

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

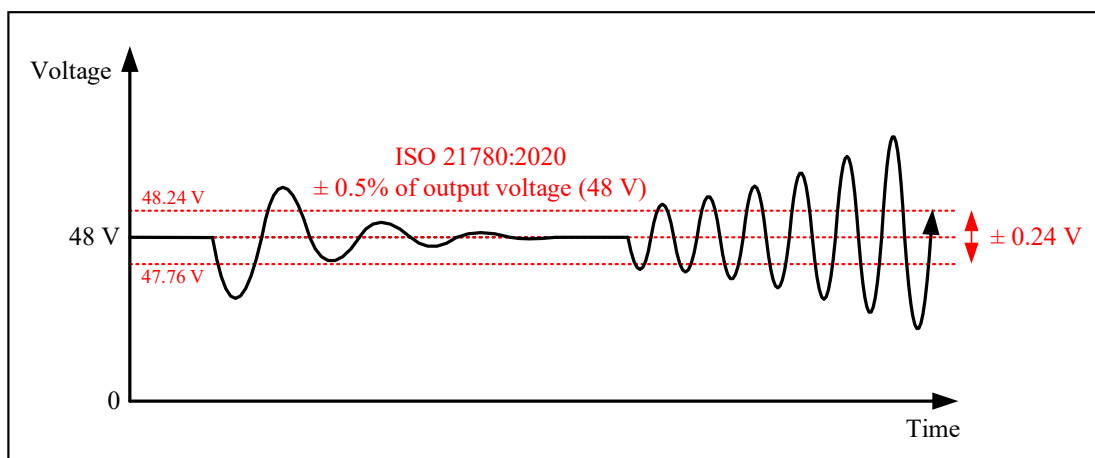
#### 4.1 บทนำ

การศึกษาและค้นคว้างานวิจัยในอดีตพบว่า โหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ ซึ่งหากระบบเกิดการขาดเสถียรภาพไม่เพียงแต่จะทำให้สมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมลดลง แต่อาจส่งผลทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบได้รับความเสียหายและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานได้ ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพื่อให้สามารถคาดการณ์จุดทำงานที่อาจเกิดการขาดเสถียรภาพภายใต้พิกัดของระบบ และหลีกเลี่ยงการทำงาน ณ จุดดังกล่าวได้ ดังนั้นในบทที่ 4 จึงนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งนำเสนอการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้งหมดจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพและการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ได้จะเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับเป็นแนวทางให้วิศวกรในการออกแบบระบบจักรยานไฟฟ้าเพื่อให้สามารถหลีกเลี่ยงจุดทำงานที่อาจเกิดการขาดเสถียรภาพของระบบได้

#### 4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในสมการที่ (3-72) ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา ร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง (อภิชัย สุยะพันธ์, 2558) เพื่อใช้คาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพและเพื่อหลีกเลี่ยงการทำงาน ณ จุดดังกล่าว อย่างไรก็ตามการพิจารณาข้อกำหนดของมาตรฐานเป็นสิ่งสำคัญ ทั้งนี้เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้วยมาตรฐาน ISO 21780:2020 ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับระบบไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้

ระดับแรงดัน 48 V โดยขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐานดังกล่าว (International Organization for Standardization, 2020) แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุตามมาตรฐาน ISO 21780:2020

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุตามมาตรฐาน ISO 21780:2020 จะถูกกำหนดให้การกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 0.5\%$  ของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 48 V หรือคิดเป็น  $\pm 0.24$  V อย่างไรก็ตามหากระบบเกิดการขาดเสถียรภาพจะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุมีขนาดสูงเกินขอบเขตที่มาตรฐานกำหนด อีกทั้งยังเป็นสาเหตุทำให้สมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมลดลง รวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบอาจได้รับความเสียหายและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 4.2.1 ดังนี้

#### 4.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น จากนั้นดำเนินการพิจารณาค่าเจาะจง (eigenvalues) ทั้งหมดของระบบ ซึ่งค่าเจาะจงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4-1) เมื่อ  $\lambda$  คือ ค่าเจาะจงของระบบ  $\mathbf{I}$  คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์ (identity matrix) และ  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  คือ เมทริกซ์จาโคเบียนของระบบที่เป็นเชิงเส้น

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

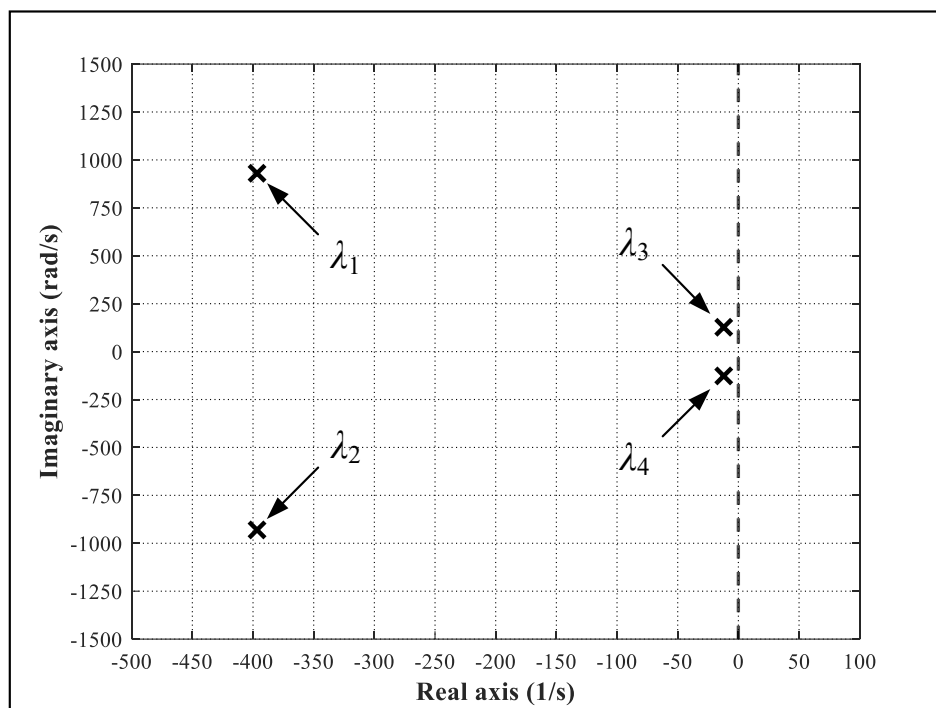
สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถพิจารณาได้จากเงื่อนไขการมีเสถียรภาพตามสมการที่ (4-2) ดังนี้

$$\operatorname{Re}(\lambda_i) < 0 \quad (4-2)$$

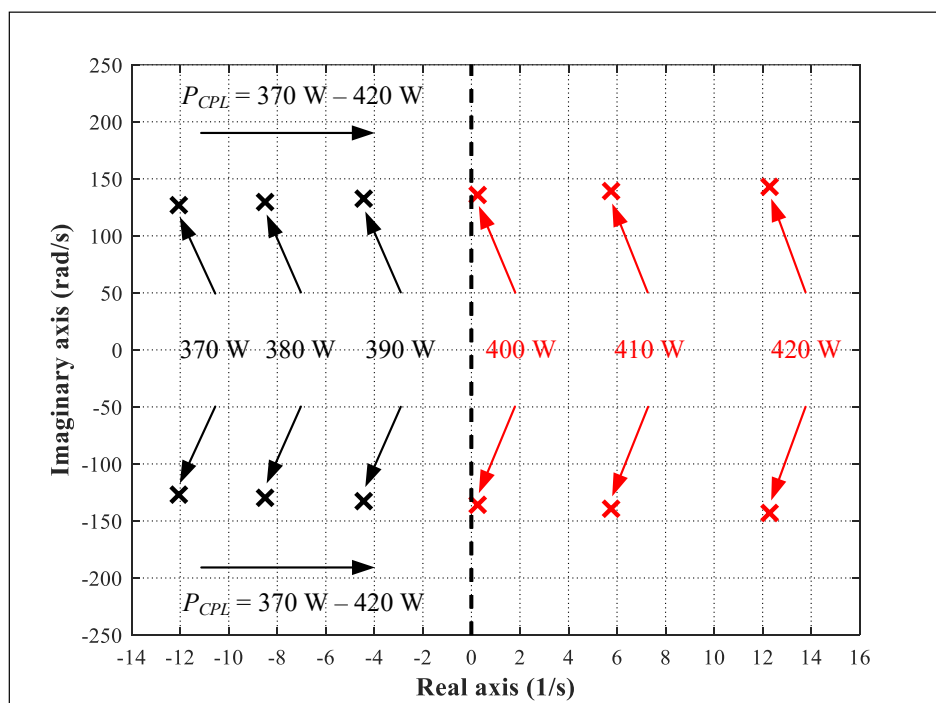
โดยที่  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  ( $n$  คือ จำนวนตัวแปรสถานะทั้งหมดของระบบ)

พิจารณาสมการที่ (4-2) สามารถอธิบายได้ว่า ระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อค่าเฉพาะของระบบทั้งหมดต้องมีส่วนจริง (real roots) น้อยกว่าศูนย์ กล่าวคือ ค่าเฉพาะของระบบทุกตัวจะต้องอยู่ทางฝั่งซ้ายมือ (left-hand side) ของระนาบเอส (s-plane) ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวถือเป็นเกณฑ์พื้นฐานสำคัญที่ใช้ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถพิจารณาเฉพาะค่าเฉพาะเด่นของระบบ (dominant eigenvalues) หรือโพลเด่นของระบบ (dominant poles) ได้ เนื่องจากค่าเฉพาะเด่นหรือโพลเด่นดังกล่าวจะมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบมากที่สุด (อภิชัย สุยะพันธ์, 2558)

พิจารณาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาโดยเมื่อนำเมทริกซ์จาโคเบียน  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  ดังสมการที่ (3-72) และค่าพารามิเตอร์ของระบบดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 แทนลงในสมการที่ (4-1) จะสามารถคำนวณหาค่าเฉพาะทั้งหมดของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีค่าเท่ากับ 370 W ผ่านคำสั่ง “eig(A)” ของโปรแกรม MATLAB ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจากรูปจะพบว่า ค่าเฉพาะของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาประกอบด้วยค่าเฉพาะ  $\lambda_1$  ถึง  $\lambda_4$  เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างส่วนจริงของค่าเฉพาะ  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  กับส่วนจริงของค่าเฉพาะ  $\lambda_3$  และ  $\lambda_4$  จะมีค่าเท่ากับ 32.89 ซึ่งมีค่ามากกว่า 5 เท่า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ค่าเฉพาะ  $\lambda_3$  และ  $\lambda_4$  เป็นค่าเฉพาะเด่นของระบบหรือเป็นขั้วเด่นของระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าเฉพาะเด่น  $\lambda_3$  และ  $\lambda_4$  ได้ โดยเส้นทางเดินของค่าเฉพาะเด่น  $\lambda_3$  และ  $\lambda_4$  ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 370 W ถึง 420 W สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ค่าเฉพาะทั้งหมดของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณา เมื่อ  $P_{CPL} = 370 \text{ W}$

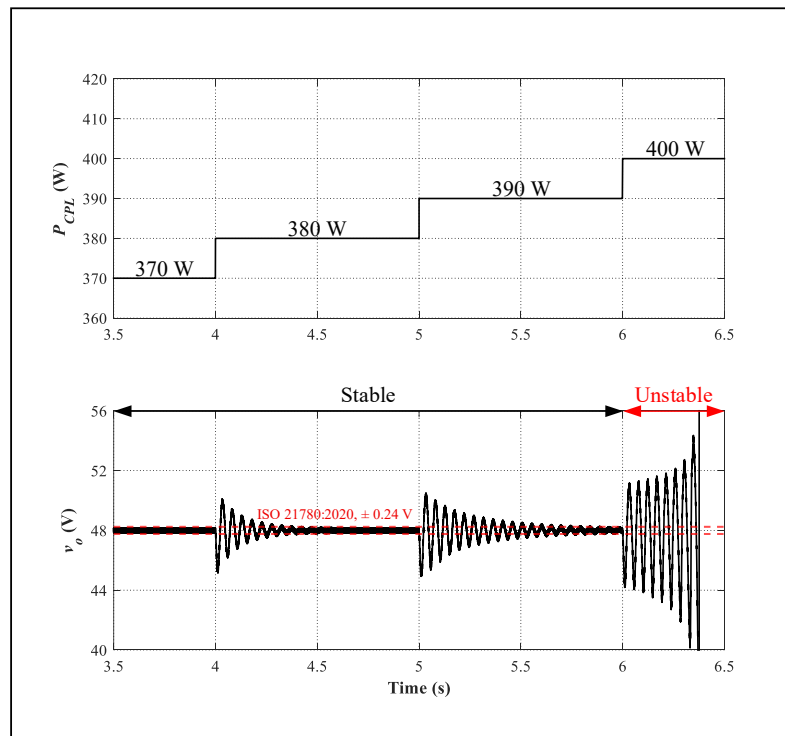


รูปที่ 4.3 ค่าเฉพาะเด่นของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณา

จากรูปที่ 4.3 จะสังเกตได้ว่า เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 400 W ส่วนจริงของค่าเจาะจงเด่นของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาจะมีค่ามากกว่าศูนย์ ซึ่งไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ (4-2) ที่ระบุไว้ว่า ระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อส่วนจริงของค่าเจาะจงมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ดังนั้นที่จุดการทำงานนี้ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาจะมีเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าน้อยกว่า 400 W และจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่ามากกว่า 400 W ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณางานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังหัวข้อที่ 4.2.2

#### 4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพ

การตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งรายละเอียดการต่อชุดบล็อกดังกล่าวสามารถดูได้จากภาคผนวก ข2. และผลการตรวจสอบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 4.4 เป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยจะพบว่าในช่วงเวลาที่ 3.5 วินาที ถึง 6 วินาที เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีการเปลี่ยนแปลงจาก 370 W ไปจนถึง 390 W ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้า ( $v_o$ ) สามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบยังคงสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ แต่อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาที่ 6 วินาที ถึง 6.5 วินาที เมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลงจาก 390 W ไปเป็น 400 W พบว่าผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าเกิดการสั่นไหวเพิ่มมากขึ้นจนไม่สามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้และยิ่งไปกว่านั้นผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21780:2020 อีกด้วย ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียความสามารถในการรักษาสมดุลของระบบโดยสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางทฤษฎีในรูปที่ 4.3 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบจํกรยานไฟฟ้าที่พิจารณาจะเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้นจริง โดยจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 400 W ซึ่งเกิดขึ้นก่อนค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบ ( $P_{CPL, rated} = 500$  W) ในลำดับถัดไปจะเป็นการดำเนินการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจํกรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาซึ่งมีรายละเอียดสามารถแสดงได้ดังหัวข้อที่ 4.3

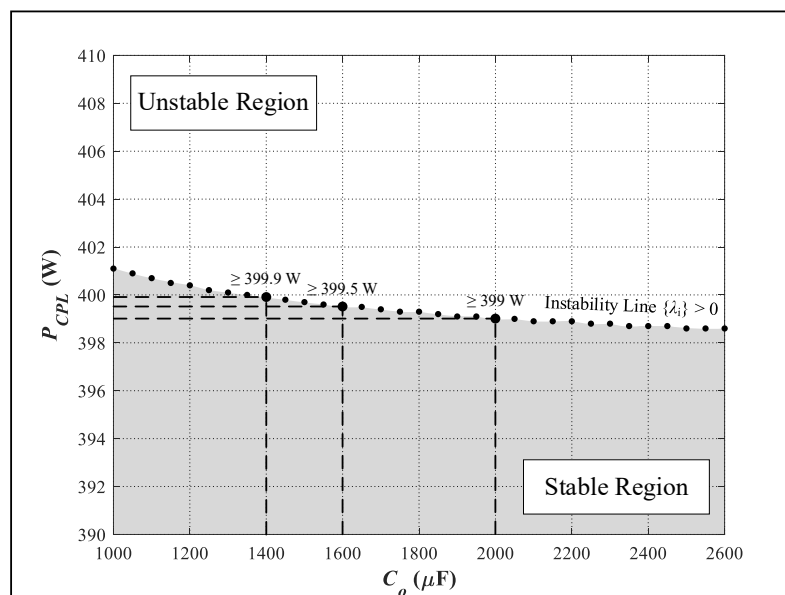
#### 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจํกรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

การศึกษาวิจัยถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบเป็นสิ่งที่จำเป็นและสำคัญไม่ต่างไปจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางให้วิศวกรผู้ออกแบบระบบได้คำนึงถึงผลกระทบต่อเสถียรภาพที่อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ในระบบ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงดำเนินการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจํกรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนโดยใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ที่ได้จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

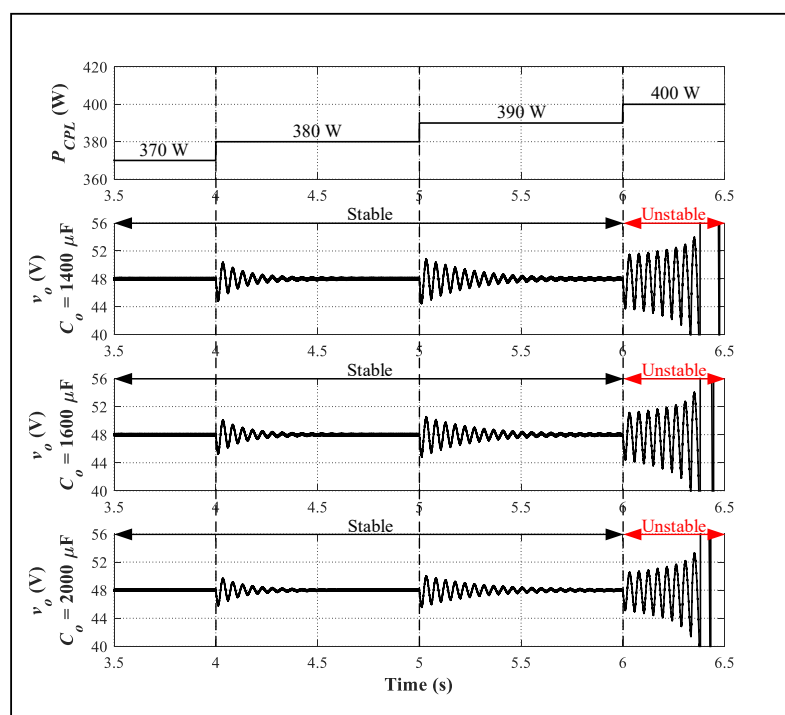
##### 4.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลัง

ตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังที่ต่อขนานกับโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ( $C_o$ ) มีหน้าที่ลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า (ripple voltage) ทางฝั่งโหลดให้มีลักษณะรูปสัญญาณที่เรียบมากยิ่งขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุพิจารณาการเปลี่ยนจาก 1000  $\mu$ F ถึง 2600  $\mu$ F ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ของระบบยังคงมีค่าเท่าเดิม

ดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงสามารถสร้างเป็นเส้นอเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $C_o$

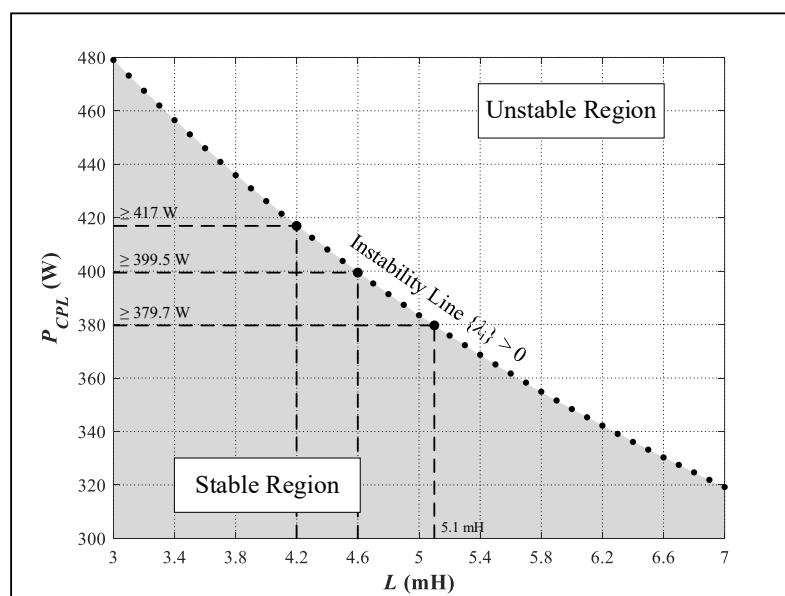


รูปที่ 4.6 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $C_o$

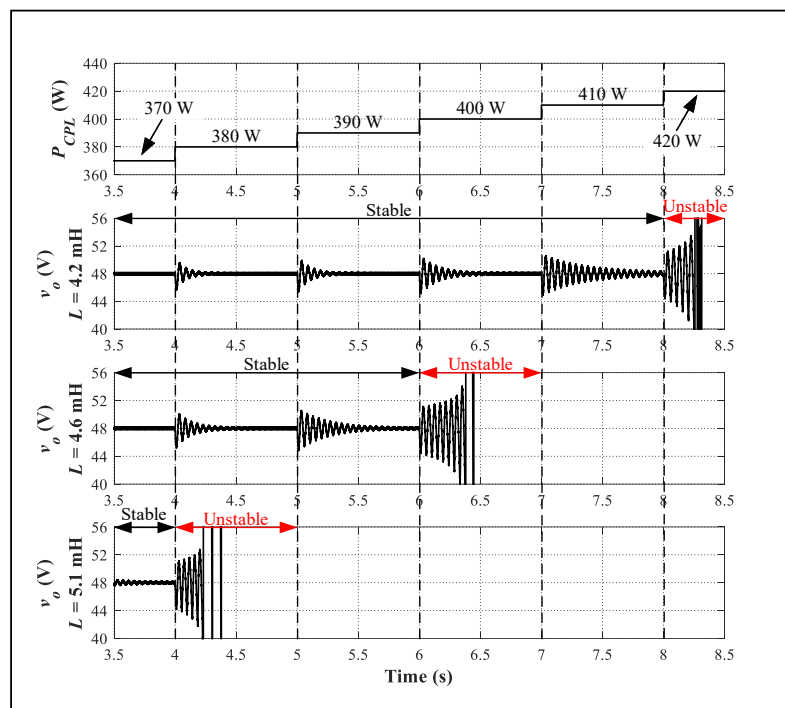
จากรูปที่ 4.5 เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ( $C_o$ ) มีค่าเท่ากับ 1400  $\mu\text{F}$  1600  $\mu\text{F}$  และ 2000  $\mu\text{F}$  ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 399.9 W 399.5 W และ 399 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงค่า  $C_o$  ของวงจรแปลงผันกำลังจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบน้อยมากหรือแทบไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเพิ่มค่า  $C_o$  ในปริมาณที่สูงขึ้นจะมีข้อดีคือการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าลดลง แต่ต้องแลกกับน้ำหนักของจิกยานไฟฟ้าและต้นทุนการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย ดังนั้นการออกแบบค่า  $C_o$  ที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการนำไปใช้งานจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบระบบที่ควรพิจารณา

#### 4.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลัง

ตัวเหนี่ยวนำ ( $L$ ) ของวงจรแปลงผันกำลัง ทำหน้าที่ลดการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า (ripple current) ให้มีรูปสัญญาณที่เรียบมากยิ่งขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงจาก 3 mH ถึง 7 mH ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ของระบบยังคงมีค่าเท่าเดิมดังตารางที่ 3.2 ในบทที่ 3 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจะสามารถสร้างเป็นเส้นอเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $L$



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $L$

จากรูปที่ 4.7 เมื่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ ( $L$ ) มีค่าเท่ากับ 4.2 mH 4.6 mH และ 5.1 mH ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 417 W 399.5 W และ 379.7 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อค่า  $L$  มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ระบบจํกรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพลดลง (less stable) ในทางกลับกัน หากค่า  $L$  มีค่าที่ลดลงจะส่งผลทำให้ระบบจํกรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น (more stable) อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเพิ่มค่า  $L$  จะทำให้การกระพือมของกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง แต่กลับทำให้ระบบมีเสถียรภาพลดลงด้วย ด้วยเหตุนี้การเลือกค่า  $L$  ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจึงเป็นความท้าทายที่วิศวกรผู้ออกแบบระบบจำเป็นต้องพิจารณา ไม่เพียงแต่พิจารณาเฉพาะการกระพือมของกระแสที่ลดลงเท่านั้น แต่ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อเสถียรภาพด้วย ซึ่งข้อมูลดังกล่าวนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบจํกรยานไฟฟ้า

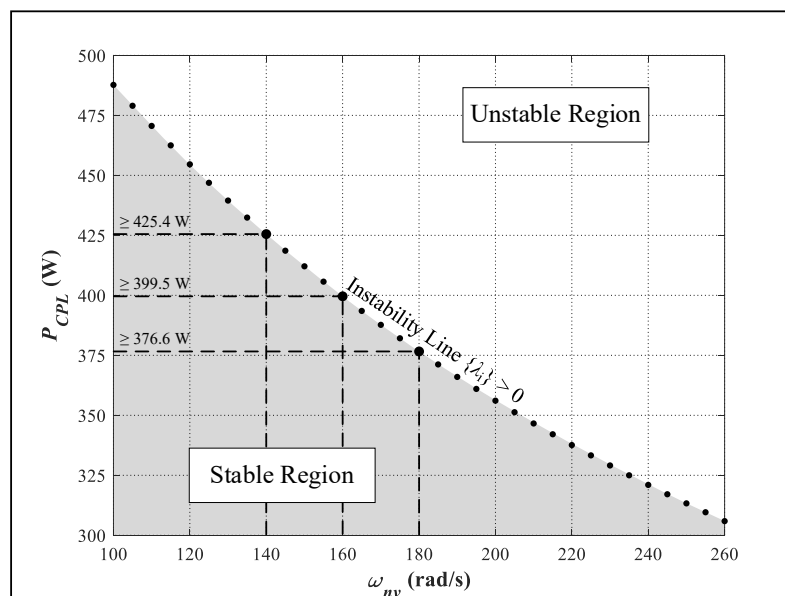
#### 4.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุม

การเปลี่ยนแปลงความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุม ( $\omega_n$ ) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเร็วของผลตอบสนองของระบบจํกรยานไฟฟ้า อันเนื่องมาจากเวลาเข้าที่ (settling time :  $T_s$ ) ทำให้ค่าอัตราขยายสัดส่วน ( $K_p$ ) และอัตราขยายปริพันธ์ ( $K_i$ ) ของตัวควบคุมพีไอมีค่าเปลี่ยนแปลง

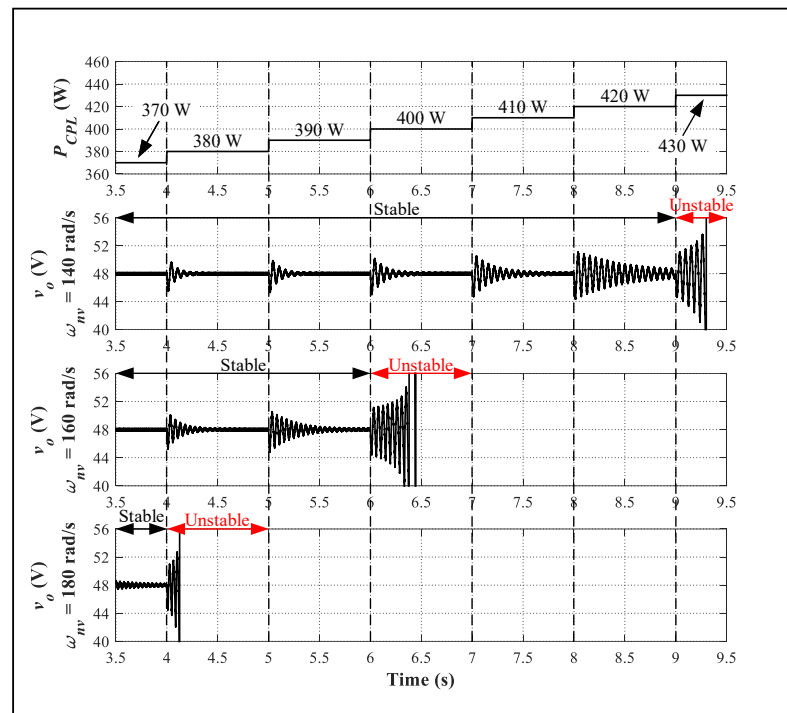
โดยตัวควบคุมของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันที่มีตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นลูปควบคุมภายในและมีตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นลูปควบคุมภายนอก สำหรับเงื่อนไขการออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันจะกำหนดให้ลูปควบคุมภายในต้องทำงานเร็วกว่าลูปควบคุมภายนอกอย่างน้อย 10 เท่า นั่นคือ ( $\omega_{ni} \geq 10\omega_{nv}$ ) (Pakdeeto, J., Chanpittayagit, R., Areerak, K-N., and Areerak, K-L., 2017) เพื่อให้การออกแบบเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้าและลูปควบคุมกระแสไฟฟ้าไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

### 1) การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า ( $\omega_{nv}$ ) จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงจาก 100 rad/s ถึง 260 rad/s ในขณะที่กำหนดให้  $\omega_{ni} = 10\omega_{nv}$  ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถสร้างเป็นเส้นอเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $\omega_{nv}$

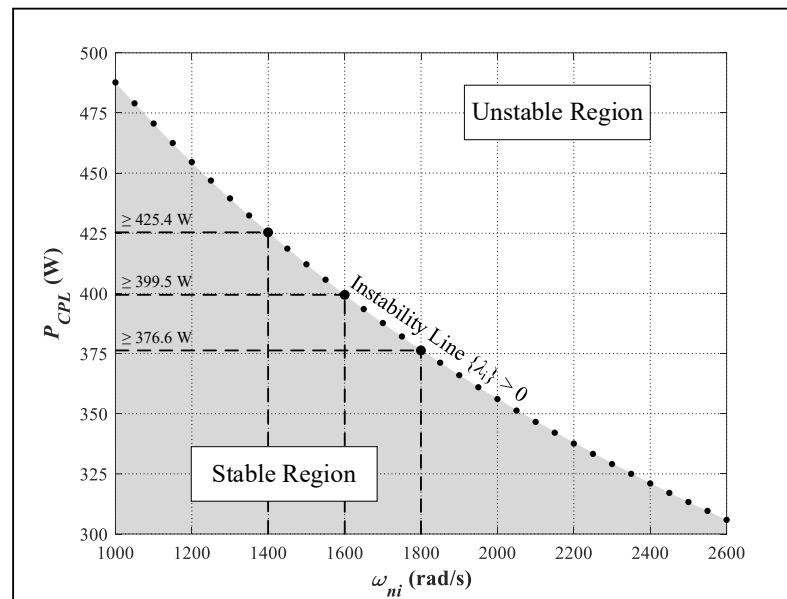


รูปที่ 4.10 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $\omega_{nv}$

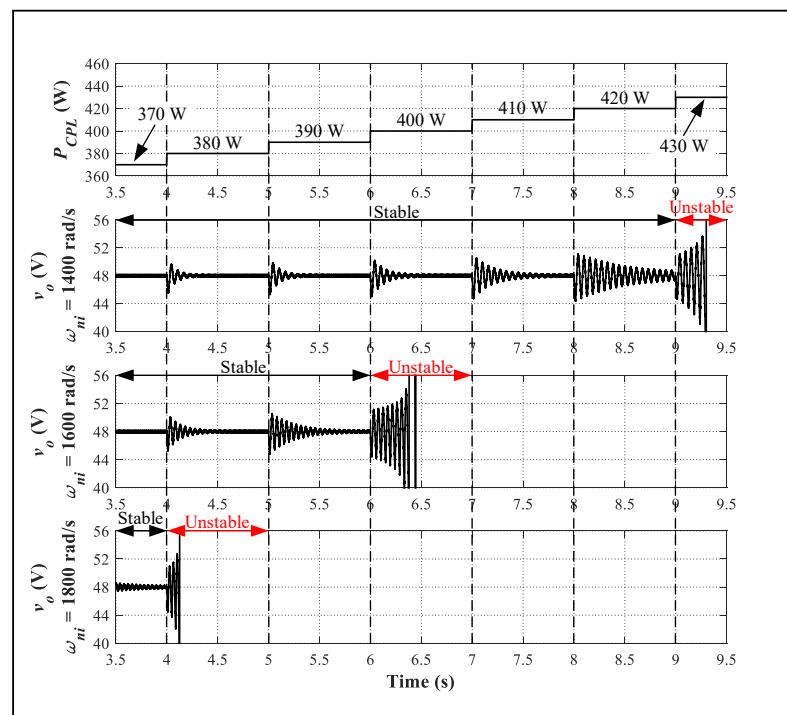
จากรูปที่ 4.10 จะพบว่า เมื่อความถี่ธรรมชาติของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า ( $\omega_{nv}$ ) มีค่าเท่ากับ 140 rad/s 160 rad/s และ 180 rad/s ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้า-คงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 425.4 W 399.5 W และ 376.6 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อ  $\omega_{nv}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ระบบ จักรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพลดลง ในทางตรงกันข้ามหาก  $\omega_{nv}$  มีค่าที่ลดลงจะส่งผลทำให้ระบบ จักรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีที่ได้ดังรูปที่ 4.9

## 2) การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า ( $\omega_{ni}$ ) จะ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 rad/s ถึง 2600 rad/s ในขณะที่ได้กำหนดให้  $\omega_{nv} = \frac{1}{10} \omega_{ni}$  ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถสร้างเป็นเส้นอเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $\omega_{ni}$



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $\omega_{ni}$

จากรูปที่ 4.11 จะพบว่า เมื่อความถี่ธรรมชาติของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า ( $\omega_{ni}$ ) มีค่าเท่ากับ 1400 rad/s 1600 rad/s และ 1800 rad/s ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 425.4 W 399.5 W และ 376.6 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อ  $\omega_{ni}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ระบบจํกรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพลดลง ในทางตรงกันข้ามหาก  $\omega_{ni}$  มีค่าลดลงจะส่งผลทำให้ระบบจํกรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น

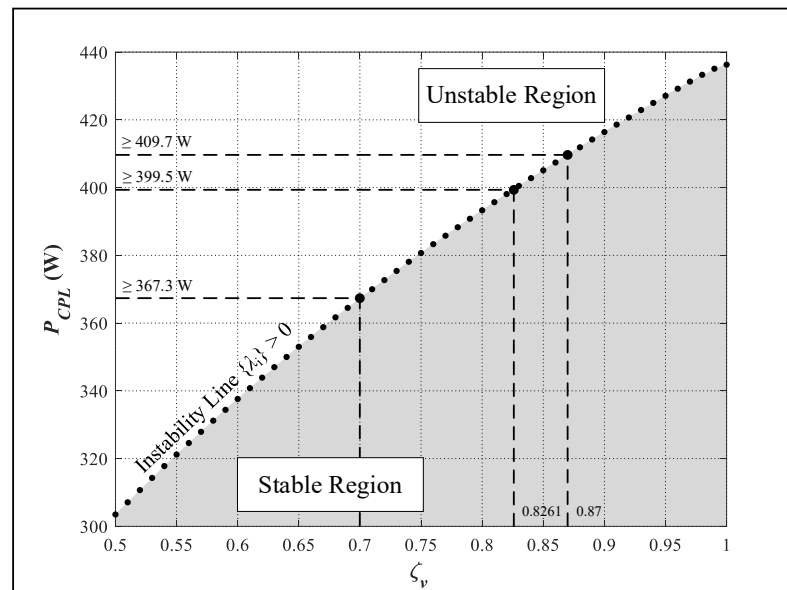
ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า ( $\omega_m$ ) และลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า ( $\omega_{ni}$ ) พบว่า หากมีการออกแบบให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วมากเกินไปจะส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ไวมากยิ่งขึ้น ในทางกลับกันหากออกแบบให้ความถี่ธรรมชาติมีค่าลดลงระบบอาจมีเสถียรภาพที่เพิ่มขึ้น แต่ต้องแลกมากับผลตอบสนองของระบบที่ช้า ดังนั้นการออกแบบค่าความถี่ธรรมชาติของลูบควบคุมที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบระบบ ทั้งนี้เพื่อให้ระบบมีผลตอบสนองที่รวดเร็วและยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบไว้ภายใต้การทำงานที่พิกัดได้

#### 4.3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูบควบคุม

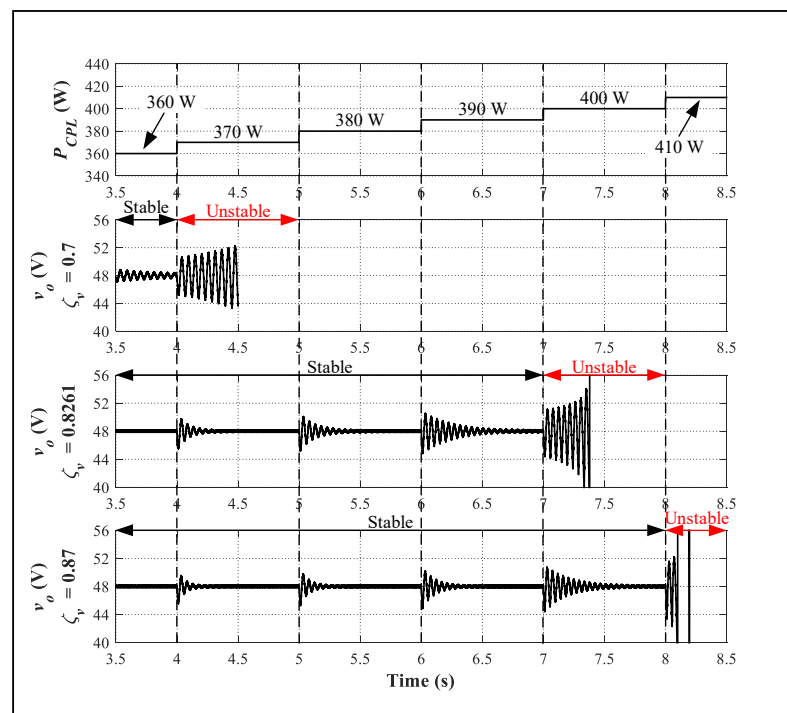
การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการหน่วงของลูบควบคุม ( $\zeta$ ) เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (percent overshoot : P.O.) ของผลตอบสนองของระบบจํกรยานไฟฟ้า ทำให้ค่าอัตราขยายสัดส่วน ( $K_p$ ) ของตัวควบคุมพีไอมีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูบแรงดันไฟฟ้า ( $\zeta_v$ ) และอัตราส่วนการหน่วงของลูบกระแสไฟฟ้า ( $\zeta_i$ ) ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

##### 1) การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า ( $\zeta_v$ ) จะดำเนินการเปลี่ยนแปลงจาก 0.5 ถึง 1 ในขณะที่ค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า ( $\zeta_i$ ) จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.6901 (P.O. = 5%) ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำมาสร้างเป็นเส้นอเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $\zeta_v$

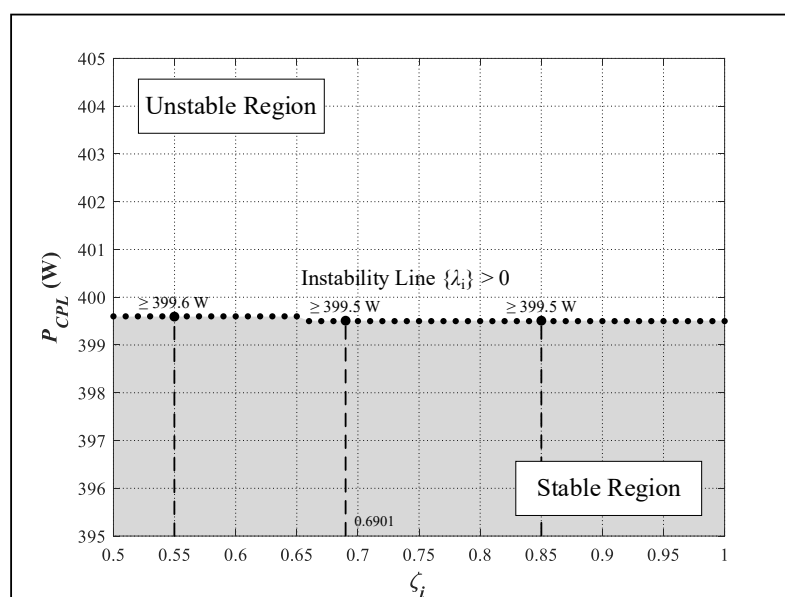


รูปที่ 4.14 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $\zeta_v$

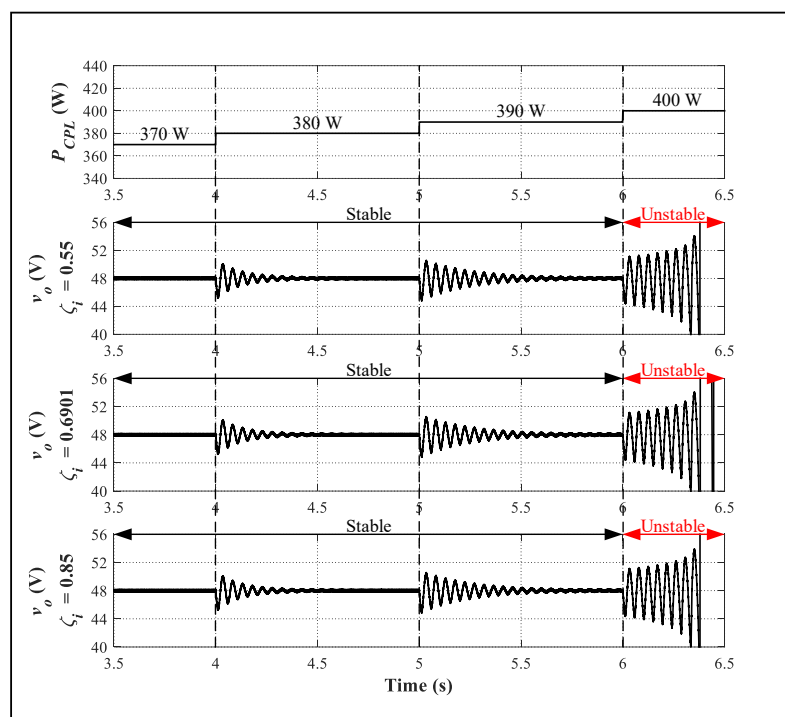
จากรูปที่ 4.13 จะสังเกตได้ว่า เมื่อค่าอัตราส่วนการหน่วงของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า ( $\zeta_i$ ) มีค่าเท่ากับ 0.7 0.8261 และ 0.87 ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 367.3 W 399.5 W และ 409.7 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อ  $\zeta_i$  มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ระบบจํกรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันหาก  $\zeta_i$  มีค่าลดลงจะส่งผลทำให้ระบบจํกรยานไฟฟ้ามีเสถียรภาพที่ลดลงด้วยเช่นกัน

## 2) การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้า ( $\zeta_i$ ) จะดำเนินการเปลี่ยนแปลงจาก 0.5 ถึง 1 ในขณะที่ค่าอัตราส่วนการหน่วงของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า ( $\zeta_v$ ) จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.8261 (P.O. = 1%) ผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำมาสร้างเป็นเส้นอเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 เส้นอเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $\zeta_i$



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า  $\zeta_i$

จากรูปที่ 4.15 จะสังเกตได้ว่า เมื่อค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า ( $\zeta_i$ ) มีค่าเท่ากับ 0.55 0.6901 และ 0.85 ระบบจะขาดเสถียรภาพเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ( $P_{CPL}$ ) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 399.6 W 399.5 W และ 399.5 W ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่า ให้ผลที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจักษยานไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้า ( $\zeta_v$ ) และลูบควบคุมกระแสไฟฟ้า ( $\zeta_i$ ) พบว่า หากมีการออกแบบให้อัตราส่วนการหน่วงของลูบควบคุมแรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือมีเปอร์เซ็นต์การพุงเกินที่น้อยลงจะส่งผลทำให้ระบบจักษยานไฟฟ้าที่เสถียรภาพที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การออกแบบให้อัตราส่วนการหน่วงของลูบควบคุมกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจักษยานไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลดังกล่าวที่ได้นำเสนอถือเป็นข้อมูลที่สำคัญและมีประโยชน์ต่อการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมให้มีความเหมาะสม

ดังนั้นจากการดำเนินการวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจะเป็นข้อมูลที่สำคัญและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับวิศวกรในการออกแบบระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของระบบด้วย

#### 4.4 สรุป

ในบทที่ 4 เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพและการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะพิจารณาไปที่ค่าเจาะจงเด่นของระบบเนื่องจากค่าเจาะจงดังกล่าวมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อคาดเดาปริมาณโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีทั้งหมดด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการจำลองสถานการณ์มีความสอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้แนะนำเสนอสามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ อีกทั้งการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะเป็นข้อมูลที่สำคัญและมีประโยชน์ต่อการออกแบบและเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ให้มีความเหมาะสมกับระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการยืนยันว่าวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ซึ่งจะได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 5 เป็นลำดับถัดไป