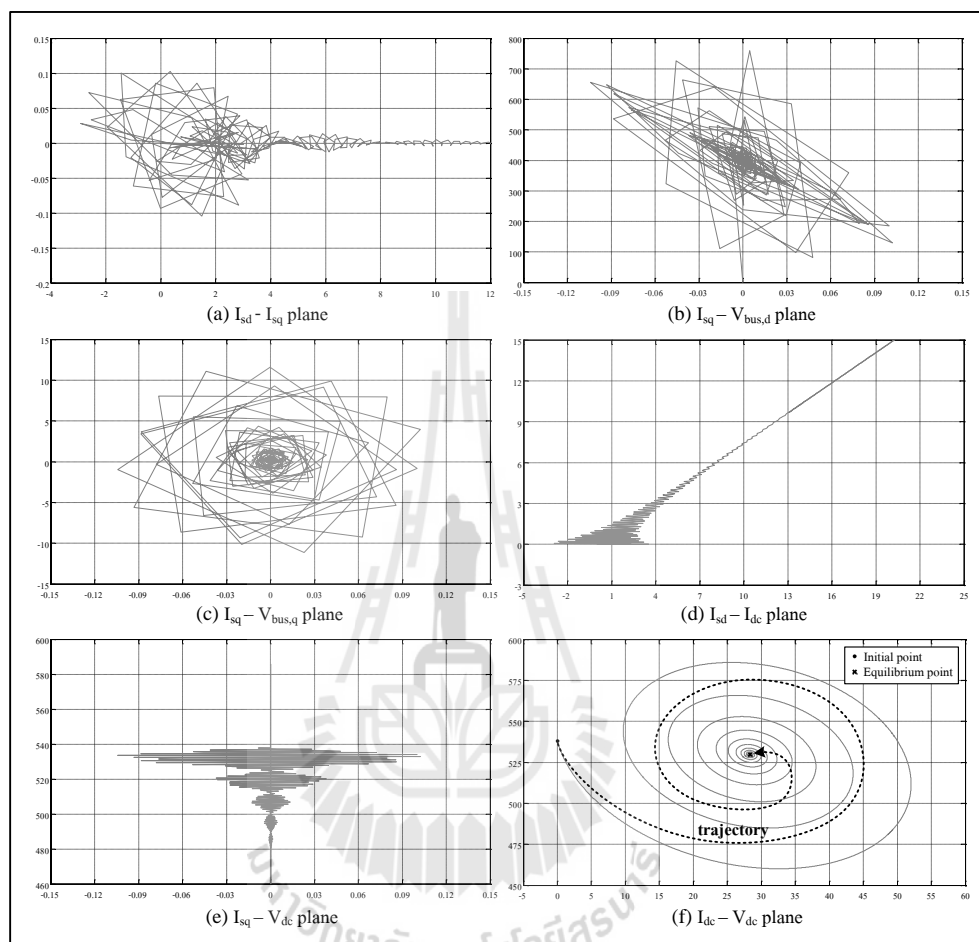
เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีตัวควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส จะได้ว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสเป็นวิธีการทางกราฟิกซึ่งจะต้องสร้างการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ 2 ตัว แต่เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งแทนด้วยชุดสมการอนุพันธ์ดังสมการที่ (3-16) จะพบว่า มีตัวแปรสถานะทั้งหมด 10 ตัว ดังนั้นคำถามที่ตามมาก็คือ การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ใด สามารถ

นำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3.1 จะพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีขั้วเด่นเพียงแค่ 2 ตัว เท่านั้น โดยขั้วเด่นนี้จะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งขั้วเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้จะเป็นขั้วที่อยู่ตรงตำแหน่งของวงจรถอง เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าของวงจรถอง ( $L_{dc}$  และ  $C_{dc}$ ) ดังนั้นจึงทำให้ตัวแปรสถานะ  $I_{dc}$  (กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรถอง) และ  $V_{dc}$  (แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรถอง) เป็นตัวแปรสถานะที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถทำได้โดยอาศัยการสร้างการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพ นั่นคือ ระนาบของตัวแปรสถานะ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  ได้ แต่อย่างไรก็ตาม การหาคำตอบของสมการอนุพันธ์ เพื่อนำคำตอบที่หาได้มาสร้างการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  ยังคงต้องดำเนินการ โดยอาศัยการหาคำตอบจากสมการอนุพันธ์ทั้ง 10 สมการ นั่นคือสมการ  $\dot{I}_{sd}, \dot{I}_{sq}, \dot{V}_{bus,d}, \dot{V}_{bus,q}, \dot{I}_{dc}, \dot{V}_{dc}, \dot{I}_L, \dot{V}_o, \dot{X}_v$  และ  $\dot{X}_i$  ดังสมการที่ (3-16) ซึ่งไม่สามารถที่จะดำเนินการ โดยอาศัยการหาคำตอบจากเฉพาะสมการ  $\dot{I}_{dc}$  และ  $\dot{V}_{dc}$  โดยไม่สนใจสมการอื่นๆ ที่เหลือ กล่าวคือ เป็นการหาคำตอบของสมการอนุพันธ์โดยสนใจเฉพาะสมการอนุพันธ์ของขั้วเด่นไม่ได้ เพราะอาจจะทำให้คำตอบของสมการอนุพันธ์ที่หาได้มีความคลาดเคลื่อนและส่งผลทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้

เพื่อเป็นการยืนยันว่า การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ในขณะที่การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่คู่ของ  $I_{dc}$  กับ  $V_{dc}$  ไม่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ งานวิจัยนี้จึงดำเนินการสร้างการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลงบนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ต่าง ๆ โดยจะพิจารณาการ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 15 kW ( $V_o^* = 273.86$  V) และระบบมีค่าเริ่มต้นการทำงานแสดงดังตารางที่ 3.1 เนื่องจากทราบว่า ที่สภาวะนี้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพ ซึ่งสามารถยืนยันการมีเสถียรภาพของระบบที่จุดปฏิบัติการดังกล่าวได้จากผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกคิซี ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 โดยจะพบว่า การตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกคิซีจะมีการสั่นไกวและลู่เข้าหาจุดปฏิบัติการของระบบเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติการนี้ ดังนั้นจากสมการที่ (3-16) และเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบดังตารางที่ 3.1



สามารถสร้างการ โจรของค่าตอบสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาบนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ต่าง ๆ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 15 kW ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ดังนี้



รูปที่ 3.15 trajectory บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ต่าง ๆ เมื่อ  $P_{CPL} = 15 \text{ kW}$  ( $V_o^* = 273.86 \text{ V}$ )

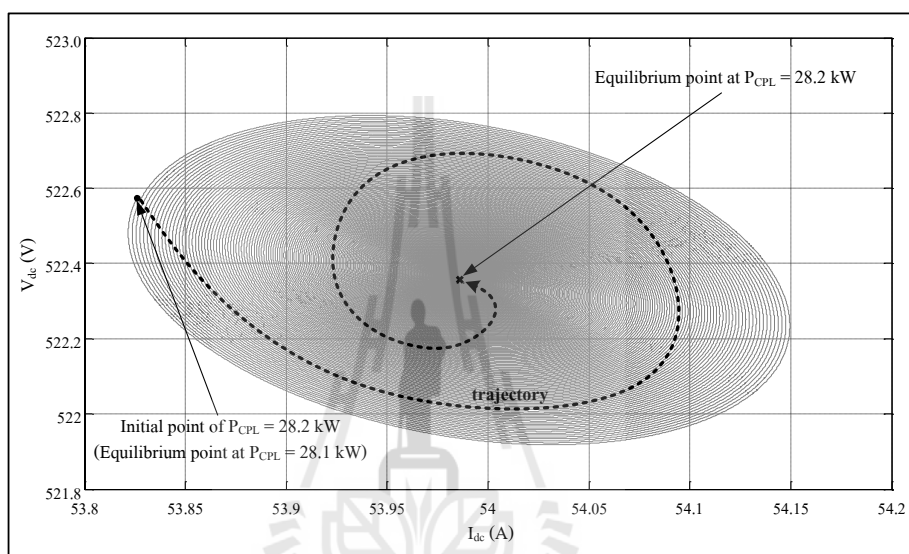
จากรูปที่ 3.15 จะสังเกตเห็นได้ว่าการ โจรของค่าตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่คู่ของ  $I_{dc}$  กับ  $V_{dc}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.15(a) ถึงรูปที่ 3.15(e) มีรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นไปตามรูปแบบการเคลื่อนที่ของค่าตอบสมการอนุพันธ์ดังรูปที่ 3.13 ดังนั้นการ โจรของค่าตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบดังกล่าวจึงไม่สามารถอธิบายหรือให้ข้อมูลเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ในขณะที่การ โจรของค่าตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.15(f) จะมีรูปแบบการเคลื่อนที่เป็นแบบโพกัสเสถียร ซึ่งการเคลื่อนที่ในรูปแบบนี้จะเคลื่อนที่โดยเริ่มจากจุดเริ่มต้นและจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติการก่อนที่จะเข้าสู่จุดปฏิบัติการของระบบเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

จะมีเสถียรภาพ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองของแรงดันสัญญาณขาออกดีซี ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 จะพบว่า ให้ผลที่สอดคล้องกันนั่นคือ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของ  $I_{dc}$  และ  $V_{dc}$  สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้

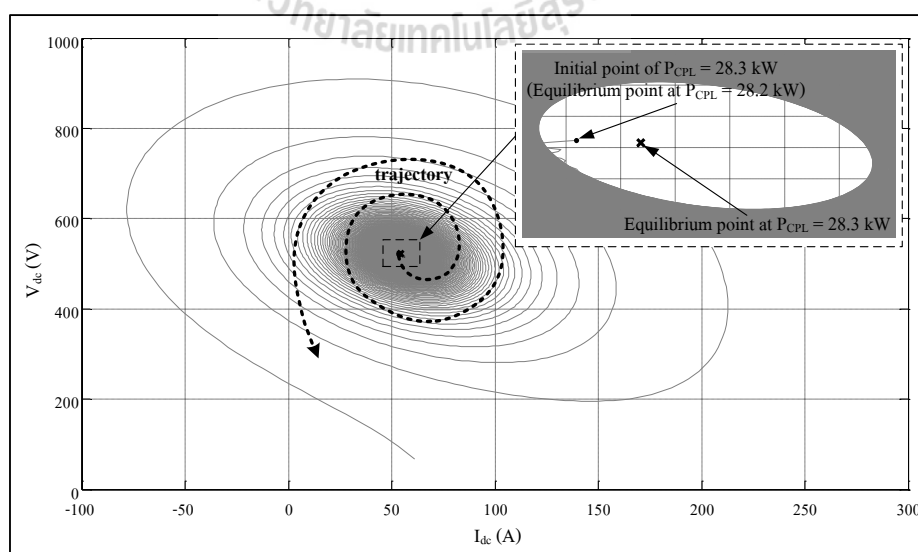
การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุมด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส จะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก และกรณีที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ โดยที่การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบจะดำเนินการเมื่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้ว กล่าวคือ ไม่ได้เป็นการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบทันทีทันใด ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้ง 2 กรณีที่พิจารณานี้ ไม่ได้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด แต่เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในสถานะอยู่ตัว เช่นเดียวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งถือว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพในสถานะอยู่ตัวเช่นกัน โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสทั้ง 2 กรณี แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

**กรณีที่ 1** การวิเคราะห์เสถียรภาพในสถานะอยู่ตัว เมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโหลดในกรณีนี้จะอาศัยการเพิ่มค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ทีละ 100 W (เพิ่ม  $V_o^*$  ทีละ 22.36 V) ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาขาดเสถียรภาพ ซึ่งเป็นการดำเนินการเช่นเดียวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ที่คำนวณหาค่าเจาะจงของระบบในทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว 100 W ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ดังนั้นหลักการของการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสในกรณีนี้คือ จุดปฏิบัติงานหรือจุดสมดุลของระบบ ( $\mathbf{x}_0$ ) ที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ณ สถานะอยู่ตัวปัจจุบัน ( $P_{CPL}$ ) จะถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบ ( $\mathbf{x}(0)$ ) ที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ถูกเพิ่มค่าขึ้นจากค่าเดิมอีก 100 W ( $P_{CPL+100} = P_{CPL} + 100$  W) นั่นคือกำหนดให้  $\mathbf{x}(0)$  at  $P_{CPL+100} = \mathbf{x}_0$  at  $P_{CPL}$  ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่พิจารณาเสถียรภาพของระบบ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.2 kW จุดปฏิบัติงานหรือจุดสมดุลของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติมีค่าเท่ากับ 28.1 kW จะถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.2 kW ดังนั้นจากสมการที่ (3-16) 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 (3-16) 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 3.16 และรูปที่ 3.17 ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ 3.16 trajectory เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW

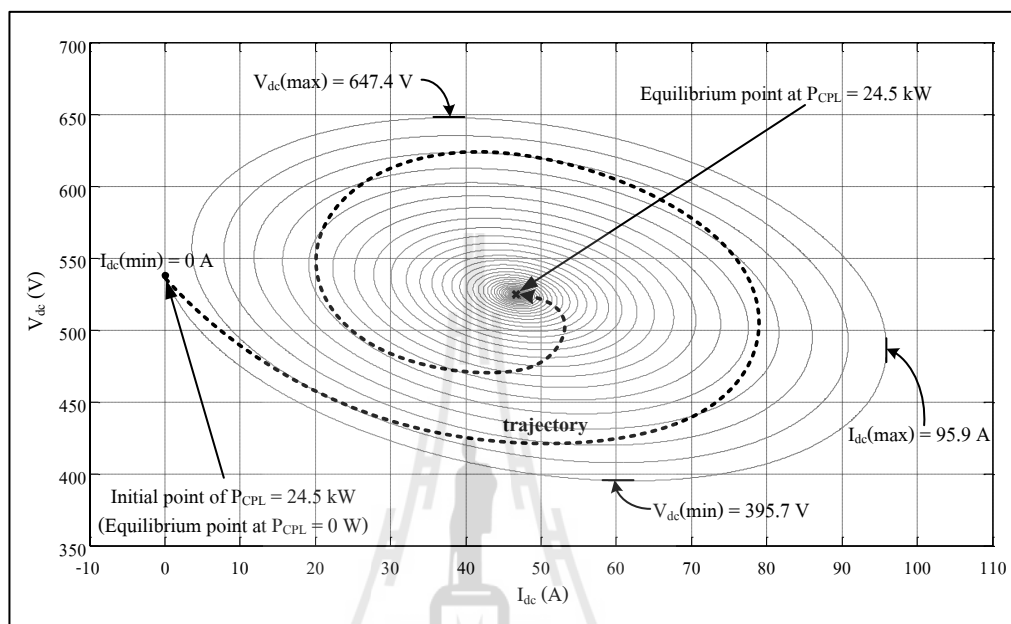


รูปที่ 3.17 trajectory เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW

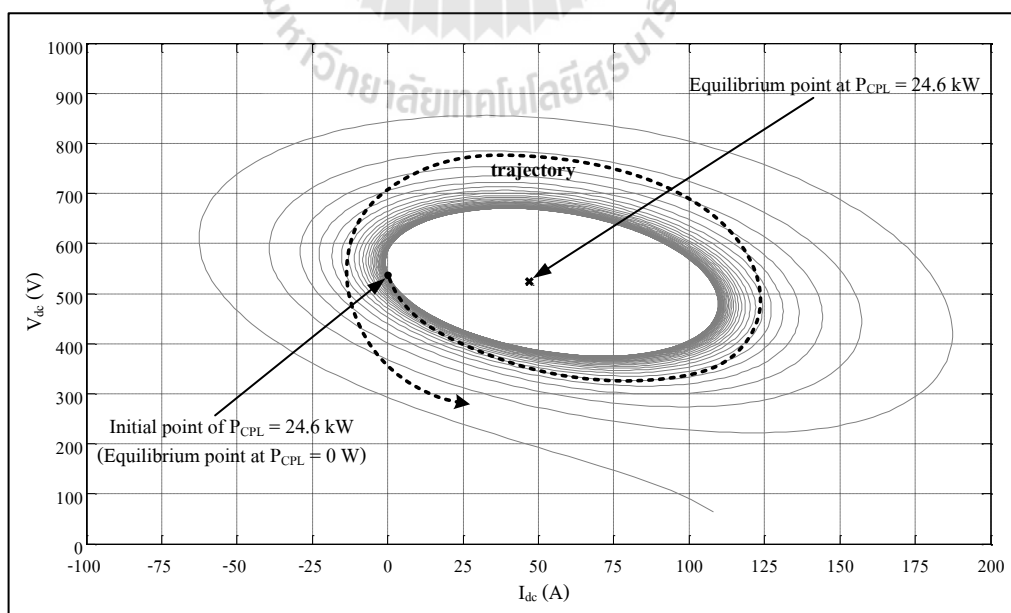
จากรูปที่ 3.16 จะสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลง จาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มต้นจากจุด ปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.1 kW และจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบ จุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.2 kW ก่อนที่จะเข้าสู่จุดปฏิบัติงาน ดังกล่าวเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.2 kW เป็นแบบโพกัสเสถียร ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพ ในขณะที่ รูปที่ 3.17 นั้น เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW การ โจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มต้นจากจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลด กำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.2 kW โดยจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานของระบบ ที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.3 kW และจะออกห่างจากจุดปฏิบัติงานดังกล่าวมากยิ่งขึ้น อย่างไม่มีที่สิ้นสุดเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 28.3 kW เป็นแบบโพกัสไม่เสถียร ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ จึงสามารถสรุปได้ว่า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ระบบ ไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 28.2 kW

**กรณีที่ 2** การวิเคราะห์เสถียรภาพในสภาวะอยู่ตัว เมื่อ โหลดของระบบมีการ เปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีนี้จะเป็น การพิจารณาว่า การเปลี่ยนแปลง โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 0 W ( $V_o^* = 0$  V) ไปเป็น โหลด กำลังไฟฟ้าคงตัวค่าใดที่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ( $P_{CPL, Unstable}$ ) โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลง โหลดเพียงครั้งเดียว กล่าวคือเป็นการเปลี่ยนแปลง โหลดจาก 0 W ไปเป็น  $P_{CPL, Unstable}$  ซึ่งจากผลการ วิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นและผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี การวิเคราะห์ระนาบเฟสในกรณีที่ 1 จะพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีจุดขาดเสถียรภาพเมื่อ โหลด กำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าอยู่ในหน่วย kW ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจาก 0 W ไป เป็น  $P_{CPL, Unstable}$  แล้วส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ สำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้จะต้องใช้ การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีนี้เป็นการ วิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อ โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ซึ่งหลักการของการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ในกรณีนี้คือ จุดปฏิบัติงานที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 0 W จะถูกกำหนดให้เป็นจุดเริ่มต้น การทำงานให้กับระบบ 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,  $V_{dc}(0) = 537.99$  V,  $I_L(0) = 0$  A,  $V_o(0) = 0$  V,  $X_v(0) = 0$  และ  $X_i(0) = 0$  ดังนั้นจากสมการ ที่ (3-16) และจุดเริ่มต้นการทำงานของระบบที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น จะสามารถสร้าง

การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW ( $V_o^* = 350$  V) และเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW ( $V_o^* = 350.71$  V) ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ 3.18 trajectory เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW



รูปที่ 3.19 trajectory เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW

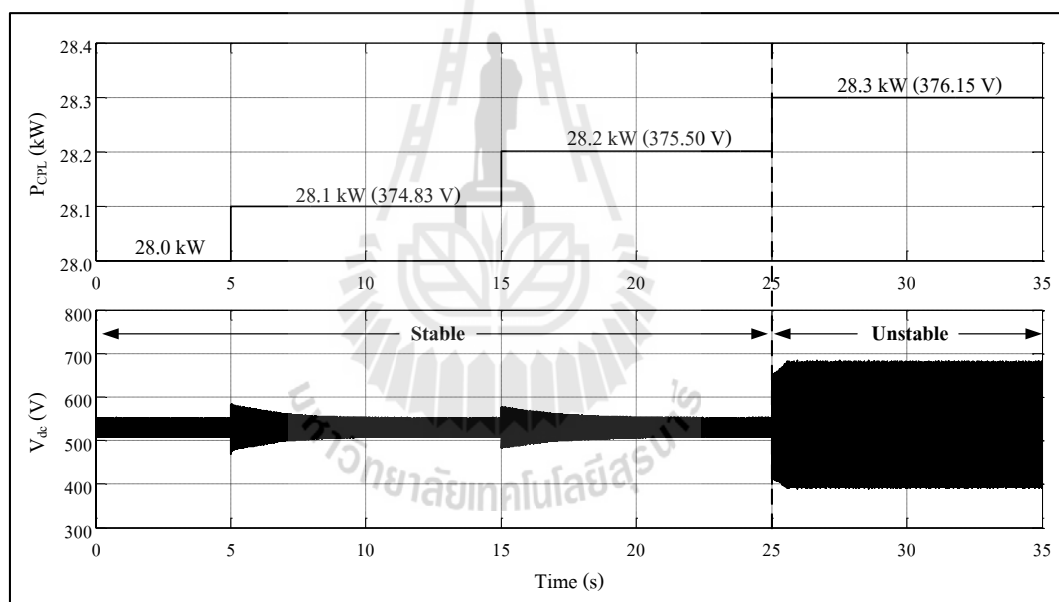
จากรูปที่ 3.18 จะสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มจากจุดเริ่มต้นการทำงานที่ได้กำหนดไว้ และจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 24.5 kW ก่อนที่จะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานดังกล่าวเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 24.5 kW เป็นแบบพอสเสถียร ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพ ในขณะที่ รูปที่ 3.19 นั้น เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบจะเริ่มจากจุดเริ่มต้นการทำงานที่ได้กำหนดไว้ โดยจะมีการเคลื่อนที่ล้อมรอบจุดปฏิบัติงานของระบบที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 24.6 kW และจะออกห่างจากจุดปฏิบัติงานดังกล่าวมากยิ่งขึ้นอย่างไม่มีที่สิ้นสุดเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่าจุดปฏิบัติงานที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 24.6 kW เป็นแบบพอสไม่เสถียร ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 24.5 kW

ดังนั้นจากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส จะสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 28.2 kW ซึ่งข้อสรุปนี้จะเป็นจริงสำหรับการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กเท่านั้น ในขณะที่ การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 24.5 kW

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้แล้ว หากรูปแบบการเคลื่อนที่ของการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เป็นการเคลื่อนที่แบบมีการสั่นไหว จะสามารถประมาณการสั่นไหวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น เมื่อ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW จากกราฟการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในรูปที่ 3.18 จะสังเกตได้ว่า การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบมีการสั่นไหว ดังนั้นจะสามารถประมาณการสั่นไหวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้ดังนี้ กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง ( $I_{dc}$ ) จะมีการสั่นไหวสูงสุดอยู่ในช่วง 0 – 95.9 A และแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรกรอง ( $V_{dc}$ ) จะมีการสั่นไหวสูงสุดอยู่ในช่วง 395.7 – 647.4 V ก่อนที่การสั่นไหวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบ

### 3.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ

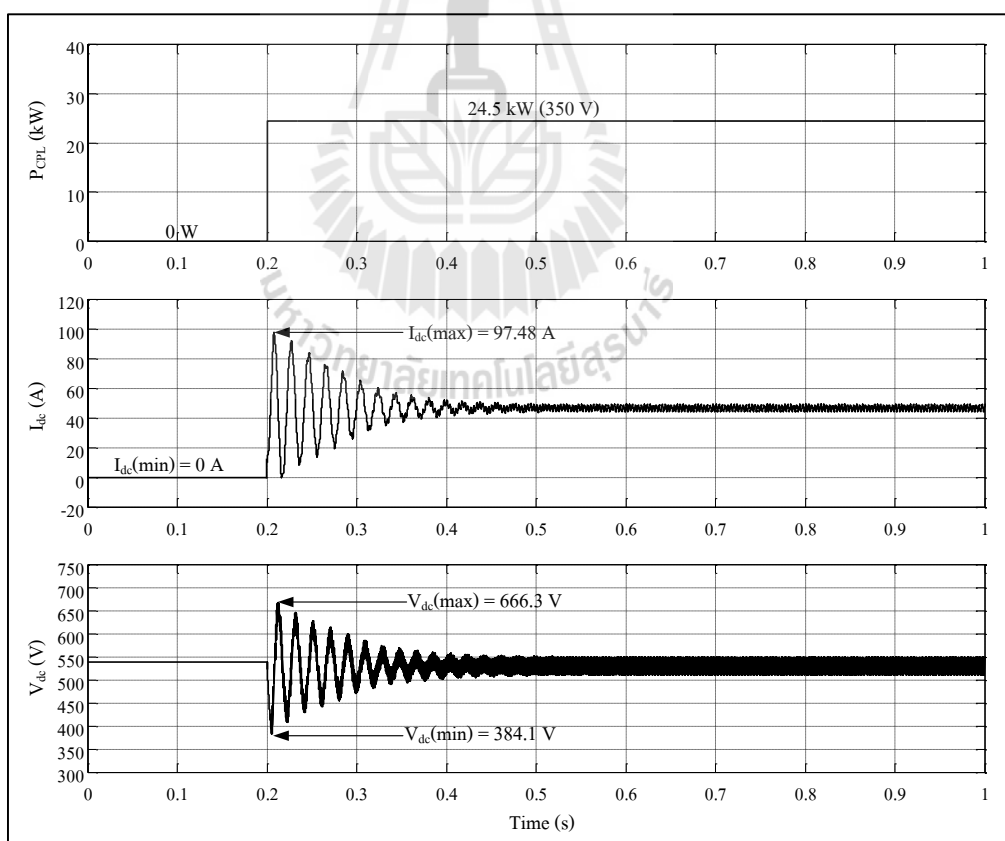
การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพในงานวิจัยนี้ อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักก์ที่มีตัวควบคุม สามารถดูได้จากภาคผนวก ข. และผลการยืนยันการขาดเสถียรภาพแสดงได้ดังรูปที่ 3.20 ถึงรูปที่ 3.22 โดยรูปที่ 3.20 จะเป็นการยืนยันการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กลง ในขณะที่ รูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.22 นั้นจะเป็นการยืนยันการมีเสถียรภาพและการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่



รูปที่ 3.20 การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก

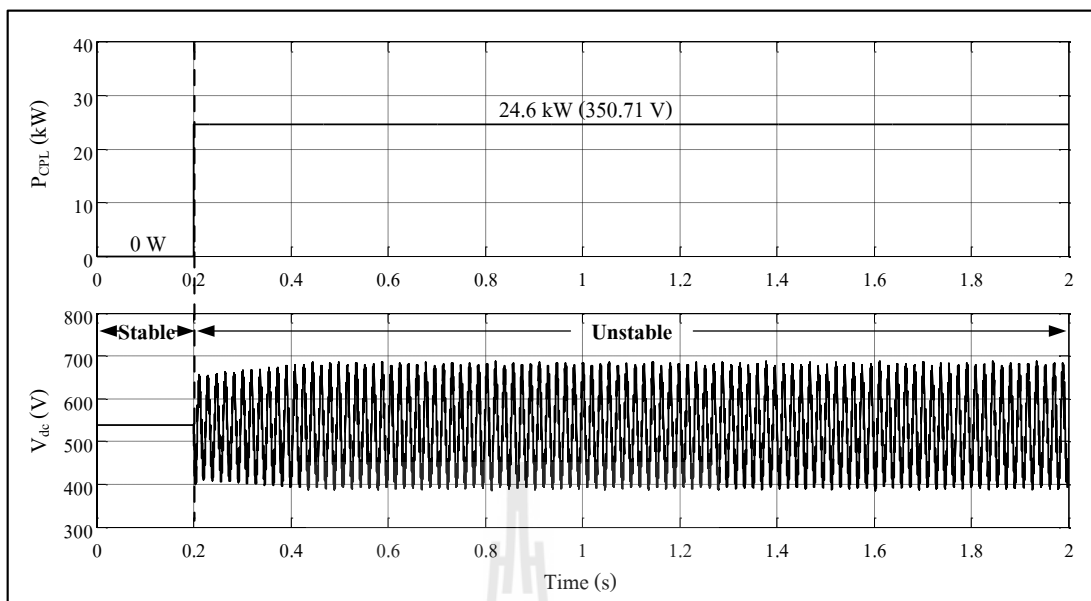
จากรูปที่ 3.20 ซึ่งเป็นการยืนยันการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กลง จะสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ( $V_o^* = 375.50$  V) ไปเป็น 28.3 kW ( $V_o^* = 376.15$  V) ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จะพบว่า มีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาด

เสถียรภาพเกิดขึ้น โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นนั้น ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 28.5 kW ( $V_o^* = 377.49$  V) ดังนั้นความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพที่เกิดขึ้นคือ 300 W หรือคิดเป็น 1.06 % ในขณะที่ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 28.2 kW ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ จะพบว่า มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่าจะเป็น การวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาด เล็ก การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก จะมีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพที่เกิดขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง หรือเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ จะให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ



รูปที่ 3.21 ผลการยืนยันการมีเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW





รูปที่ 3.22 ผลการยืนยันการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์  
เมื่อ  $P_{CPL}$  มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW

จากรูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.22 ซึ่งเป็นการยืนยันการมีเสถียรภาพและการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ จะสังเกตได้ว่า ในรูปที่ 3.21 เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.5 kW ( $V_o^* = 350$  V) ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะยังคงมีเสถียรภาพ ในขณะที่ รูปที่ 3.22 นั้น เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 24.6 kW ( $V_o^* = 350.71$  V) ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 3.1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 24.5 kW ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 จะพบว่า มีความสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ สามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จะพบว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้ระบุว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 28.5 kW เท่านั้น นั่นหมายความว่า ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 24.6 kW ระบบจะมีเสถียรภาพอย่างแน่นอน เนื่องจากส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่า

เป็นลบ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วที่สภาวะดังกล่าว ระบบอาจจะขาดเสถียรภาพเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโหลดภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้ ซึ่งการขาดเสถียรภาพในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับ 24.6 kW สามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.22 ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสและการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ จะมีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพที่เกิดขึ้นคือ 4 kW หรือคิดเป็น 16.33 % ซึ่งถือว่าเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าสูง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญชาตญาณขนาดเล็ก นอกจากจะทำให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก มีความคลาดเคลื่อนแล้ว ยังไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้อีกด้วย ซึ่งเกิดจากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นไม่สามารถที่จะกำหนดจุดเริ่มต้นหรือเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานให้กับระบบในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถที่จะกำหนดจุดเริ่มต้นหรือเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการนี้ สามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก และภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ที่เกิดขึ้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้ว กล่าวคือ เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพในสภาวะอยู่ตัว ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

จากรูปที่ 3.21 นอกจากจะสามารถใช้ยืนยันการมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้แล้ว ยังสามารถใช้ยืนยันการประมาณการสั้น โกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงาน เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 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 โกวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.3.2 ดังแสดงในรูปที่ 3.18 จะพบว่า มีความใกล้เคียงกัน โดยผลที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสนั้น  $I_{dc}$  จะมีการสั้น โกวสูงสุดอยู่ในช่วง 0 – 95.9 A และ  $V_{dc}$  จะมีการสั้น โกวสูงสุดอยู่ในช่วง 395.7 – 647.4 V ก่อนที่การสั้น โกวจะมีค่า

ลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้อีกด้วย ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

### 3.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม ซึ่งผลจากการทำงานของไดโอดในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีลักษณะพฤติกรรมเหมือนกับสวิตช์ และผลการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม ส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มากำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าว เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่สามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองกับผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ สามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม งานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจากการดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ทำให้ทราบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้มีขั้วของระบบทั้งหมด 10 ตัว แต่มีขั้วเด่นเพียงแค่ 2 ตัว เท่านั้น ซึ่งขั้วเด่นนี้มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น สามารถวิเคราะห์ได้จากขั้วเด่นหรือค่าเจาะจงเด่นของระบบได้ และนอกจากนั้นแล้วการทราบว่าขั้วเด่นของระบบมีเพียงแค่ 2 ตัว เท่านั้น จึงทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส สามารถทำได้โดยอาศัยการสร้างการ โครจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับขั้วเด่นของระบบได้

แต่อย่างไรก็ตามการหาคำตอบของสมการอนุพันธ์ เพื่อนำคำตอบที่หาได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับชั่วเด่น จะต้องคำนวณหาจากชุดสมการอนุพันธ์ของระบบทั้งหมด และเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นและวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ จะพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในกรณีที่โหนดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากที่ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้ว กล่าวคือ เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสภาวะอยู่ตัว ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก นอกจากจะให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่โหนดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก มีความคลาดเคลื่อนแล้ว ยังไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหนดมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้อีกด้วย ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง หรือเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ นอกจากจะสามารถประมาณการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้แล้ว ยังสามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งในกรณีที่โหนดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ได้อย่างถูกต้องแม่นยำอีกด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น แต่ยังคงมีชั่วเด่น 2 ตัว สำหรับงานวิจัยในอนาคตสามารถดำเนินการ โดยอาศัยองค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานได้ นั่นคือ วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส โดยอาศัยการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับชั่วเด่น โดยที่การหาคำตอบของสมการอนุพันธ์เพื่อนำคำตอบที่หาได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับชั่วเด่น จะต้องคำนวณหาจากชุดสมการอนุพันธ์ของระบบทั้งหมด

## บทที่ 4

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 4.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพไม่เป็นเชิงเส้น หรือการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีสี่ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยเริ่มต้นจากการศึกษาและค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจากการศึกษาและค้นคว้าพบว่า โหลดของระบบไฟฟ้ากำลังที่เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน จะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือน โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ นอกจากจะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบแล้ว ยังส่งผลทำให้ระบบเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นแบบกำลังไฟฟ้าคงตัว จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก เนื่องจากถ้าระบบไฟฟ้ากำลังขาดเสถียรภาพอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบ หรือส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง แต่วิธีการนี้มีข้อจำกัดคือ ถ้าค่าเจาะจงอยู่บนแกนจินตภาพจะไม่สามารถสรุปได้ว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้น มีเสถียรภาพหรือขาดเสถียรภาพ ซึ่งความไม่ชัดเจนดังกล่าวอาจทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้ แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นแล้ว ยังมีวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยตรง ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณใหญ่ โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีการที่ดำเนินการในโดเมนเวลา ประกอบด้วย การวิเคราะห์ระนาบเฟส และวิธีการ โดยตรงของเลียปูนอฟ และวิธีการที่ดำเนินการใน โดเมนความถี่ ประกอบด้วยวิธีฟังก์ชันพหุนาม เกณฑ์ของโพพอฟ และเกณฑ์วงกลม ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ด้วยวิธีการที่ดำเนินการในโดเมนเวลา โดยเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย มีการคำนวณไม่ซับซ้อนและให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไม่ว่าจะใช้วิธีการใดจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งการพิสูจน์หาแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ นิยมใช้วิธีคิก เพราะแบบจำลองที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูงและไม่ซับซ้อน ในขณะที่ การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันดิซีเป็นดิซี นิยมใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพราะแบบจำลองที่ได้จากวิธีการนี้ จะมีความถูกต้องแม่นยำและไม่ซับซ้อน ซึ่งปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ เริ่มต้นจากการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบ โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีคิกและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งวิธีคิกถูกนำมาใช้ในการจำกัดผลการทำงานของไดโอดในวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีลักษณะพฤติกรรมเหมือนกับสวิตช์ ในขณะที่วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปถูกนำมาใช้จำกัดผลการทำงานของสวิตช์ในวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่มีตัวควบคุม ผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองกับผลการตอบสนองของระบบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ สามารถยืนยันได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาที่ได้รับการพิสูจน์ มีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบ พร้อมทั้งนำผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากที่ระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้ว กล่าวคือ เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสถานะอยู่ตัว ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก นอกจากจะให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก มีความคลาดเคลื่อนแล้ว ยังไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้อีกด้วย ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยตรง หรือเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ นอกจากจะให้ผลการวิเคราะห์ในทั้งสองกรณีที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั้น โกวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติการได้อีกด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น แต่ยังคงมีขั้วเด่น 2 ตัว สำหรับ

งานวิจัยในอนาคตสามารถดำเนินการโดยอาศัยองค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานได้ นั่นคือ วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส โดยอาศัยการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับข้อเด่น โดยที่การหาคำตอบของสมการอนุพันธ์เพื่อนำคำตอบที่หาได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะที่มีความสัมพันธ์กับข้อเด่น จะต้องคำนวณหาจากชุดสมการอนุพันธ์ของระบบทั้งหมด ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3

#### 4.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มีข้อเด่น 2 ตัว เท่านั้น ซึ่งทำให้องค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่สรุปได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนได้ แต่ระบบดังกล่าวจะต้องเป็นระบบที่มีข้อเด่นเพียงแค่ 2 ตัว เท่านั้น ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตควรมีการพัฒนาองค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพ เพื่อให้สามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนและมีจำนวนข้อเด่นมากกว่า 2 ตัว ได้

- การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญชาตญาณขนาดใหญ่ นอกจากวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสแล้ว ยังมีอีกหลากหลายวิธี เช่น วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ วิธีฟังก์ชันพหุนาม เกณฑ์ของโพพอฟ และเกณฑ์วงกลม เป็นต้น ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตควรดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยเลือกใช้วิธีการอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้และแนวทางในการวิเคราะห์เสถียรภาพให้มีความหลากหลายในแง่ของวิธีการที่สามารถเลือกใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้ โดยไม่จำกัดอยู่ที่วิธีการใดวิธีการหนึ่ง

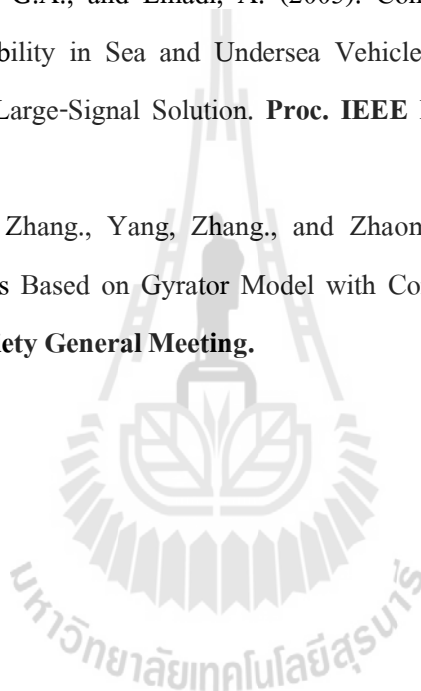
## รายการอ้างอิง

- 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

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);
% กำหนดค่าตอปรับเริ่มต้นและค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้
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);

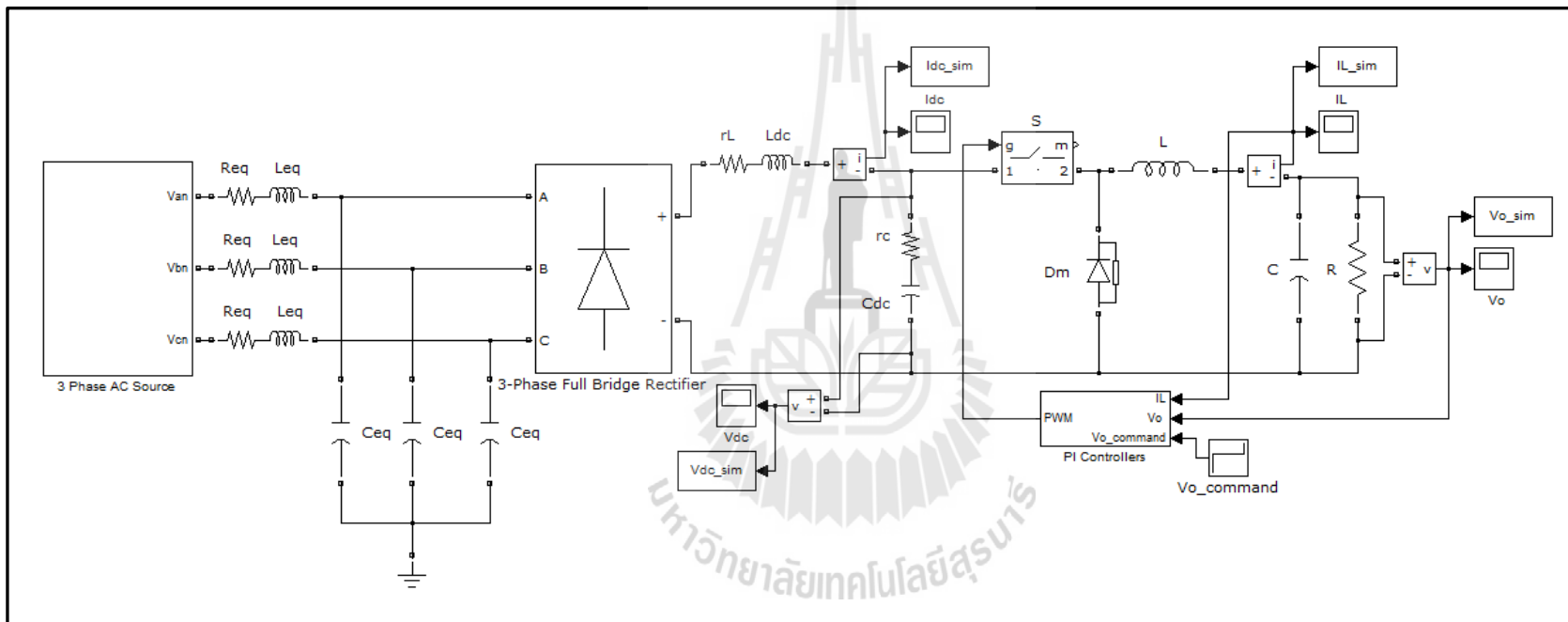
```





ภาคผนวก ข

ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB



รูปที่ ข.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคค์ที่มีการควบคุม