

บทที่ 4

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

4.1 บทนำ

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

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

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

4.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

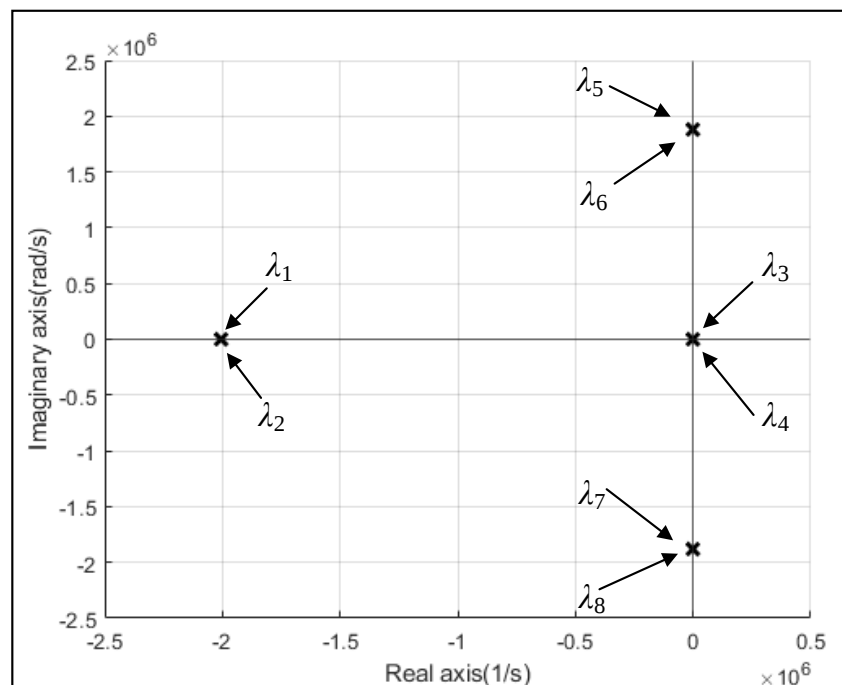
การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่เป็นเชิงเส้นซึ่งได้รับการพิสูจน์ไว้แล้ว ดังแสดงในสมการที่ (3-77) ของบทที่ 3 โดยสามารถคำนวณค่าเจาะจงได้จากสมการที่ (4-1) เมื่อ λ คือ ค่าเจาะจงของระบบ $\mathbf{I}$ คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ (identity matrix)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

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

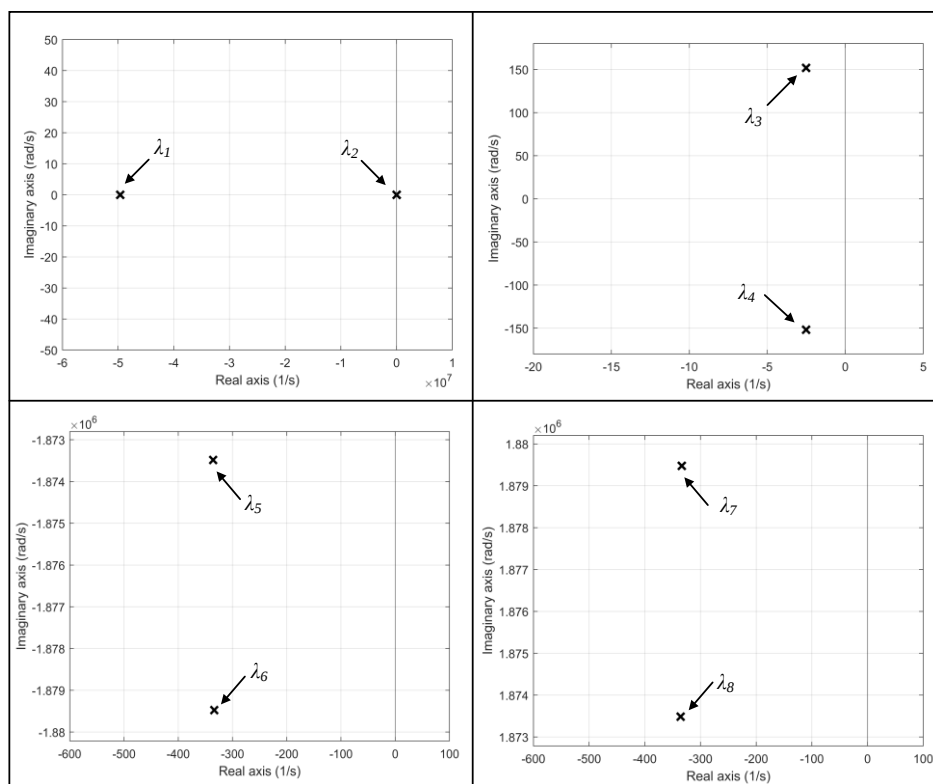
โดยเงื่อนไขการมีเสถียรภาพของระบบสามารถพิจารณาได้ดังนี้

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

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

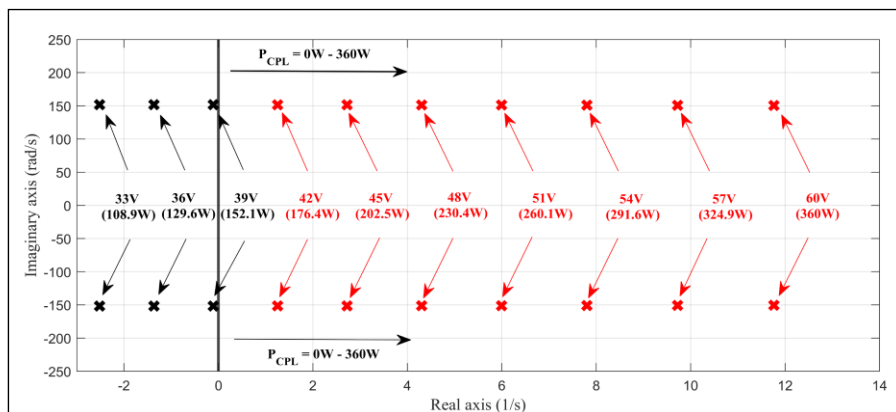


รูปที่ 4.1 ค่าเฉพาะทั้งหมดของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งของค่าเฉพาะของระบบ

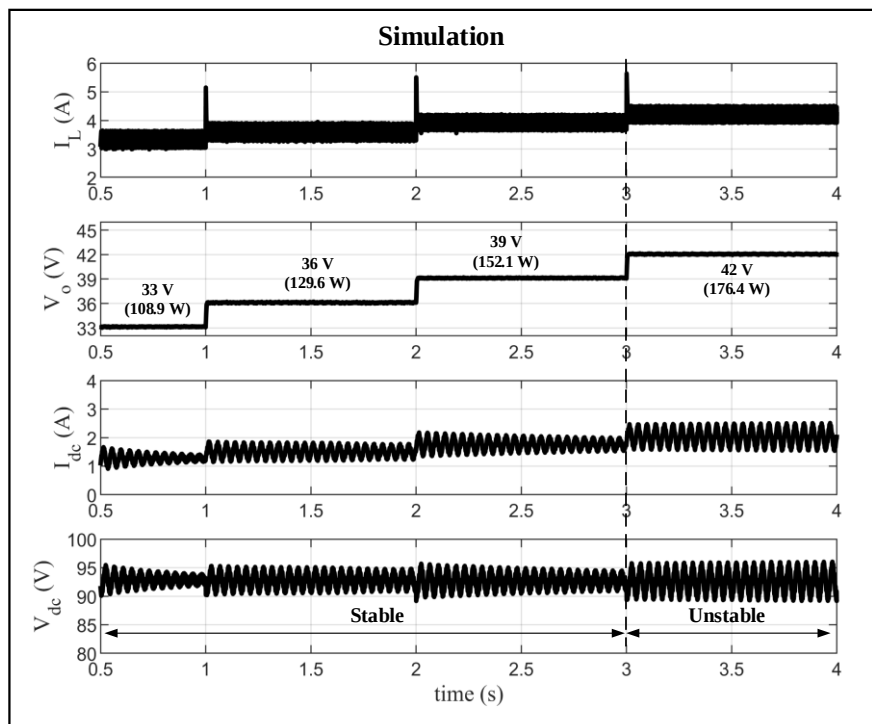
จากรูปที่ 4.2 จะพบว่า ค่าเฉพาะเด่นของระบบคือ λ_3 และ λ_4 เนื่องจากมีตำแหน่งอยู่ใกล้กับแกนจินตภาพมากที่สุด อีกทั้งขนาดของส่วนจริงยังมีความมากกว่าค่าส่วนจริงของค่าเฉพาะอื่น ๆ ถึง 10 เท่าอีกด้วย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของระบบควบคุมที่ระบุไว้ว่า อัตราส่วนของส่วนจริงของค่าเฉพาะที่ไม่มีนัยสำคัญกับค่าเฉพาะเด่นควรมีค่ามากกว่า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



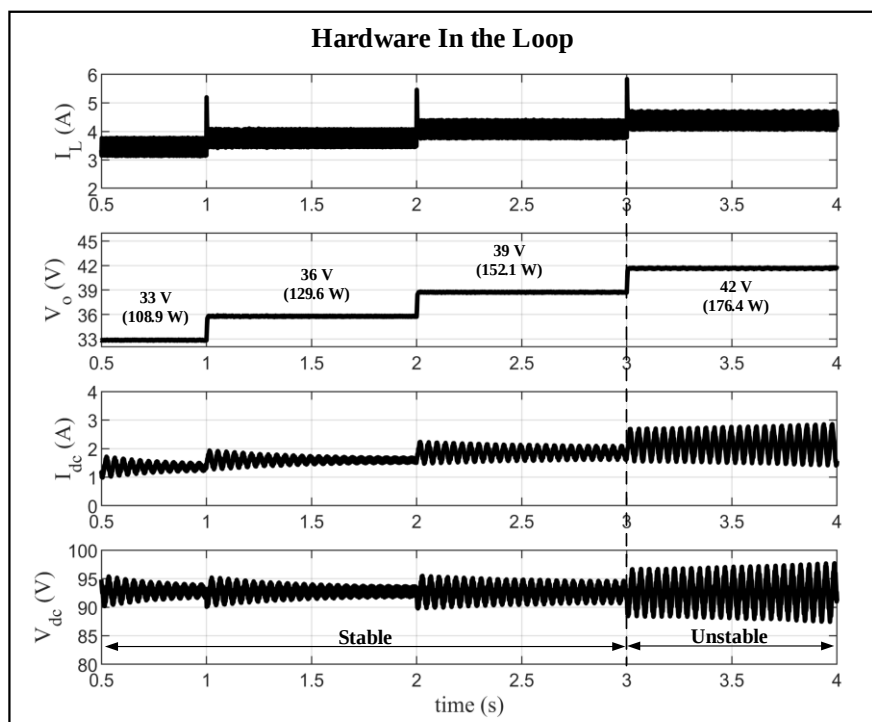
รูปที่ 4.3 ค่าเจาะจงเด่นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพ

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



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์



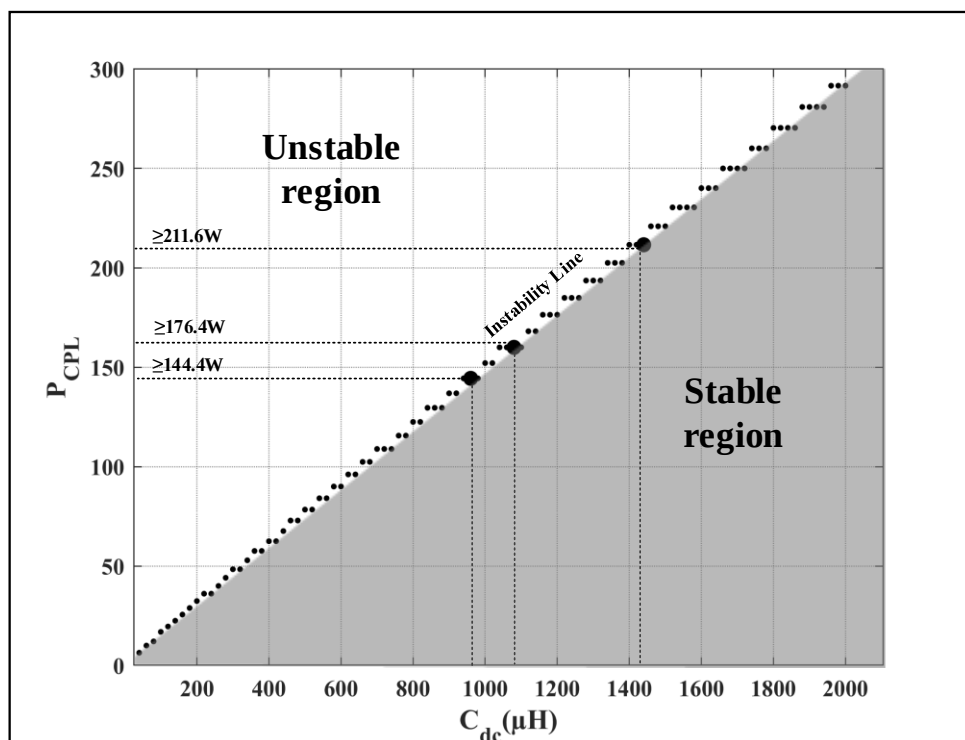
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป

4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

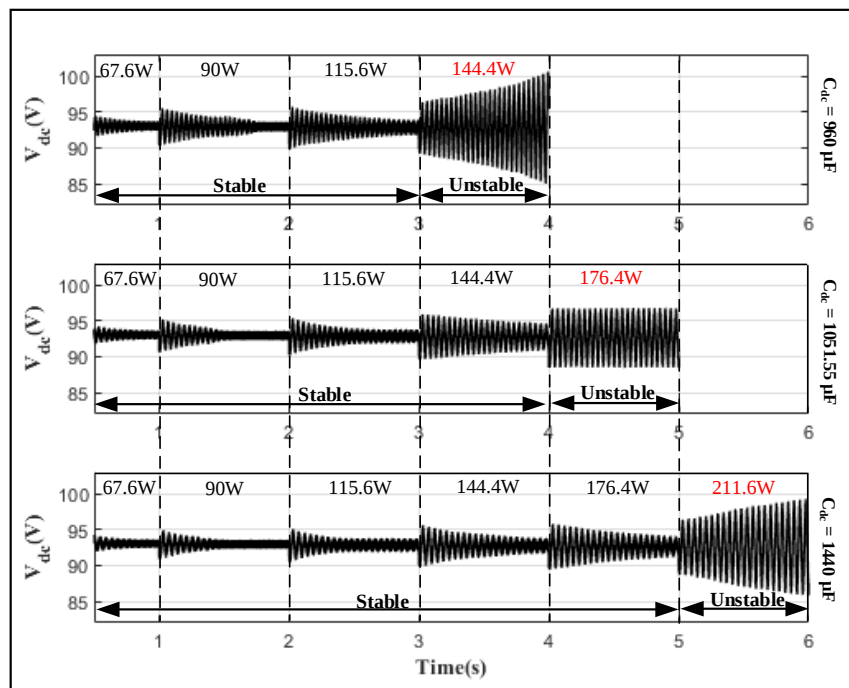
การขาดเสถียรภาพของระบบเกิดจากความต้านทานที่ติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ไปลดทอนค่าความหน่วงที่เป็นบวกของวงจรกรองจนกระทั่งระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยค่าความหน่วงดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองซึ่งเป็นค่าที่วิศวกรสามารถออกแบบและเลือกใช้ได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการศึกษาผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรก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

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

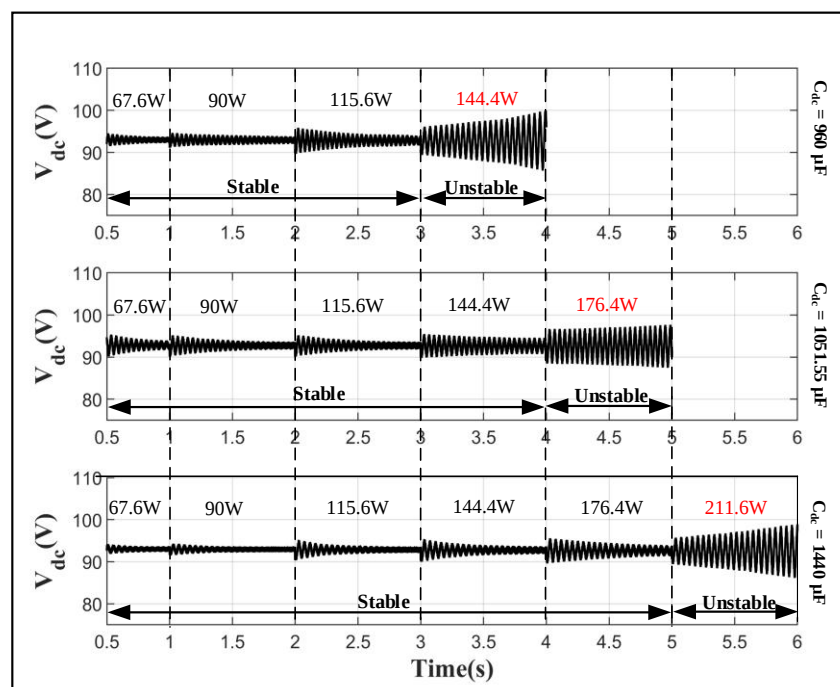
จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะได้เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง (C_{dc}) จาก 20 μF จนถึง 2000 μF ในขณะที่พารามิเตอร์อื่น ๆ ยังคงมีค่าเท่าเดิมดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 แสดงได้ดังรูปที่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



รูปที่ 4.6 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง



รูปที่ 4.7 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

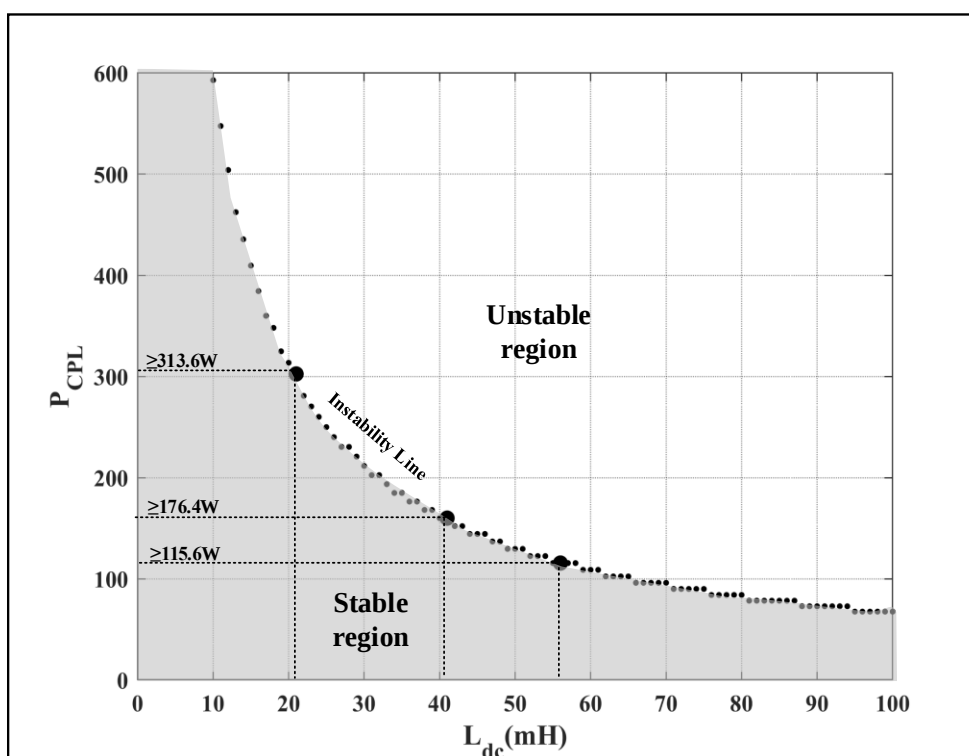


รูปที่ 4.8 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

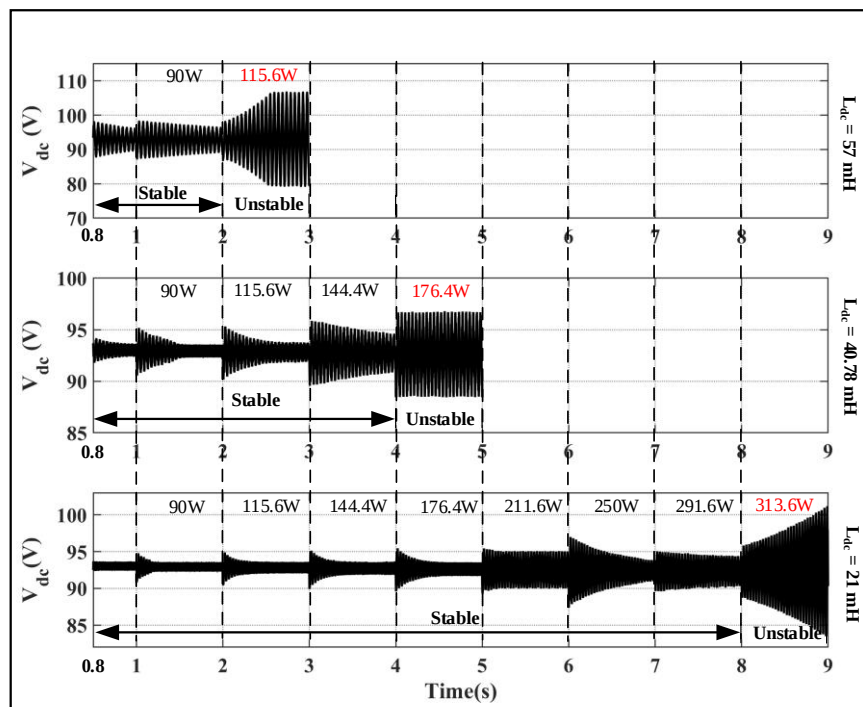
จากรูปที่ 4.6 จะพบว่า เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรอมมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพที่ค่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) ที่ค่าสูงขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากค่าความจุไฟฟ้าขนาด 1440 μF , 1051.55 μF และ 960 μF ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพเมื่อ P_{CPL} มีค่าเท่ากับ 2116 W, 1764 W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

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรกรอม

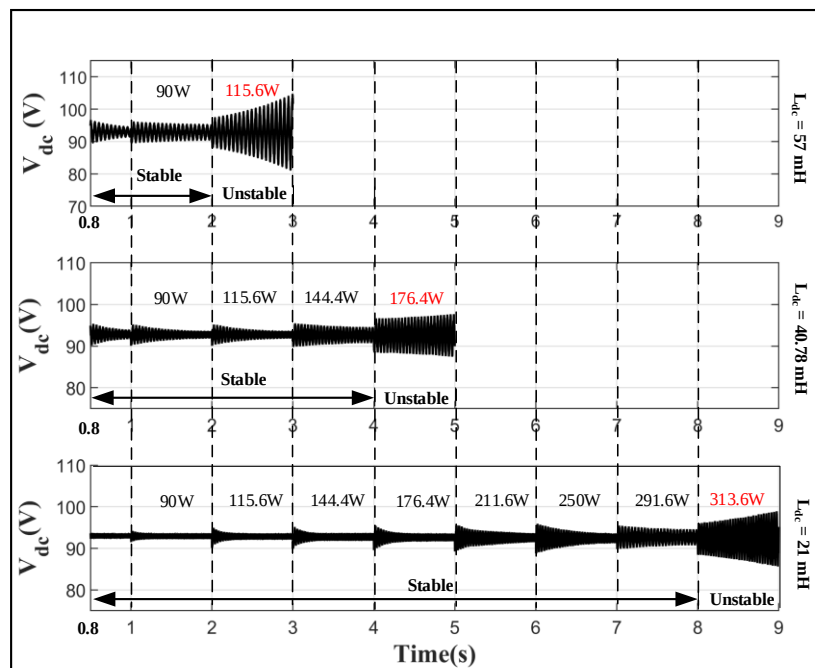
เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรกรอม (L_{dc}) จาก 1 mH จนถึง 100 mH ในขณะที่พารามิเตอร์อื่น ๆ ยังคงมีค่าเท่าเดิม ดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 แสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรกรอม



รูปที่ 4.10 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรกรอง



รูปที่ 4.11 การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำของวงจรกรอง

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

4.4 สรุป

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