

**การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่
ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว**
Large Signal Stability Analysis
of Three-Phase Bridge Rectifier with Constant Power Loads

อภิชัย สุยะพันธุ์ กองพัน อารีรักษ์* และกองพล อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Apichai Suyapan Kongpan Areerak* and Kongpol Areerak

Power electronics, Energy, Machines, and Control Research Group

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และการวิเคราะห์ระนาบเฟส โดยที่การทำให้เป็นเชิงเส้นเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก ในขณะที่การวิเคราะห์ระนาบเฟสเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีที่นำเสนอในบทความนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน และการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้อง ทั้งในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั่นไหวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองได้อีกด้วย

คำสำคัญ: การวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ การวิเคราะห์ระนาบเฟส วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ABSTRACT

This paper presents the large signal stability analysis of three-phase bridge rectifier with constant power load using linearization technique and phase-plane analysis. The linearization technique is a small signal stability analysis, while the phase-plane analysis is a large signal stability analysis. The analytical results from linearization technique are compared with those from phase-plane analysis. The intensive time-domain simulation using MATLAB is used to verify the analytical results. The results show that the stability analysis using linearization technique cannot provide an

accurate result for both small-signal and large-signal conditions. Otherwise, the phase-plane analysis can provide an accurate result with a good oscillation prediction of DC-link filter.

Keyword: Large Signal Stability Analysis, Phase-Plane Analysis, Three-Phase Bridge Rectifier, Constant Power Loads

1. บทนำ

โดยทั่วไป โหลดของระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ โหลดแรงดันไฟฟ้าคงตัว (constant voltage loads : CVL) และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power loads : CPL) โดยโหลดแรงดันไฟฟ้าคงตัวเป็นโหลดที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าคงที่สำหรับการทำงาน ยกตัวอย่างเช่น หลอดไส้ (incandescent lamp) โหลดตัวต้านทาน เป็นต้น ในขณะที่โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเป็นพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลัง เช่น วงจรแปลงผันเอชเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอช และเอชเป็นเอช ที่มีการควบคุมสัญญาณขาออกให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น วงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุมแรงดันสัญญาณขาออก วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมความเร็วรอบ เป็นต้น [1-3] ซึ่งในปัจจุบัน โหลดของระบบไฟฟ้ากำลังโดยส่วนใหญ่จะเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังมีประสิทธิภาพสูง การดูแลบำรุงรักษาต่ำ และสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย จึงทำให้ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย แต่วงจรแปลงผันกำลังเมื่อมีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดที่มีกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดในลักษณะนี้ จะมีลักษณะเป็นค่าตัวต้านทานติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบได้ [4-8] ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นแบบกำลังไฟฟ้าคงตัวจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก เนื่องจากถ้าระบบไฟฟ้ากำลังขาดเสถียรภาพอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุม หรือส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบได้ และโหลดในลักษณะนี้นอกจากจะส่งผล

ต่อเสถียรภาพของระบบดังที่กล่าวไปในข้างต้นแล้วยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearities) เกิดขึ้น กล่าวคือ เป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear systems) จากงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบัน การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) ซึ่งเป็นวิธีการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในระบบให้มีความเป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) อันดับหนึ่ง จากนั้นใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ [5-10] โดยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด แต่มีข้อจำกัดคือ ถ้าค่าเจาะจงอยู่บนแกนจินตภาพจะไม่สามารถสรุปได้ว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นมีเสถียรภาพหรือขาดเสถียรภาพ [10] ซึ่งความไม่ชัดเจนดังกล่าวอาจทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้ และนอกจากนั้นแล้ววิธีการนี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (small signal stability analysis) ซึ่งทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพมีความถูกต้องเฉพาะในช่วงการทำงานที่แคบ (small range operation) ถ้าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด อาจทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้เช่นกัน นอกจากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นแล้ว จากงานวิจัยเพียงบางส่วนในอดีตจนถึงปัจจุบัน การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นยังสามารถทำได้โดยอาศัยวิธีการแบบไม่เป็นเชิงเส้น หรือวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ (large signal stability analysis) ซึ่งมีหลากหลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase-plane analysis) วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ

(Lyapunov's direct method) วิธีฟังก์ชันพหุนาม (describing function) เกณฑ์ของโปพอฟ (Popov's criterion) และเกณฑ์วงกลม (circle criterion) เป็นต้น [9-13] โดยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรงจึงสามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพได้ในช่วงการทำงานที่กว้าง และให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและโหลดของระบบมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การวิเคราะห์เสถียรภาพจะเริ่มต้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จากนั้นจะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส โดยบทความนี้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย มีการคำนวณไม่ซับซ้อน และให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส เพื่อแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นบทความนี้จะเลือกวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ เพื่อลดความผิดพลาดดังกล่าว และทำให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากวิธีที่นำเสนอในบทความนี้จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้องทั้งในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วย

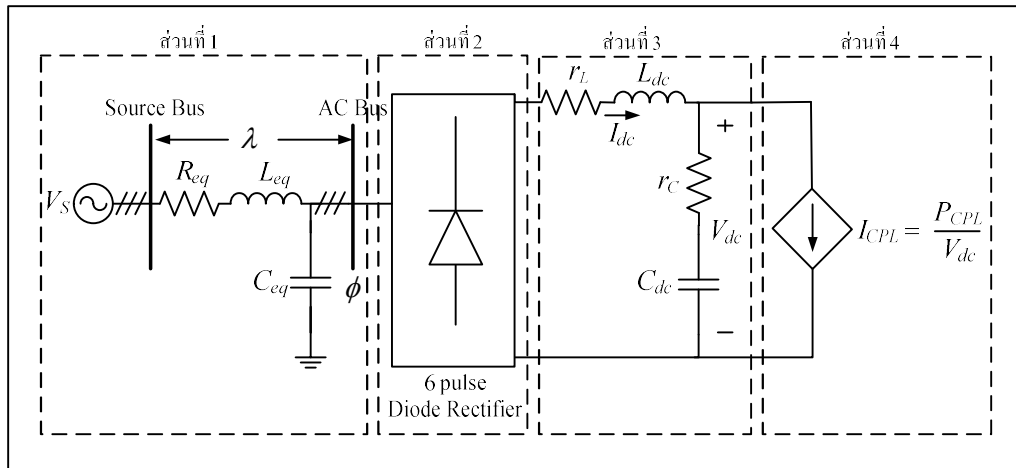
วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั่นไหวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองได้อีกด้วย

บทความนี้ประกอบไปด้วยสี่ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นบทนำ ส่วนที่สองเป็นการอธิบายระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ส่วนที่สามกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพ และการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ และส่วนที่สี่เป็นสรุปเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยในอนาคต

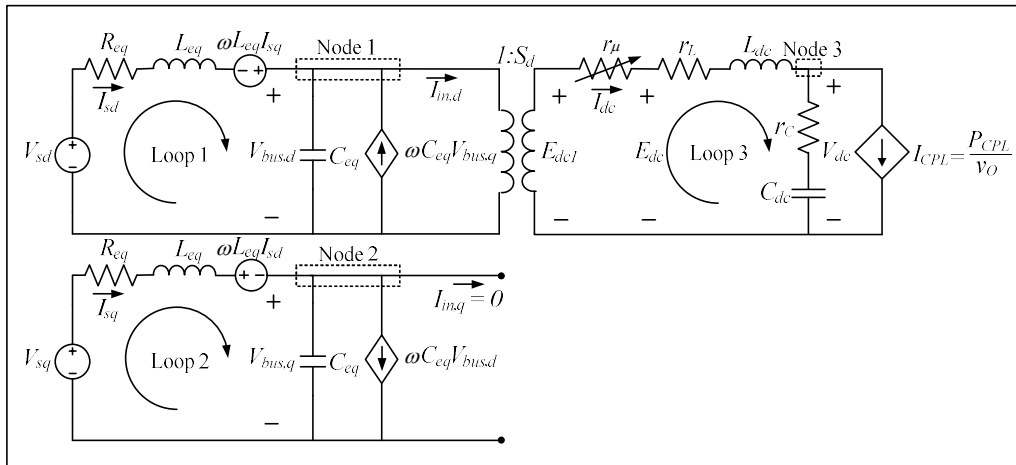
2. ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทความนี้คือ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟสแบบสมดุล โดยที่ V_s คือแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบสมดุล R_{eq} , L_{eq} และ C_{eq} คือความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้าของสายส่งกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ ส่วนที่ 2 ไดโอดเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ ส่วนที่ 3 วงจรกรอง โดยที่ L_{dc} , C_{dc} , r_L และ r_C คือ ความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า ความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ และความต้านทานภายในตัวเก็บประจุ ของวงจรกรองตามลำดับ ซึ่งความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุไฟฟ้า ของสายส่งกำลังไฟฟ้าและวงจรกรอง จะสมมติให้มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นและมีค่าคงที่ เพื่อลดความยุ่งยากและความซับซ้อนในการวิเคราะห์เสถียรภาพ และส่วนที่ 4 แหล่งจ่ายกระแสไม่อิสระแบบอุดมคติ ซึ่งใช้แทนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติที่ต่อขนานกับระบบผ่านวงจรกรอง โดยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวนี้จะส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น

จากการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีดีคิว (DQ Method) และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ได้ดังรายละเอียดที่นำเสนอไว้ใน [14] จะได้ว่าวงจรสมมูล



รูปที่ 1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ



รูปที่ 2 วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานแกนหมุนดีคิว

อย่างง่ายของระบบไฟฟ้าที่พิจารณานแกนหมุนดีคิว ดังแสดงในรูปที่ 2 และจากการวิเคราะห์วงจรสมมูลอย่างง่ายที่ได้ด้วยกฎของเคอร์ชอฟฟ์ จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-invariant model) ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ แสดงได้ดังสมการที่ (1) ซึ่งจากสมการจะสังเกตได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยพจน์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือ $\frac{P_{CPL}}{C_{dc} V_{dc}}$ ซึ่งปรากฏอยู่ในสมการ $\dot{I}_{dc}$ และ $\dot{V}_{dc}$ ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้จึงเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

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

โดยที่ V_m คือค่ายอดแรงดันเฟสที่แหล่งจ่าย λ คือมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่าย (Source Bus) และบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Bus)

คำนวณได้โดยอาศัยการนำทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้า (power flow) มาวิเคราะห์ระบบทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งรายละเอียดได้นำเสนอไว้ใน [14] ด้วยเช่นกัน และ r_μ คือความต้านทานที่ใช้แทนผลจาก L_{eq} ทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ส่งผลให้เกิดมุมความเหลื่อมขึ้น ซึ่งทำให้แรงดันสัญญาณขาออกของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ลดลง โดยความต้านทาน r_μ นี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) เมื่อ ω คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

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

3. การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

กำหนดให้พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทความนี้แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวได้มาจากการพิจารณาวจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังขนาดกันดังที่นำเสนอไว้ใน [8]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

พารามิเตอร์	ค่า
V_s	230 V _{rms/phase}
f	50 Hz
R_{eq}	0.1 Ω
L_{eq}	24 μ H

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า
C_{eq}	2 nF
r_L	0.1 Ω
L_{dc}	7.5 mH
r_C	0.5 Ω
C_{dc}	1000 μ F

3.1 การทำให้เป็นเชิงเส้น

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น จะเริ่มต้นจากการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในระบบให้มีความเป็นเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง จากนั้นจะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านวิธีการพื้นฐานของทฤษฎีบทควบคุมที่เป็นเชิงเส้น นั่นคือ ทฤษฎีบทค่าเจาะจง [5-10] เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นจะได้ว่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ (1) สามารถทำให้เป็นเชิงเส้นได้โดยแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นแสดงได้ดังสมการที่ (3) ดังนี้

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

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 $\mathbf{D}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ คือเมตริกซ์จาโคเบียน (jacobian matrix)

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

ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_0$ และค่าตัวแปรขาเข้า $\mathbf{u}_0$ ที่จุดปฏิบัติงานที่พิจารณา โดยจุดปฏิบัติงานหรือจุดสมดุล (operating points/equilibrium points) ของระบบคำนวณได้จาก $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ผ่านการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงจะพิจารณาค่าเจาะจง (eigenvalues) ของเมตริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ที่แสดงได้ดังสมการที่ (4) ซึ่งจากสมการจะพบว่า เมตริกซ์ $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ มีค่าขึ้นอยู่กับค่าของแรงดันสัญญาณขาออกดีซีที่จุดปฏิบัติงาน ($V_{dc,0}$) ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถคำนวณได้จากการคำนวณหาจุดปฏิบัติงานของระบบ โดยกำหนดให้ $\dot{I}_{sd}, \dot{I}_{sq}, \dot{V}_{bus,d}, \dot{V}_{bus,q}, \dot{I}_{dc}$ และ $\dot{V}_{dc}$ ในสมการที่ (1) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ และค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

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

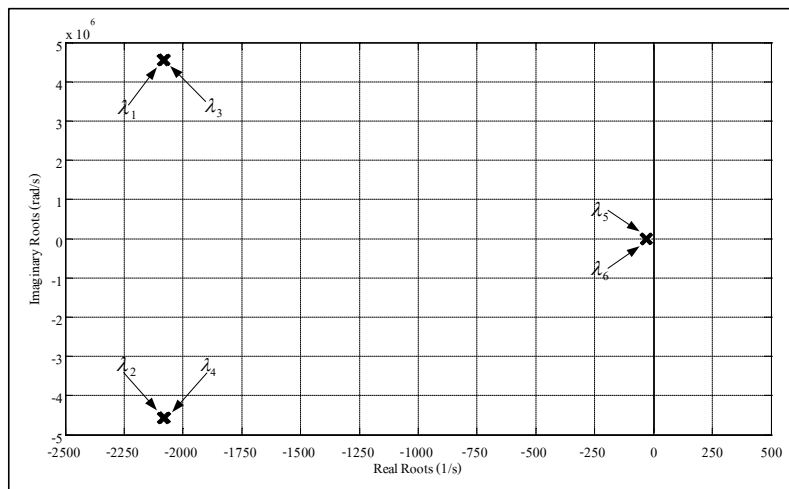
โดยที่ λ คือ ค่าเจาะจงของระบบ

ดังนั้นระบบจะมีเสถียรภาพ ถ้าส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่าน้อยกว่าศูนย์ เงื่อนไขดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (6)

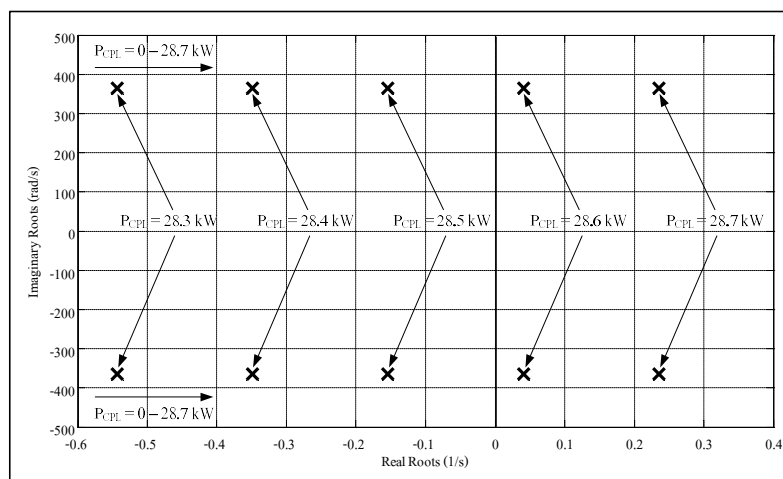
$$\text{Re}(\lambda_i) < 0 \quad (6)$$

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

ดังนั้นจากเมตริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ดังสมการที่ (4) และค่า $V_{dc,0}$ ที่คำนวณได้ จะสามารถคำนวณหาค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ (P_{CPL}) มีค่าเท่ากับ 15 kW เส้นทางการเดินของค่าเจาะจงแสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วยค่าเจาะจง $\lambda_1 - \lambda_6$ โดยที่ค่าเจาะจง λ_5 และ λ_6 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ L_{dc} และ C_{dc} ของวงจรกรอง เนื่องจากค่าเจาะจงดังกล่าวอยู่ตรงตำแหน่งที่ใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) ของระบบ ซึ่งคำนวณได้จาก $1/\sqrt{L_{dc}C_{dc}} = 365.15$ เรเดียน/วินาที นั้นเป็นค่าเจาะจงเด่น (dominant eigenvalues) หรือเป็นขั้วเด่น (dominant pole) ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยค่าเจาะจงเด่นหรือค่าขั้วเด่นนี้จะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าเจาะจงเด่นของระบบได้ ซึ่งเส้นทางการเดินของค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง 28.7 kW แสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่า



รูปที่ 3 ค่าเจาะจง เมื่อ $P_{CPL} = 15$ kW



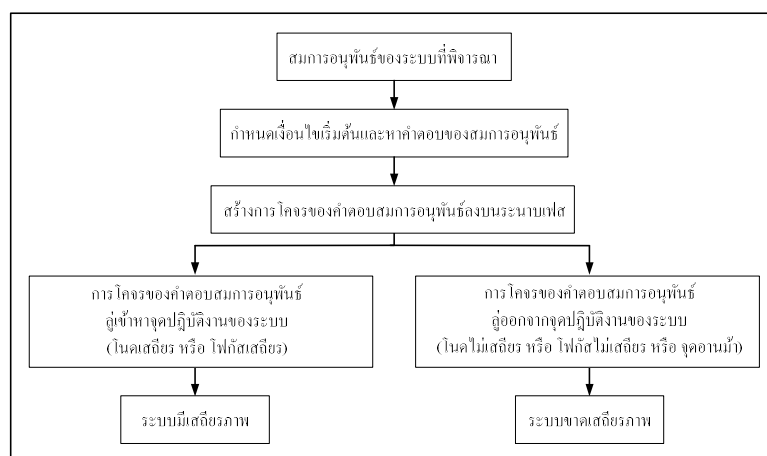
รูปที่ 4 ค่าเจาะจงที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

เมื่อ P_{CPL} มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 28.6 kW ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นของระบบจะมีค่ามากกว่าศูนย์ ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่น่าเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (6) ที่กล่าวไว้ว่า ระบบจะมีเสถียรภาพ ถ้าส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบจะขาดเสถียรภาพ จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 จะขาดเสถียรภาพเมื่อ P_{CPL} มีค่ามากกว่า 28.5 kW

3.2 การวิเคราะห์ระนาบเฟส

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสเป็นวิธีการทางกราฟิกที่มีแนวคิดพื้นฐานคือการสร้างวิถีการโคจร (motion trajectory) ที่สัมพันธ์

กับเงื่อนไขเริ่มต้น (initial conditions) ต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน ลงบนปริภูมิสถานะ (state space) ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะของระบบสองตัว ซึ่งมีชื่อเรียกว่าระนาบเฟส (phase plane) โดยแต่ละวิถีการโคจรนั้นได้มาจากการหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ของระบบจากเงื่อนไขเริ่มต้นที่พิจารณา และมีชื่อเรียกว่า การโคจร (trajectory) ของคำตอบสมการอนุพันธ์ จากนั้นจะตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากวิถีการโคจรบนระนาบเฟสที่ได้ โดยถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์เข้าสู่หาจุดปฏิบัติงานของระบบ ไม่ว่าจะเป็นจุดปฏิบัติงานแบบโนดเสถียร หรือโฟกัสเสถียร ระบบจะมีเสถียรภาพ ในขณะที่ ถ้าการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลู่ออกจากจุดปฏิบัติงานของระบบ ไม่ว่าจะ



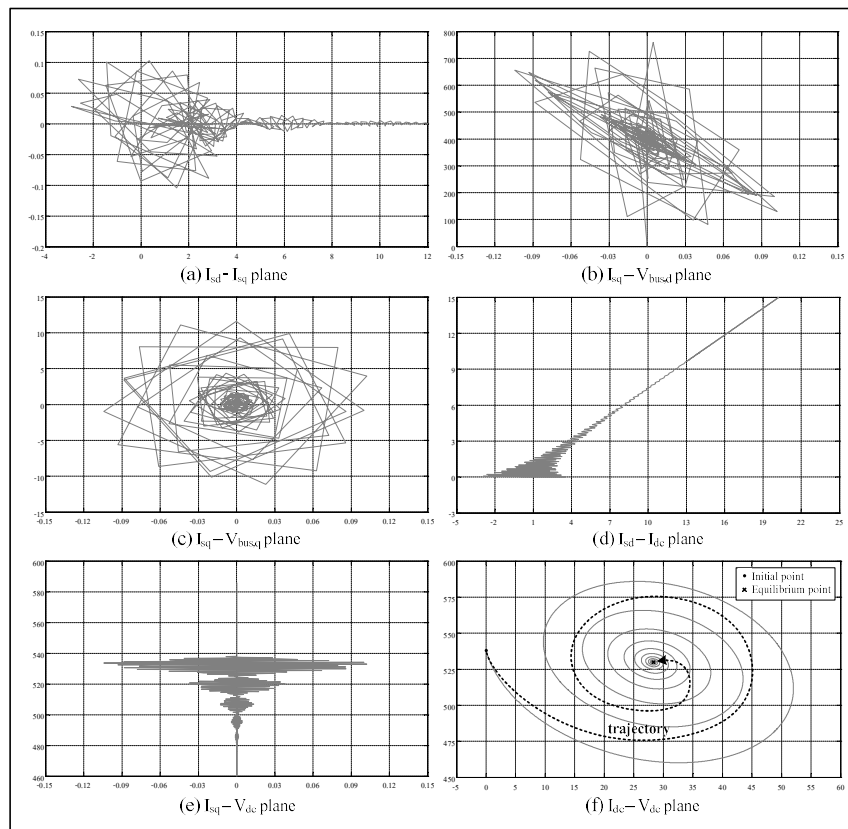
รูปที่ 5 แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส

จะเป็นจุดปฏิบัติงานแบบโนดไม่เสถียร หรือโฟกัสไม่เสถียร หรือจุดอานม้า ระบบจะขาดเสถียรภาพ [10-13] ดังนั้นจากแนวคิดพื้นฐานดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสได้ดังแผนภาพในรูปที่ 5

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสจะได้ว่า จากขั้นตอนดังแผนภาพในรูปที่ 5 การวิเคราะห์เสถียรภาพจะต้องสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสถานะ 2 ตัว ซึ่งจากสมการที่ (1) จะพบว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณานี้มีตัวแปรสถานะทั้งหมด 6 ตัว แต่จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นในหัวข้อที่ 3.1 พบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีข้อเด่นเพียงแค่ 2 ตัวเท่านั้น โดยข้อเด่นนี้จะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งข้อเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นข้อที่อยู่ที่ตรงตำแหน่งของวงจรรอง เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าของวงจรรอง (I_{dc} และ C_{dc}) ดังนั้นจึงทำให้ตัวแปรสถานะ I_{dc} (กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรรอง) และ V_{dc} (แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุของวงจรรอง) เป็นตัวแปรสถานะที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสจึงทำได้โดยอาศัยการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะ I_{dc} และ V_{dc} ได้ แต่การหาคำตอบของสมการอนุพันธ์เพื่อนำคำตอบที่ได้มาสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบ I_{dc} และ V_{dc} ยังต้องดำเนินการโดยอาศัยการหาคำตอบจากสมการอนุพันธ์ทั้ง 6 สมการ นั่นคือสมการ $\dot{I}_{sd}$, $\dot{I}_{sq}$, $\dot{V}_{bus,d}$, $\dot{V}_{bus,q}$, $\dot{I}_{dc}$ และ $\dot{V}_{dc}$ ดังสมการที่ (1) ซึ่งไม่สามารถจะดำเนินการโดยอาศัยการหาคำตอบจากเฉพาะสมการ $\dot{I}_{dc}$ และ $\dot{V}_{dc}$ โดยไม่สนใจสมการอื่น ๆ ที่เหลือไม่ได้ เพราะอาจจะทำให้คำตอบ

ของสมการอนุพันธ์ที่หาได้มีความคลาดเคลื่อนและส่งผลทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความผิดพลาดได้ เพื่อเป็นการยืนยันว่า การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของ I_{dc} และ V_{dc} สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ในขณะที่ยังคงการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่คู่ของ I_{dc} กับ V_{dc} ไม่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบได้ บทความนี้จึงดำเนินการสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ลงบนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ต่าง ๆ เมื่อ P_{CPL} มีค่าเท่ากับ 15 kW แสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่า การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่คู่ของ I_{dc} กับ V_{dc} ดังแสดงในรูปที่ 6(a) ถึงรูปที่ 6(e) ไม่สามารถตีความหรือให้ข้อมูลเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้ ในขณะที่ยังคงการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของ I_{dc} และ V_{dc} ดังแสดงในรูปที่ 6(f) มีการเคลื่อนที่เริ่มจากจุดเริ่มต้นและลู่เข้าหาจุดปฏิบัติงานแบบโฟกัสเสถียรของระบบเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีเสถียรภาพและเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3 จะพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน นั่นคือ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์บนระนาบของ I_{dc} และ V_{dc} สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสในบทความนี้จะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 การวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก และกรณีที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเมื่อโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่



รูปที่ 6 การโคจรของค่าตอบสนองการอนุพันธ์บนระนาบของตัวแปรสถานะคู่ต่าง ๆ เมื่อ $P_{CPL} = 15$ kW

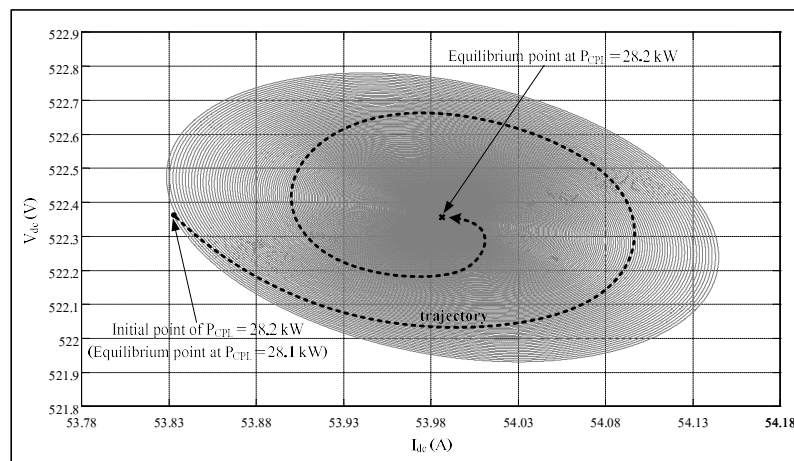
โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กอาจหมายถึง โหลดขนาดใดก็ได้ที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ยกตัวอย่างเช่น มีการเปลี่ยนแปลงทีละ 100 W ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงในหน่วย kW ซึ่งในทางปฏิบัติ การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและขนาดใหญ่ที่ส่งผลทำให้ระบบขาดเสถียรภาพของแต่ละระบบไฟฟ้ามีขนาดที่แตกต่างกันออกไปและไม่สามารถจำแนกหรือแยกแยะได้อย่างแน่ชัด อีกทั้งไม่สามารถทราบได้ว่า การเปลี่ยนแปลงแค่นั้นจะทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพเกิดความคลาดเคลื่อนถ้าใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ดังนั้นบทความนี้จะเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ระบบเฟส ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ทั้งในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาทั้ง 2 กรณี แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

กรณีที่ 1: การวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก การเปลี่ยนแปลงโหลดในกรณีนี้จะอาศัยการเพิ่มค่า P_{CPL} ทีละ 100 W ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งจะพบว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาขาดเสถียรภาพ ซึ่งเป็นการดำเนินการเช่นเดียวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นที่คำนวณหาค่าเจาะจงของระบบในทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงค่า P_{CPL} 100 W ดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นหลักการของการวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีนี้คือ จุดปฏิบัติงานของระบบ ($\mathbf{x}_0$) ที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้างดตัวแบบอุดมคติ ณ สภาวะอยู่ตัวปัจจุบัน (P_{CPL}) จะถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบ ($\mathbf{x}(0)$) ที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้างดตัวแบบอุดมคติที่ถูกเพิ่มค่าขึ้นจากค่าเดิมอีก 100 W ($P_{CPL+100} = P_{CPL} + 100$ W) นั่นคือการกำหนดให้ $\mathbf{x}(0)$ ของ $P_{CPL+100} = \mathbf{x}_0$ ของ P_{CPL} ดังนั้นจากสมการที่ (1) และจุดปฏิบัติงานของระบบ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดย

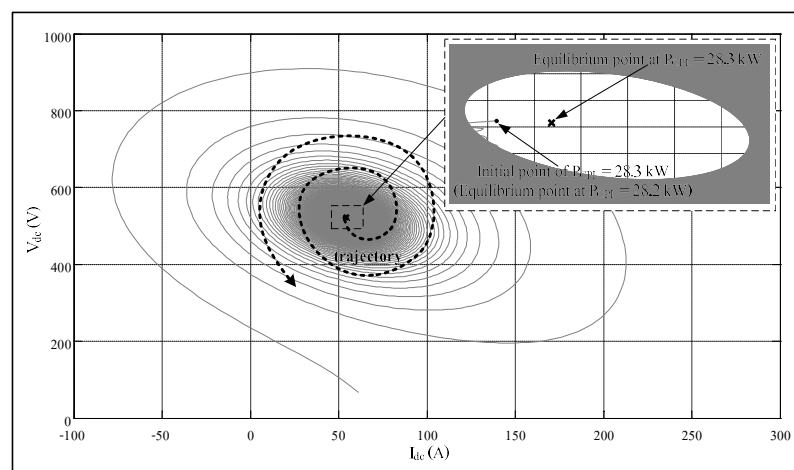
กำหนดให้ $\dot{I}_{sd}$, $\dot{I}_{sq}$, $\dot{V}_{bus,d}$, $\dot{V}_{bus,q}$, $\dot{I}_{dc}$ และ $\dot{V}_{dc}$ ในสมการที่ (1) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ จะสามารถสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW และเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW ได้ดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่า ในรูปที่ 7 เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์จะลู่เข้าหาจุดปฏิบัติงานแบบโพลัสเสถียรของระบบ ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพ ในขณะที่รูปที่ 8 นั้น เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์

จะลู่ออกจากจุดปฏิบัติงานแบบโพลัสไม่เสถียรของระบบมากยิ่งขึ้นอย่างไม่มีที่สิ้นสุดเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ จึงสามารถสรุปได้ว่า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพเมื่อ P_{CPL} มีค่ามากกว่า 28.2 kW

กรณีที่ 2: การวิเคราะห์เสถียรภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในกรณีนี้จะเป็นการพิจารณาว่า การเปลี่ยนแปลง P_{CPL} จาก 0 W ไปเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติค่าใดที่ส่งผลทำให้ระบบขาด



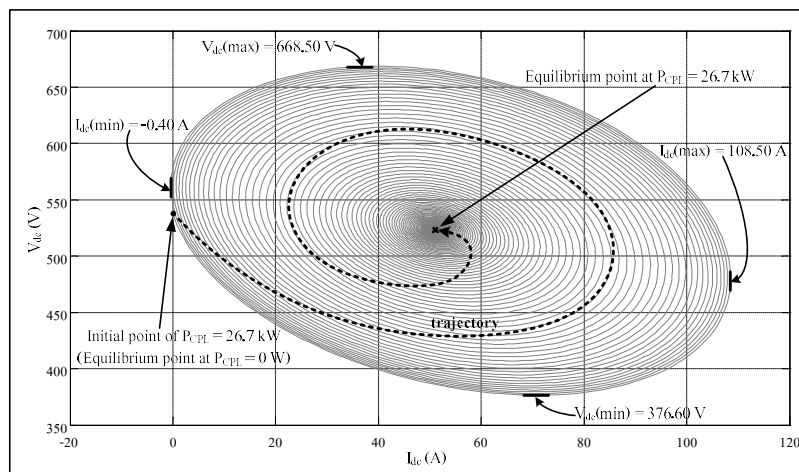
รูปที่ 7 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.1 kW ไปเป็น 28.2 kW



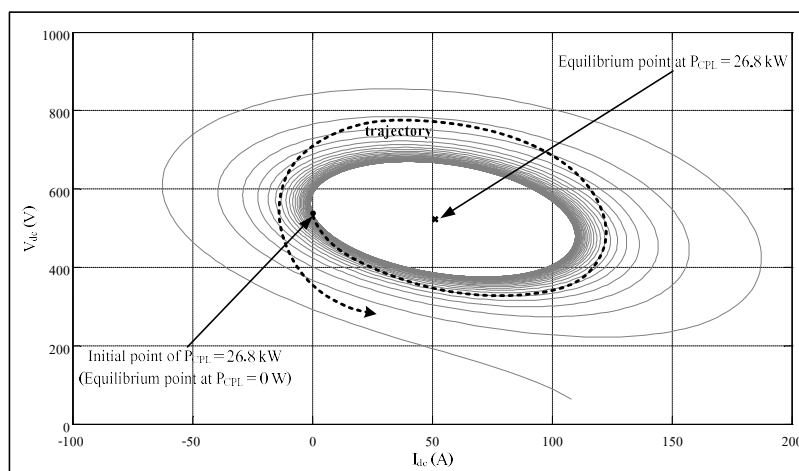
รูปที่ 8 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW

เสถียรภาพ ($P_{CPL,Unstable}$) โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลง โหลดเพียงครั้งเดียว กล่าวคือเป็นการเปลี่ยนแปลง โหลดจาก 0 W ไปเป็น $P_{CPL,Unstable}$ ดังนั้นหลักการของ การวิเคราะห์เสถียรภาพในกรณีนี้คือ จุดปฏิบัติงานที่ P_{CPL} มีค่าเท่ากับ 0 W จะถูกกำหนดให้เป็นจุดเริ่มต้น การทำงานให้กับระบบ นั่นคือกำหนดให้ $I_{sq}(0) = 0$ A, $I_{sq}(0) = 0$ A, $V_{bus,q}(0) = 0$ V, $V_{bus,q}(0) = 0$ V, $I_{dc}(0) = 0$ A และ $V_{dc}(0) = 537.99$ V ดังนั้นจากสมการที่ (1) และจุดเริ่มต้นการทำงานของระบบที่ได้กำหนด ไว้ข้างต้นจะสามารถสร้างการโคจรของคำตอบสมการ อนุพันธ์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ P_{CPL} มีการ เปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW และ

เปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW ได้ดังแสดงใน รูปที่ 9 และรูปที่ 10 ตามลำดับ โดยจะสังเกตได้ว่า ในรูปที่ 9 เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไป เป็น 26.7 kW การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ จะลู่เข้าหาจุดปฏิบัติงานแบบโพลัสเสถียรของระบบ ดังนั้นที่จุดปฏิบัติงานนี้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะมี เสถียรภาพ ในขณะที่ รูปที่ 10 นั้น เมื่อ P_{CPL} มีการ เปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW การโคจรของ คำตอบสมการอนุพันธ์จะลู่ออกจากจุดปฏิบัติงานแบบ โพลัสไม่เสถียรของระบบมากยิ่งขึ้นอย่างไม่สิ้นสุด เมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาด เสถียรภาพที่จุดปฏิบัติงานนี้ จึงสามารถสรุปได้ว่า



รูปที่ 9 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ P_{CPL} มีเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW



รูปที่ 10 การโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ เมื่อ P_{CPL} มีเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW

ภายใต้การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ เมื่อ P_{CPL} มีค่ามากกว่า 26.7 kW

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสสามารถสรุปได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 1 จะขาดเสถียรภาพ เมื่อ P_{CPL} มีค่ามากกว่า 28.2 kW ซึ่งข้อสรุปนี้จะเป็นจริงสำหรับการเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กเท่านั้น ในขณะที่ การเปลี่ยนแปลงโหลดของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ระบบจะขาดเสถียรภาพ เมื่อ P_{CPL} มีค่ามากกว่า 26.8 kW

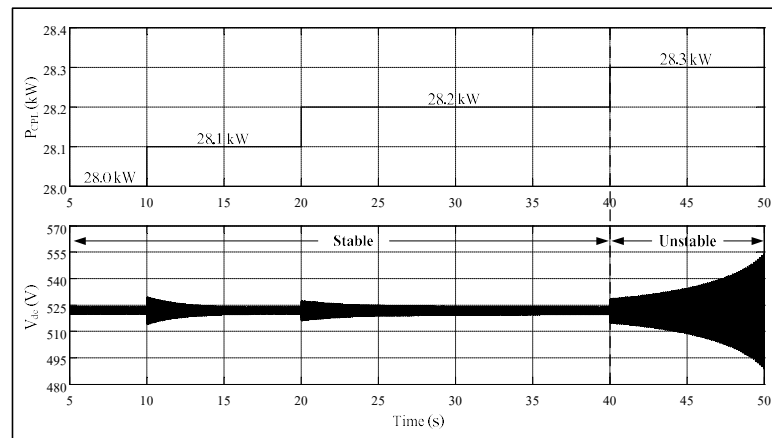
การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากจะสามารถคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบได้แล้ว ยังสามารถประมาณการสั่นไหวสูงสุดของสัญญาณก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงานได้อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW จากกราฟการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ในรูปที่ 9 จะสามารถประมาณการสั่นไหวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองได้ดังนี้ I_{dc} จะมีการสั่นไหวสูงสุดอยู่ในช่วง -0.40 ถึง 108.50 A และ V_{dc} จะมีการสั่นไหวสูงสุดอยู่ในช่วง 376.60 ถึง 668.50 V ก่อนที่การสั่นไหวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบ

3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์

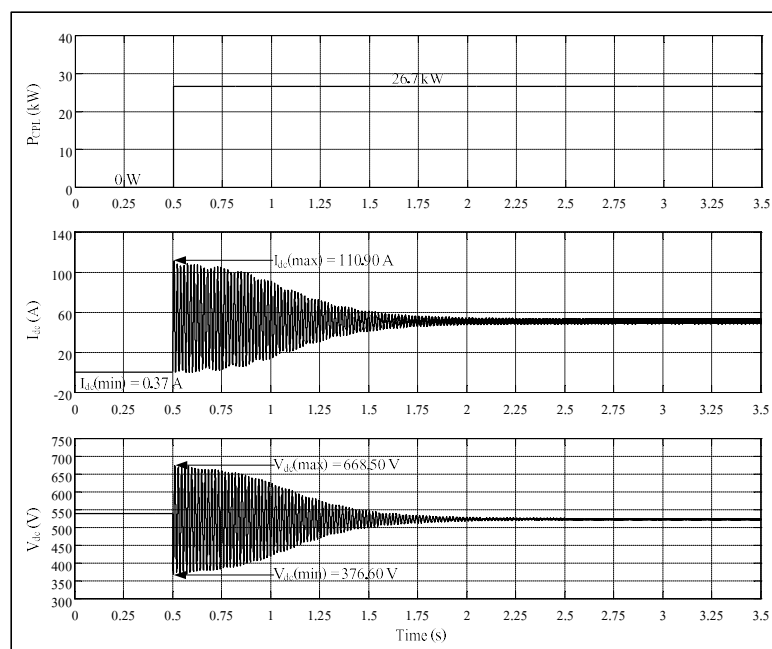
การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพในบทความนี้อาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งผลการยืนยันการขาดเสถียรภาพ แสดงได้ดังรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 13 โดยรูปที่ 11 เป็นการยืนยันการขาดเสถียรภาพในกรณีที่ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ในขณะที่ รูปที่ 12 และรูปที่ 13 นั้นเป็นการยืนยันการมีเสถียรภาพและการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่

จากรูปที่ 11 ซึ่งเป็นการยืนยันการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก จะสังเกตได้ว่า เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 28.2 kW ไปเป็น 28.3 kW ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4 จะพบว่า มีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นคือ 300 W หรือคิดเป็น 1.06 % ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 จะพบว่า มีความสอดคล้องกัน

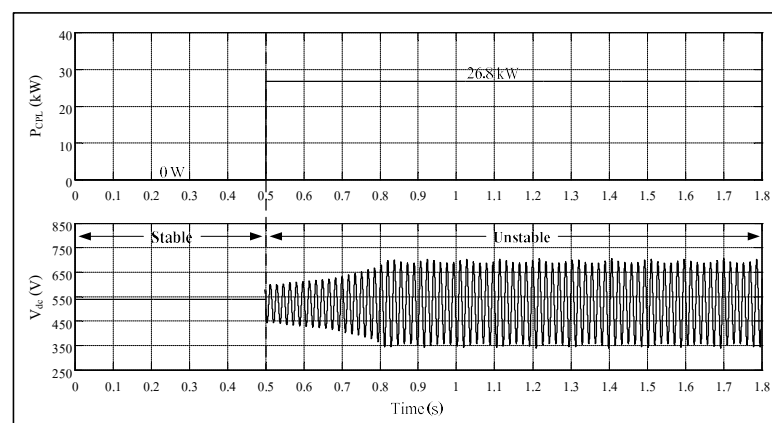
จากรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ซึ่งเป็นการยืนยันการมีเสถียรภาพและการขาดเสถียรภาพของระบบ ในกรณีที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่จะสังเกตได้ว่า ในรูปที่ 12 เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะยังคงมีเสถียรภาพ ในขณะที่ รูปที่ 13 นั้น เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟสดังแสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 จะพบว่า มีความสอดคล้องกัน แต่เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นดังแสดง ในรูปที่ 4 จะพบว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้ระบุว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะขาดเสถียรภาพ เมื่อ P_{CPL} มีค่ามากกว่า 28.5 kW เท่านั้น นั่นหมายความว่าในกรณีที่ P_{CPL} มีค่าเท่ากับ 26.8 kW ระบบจะมีเสถียรภาพอย่างแน่นอน เนื่องจากส่วนจริงของค่าจะงมีค่าเป็นลบ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น มีความคลาดเคลื่อนของจุดการขาดเสถียรภาพเกิดขึ้น 1.8 kW หรือคิดเป็น 6.74 % ซึ่งถือว่าเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าค่อนข้างสูง



รูปที่ 11 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก



รูปที่ 12 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW



รูปที่ 13 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.8 kW

จากรูปที่ 12 นอกจากจะสามารถใช้ยืนยันการมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้แล้ว ยังสามารถใช้ยืนยันการประมาณการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดปฏิบัติงาน เมื่อ P_{CPL} มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0 W ไปเป็น 26.7 kW ได้อีกด้วย ซึ่งจากรูปจะสังเกตได้ว่า I_{dc} จะมีการสั้นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง 0.37 ถึง 110.90 A และ V_{dc} จะมีการสั้นไกวสูงสุดอยู่ในช่วง 368.80 ถึง 672.80 V ก่อนที่การสั้นไกวจะมีค่าลดลงจนกระทั่งเข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการวิเคราะห์ระบบไฟฟสดังแสดงในรูปที่ 9 จะพบว่า มีความใกล้เคียงกัน

ดังนั้นจากผลการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งหมดที่ได้รับการอธิบายไปในข้างต้น แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก ไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้องทั้งในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ได้ ซึ่งเกิดจากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นไม่สามารถที่จะกำหนดจุดเริ่มต้นหรือเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานให้กับระบบในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระบบไฟฟสสามารถที่จะกำหนดจุดเริ่มต้นหรือเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานของระบบในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระบบไฟฟสนั้นนอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองได้อีกด้วย

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น และ

การวิเคราะห์ระบบไฟฟส ผลจากการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นไม่สามารถให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้องทั้งในกรณีที่โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กและภายใต้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ ในขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระบบไฟฟส นอกจากจะให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถประมาณการสั้นไกวสูงสุดของสัญญาณของวงจรกรองได้อีกด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์ระบบไฟฟสเป็นวิธีการที่มีประโยชน์เป็นอย่างมากสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นสำหรับงานวิจัยในอนาคต เช่น ระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน หรือระบบราง ซึ่งเป็นระบบที่มีโหลดโดยส่วนใหญ่เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม ซึ่งโหลดในลักษณะนี้จะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟสดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Emadi and A. Khaligh, "Stabilizing Control of DC/DC Buck Converters with Constant Power Loads in Continuous Conduction and Discontinuous Conduction Modes Using Digital Power Alignment Technique," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 1, pp. 63–72, 2006.
- [2] A. Emadi, M. Ehsani, and J.M. Miller, "Vehicular Electric Power Systems: Land, Sea, Air, and Space Vehicles," Marcel Dekker, Inc., 2004.

- [3] S. Singh, D. Fulwani, and V. Kumar, "Robust sliding-mode control of dc/dc boost converter feeding a constant power load," *The Institution of Engineering and Technology (IET Power Electron) Journals*, vol. 8, pp. 1–8, July, 2015.
- [4] A. Emadi, B. Fahimi, and M. Ehsani, "On the Concept of Negative Impedance Instability in the More Electric Aircraft Power Systems with Constant Power Loads," *Proc. 34th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Columbia, 1999, pp. 689-699.
- [5] C. Rivetta, G.A. Williamson, and A. Emadi, "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*, pp. 313-320, 2005.
- [6] A. Emadi, A. Khaligh, C.H. Rivetta, and G.A. Williamson, "Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives," *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, vol. 55, pp. 1112-1125, July, 2006.
- [7] K-N. Areerak, S. Bozhko, G. Asher, L. de Lillo, and D.W.P. Thomas, "Stability Study for a Hybrid AC-DC More-Electric Aircraft Power System," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, pp. 329–347, January, 2012.
- [8] T. Sopapirm, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "Stability Analysis of AC Distribution System with Six-Pulse Diode Rectifier and Multi-Converter Power Electronic Loads," *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, pp. 2919-2928, November, 2011.
- [9] R. Matousek, I. Svarc, P. Pivonka, P. Osamera, and M. Seda, "Simple Methods for Stability Analysis of Nonlinear Control System," *Proceeding of the World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco, 2009, pp. 226-231.
- [10] J.E. Slotine, and W. Li, "Applied Nonlinear Control," Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
- [11] K. Hassan Khalil, "Nonlinear System," Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996.
- [12] D. Weijing, Z. Junming, Z. Yang, and Q. Zhaoming, "Large Signal Stability Analysis Based on Gyrator Model with Constant Power Load," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, United States, 2011, pp. 1-8.
- [13] A. Griffo, and J. Wang, "Large Signal Stability Analysis of 'More Electric' Aircraft Power Systems with Constant Power Loads," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, pp. 477–489, January, 2011.
- [14] T. Sopapirm, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, "Mathematical Model of a Three-Phase Diode Rectifier Feeding a Controlled Buck Converter," *International Review on Modeling and Simulation*, pp. 1426-1439, August, 2011.