

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ได้รับผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยการศึกษาวิจัยในเบื้องต้นได้เริ่มจากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า ผลของโหลดกำลังคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจากการศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวพบว่า โหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีลักษณะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อนำโหลดดังกล่าวมาเชื่อมต่อกับระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาจะส่งผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวไปลดทอนค่าความหน่วงของระบบลงจนทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อคาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และหลีกเลี่ยงการทำงาน ณ จุดดังกล่าวได้ โดยงานวิจัยในอดีตถือเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับนำมาใช้ต่อยอดและพัฒนางานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทั้งหมดได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 2

จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 นำมาสู่แนวทางการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ได้เริ่มต้นด้วยการนำเสนอระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา ซึ่งมีองค์ประกอบ คือ แหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง และโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่พิจารณาเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ จากนั้นได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของแบบจำลองโดยอาศัยข้อมูลจากเอกสารผู้ผลิต ซึ่งแบบจำลองของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่ได้จะถูกนำไปรวมกับระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณา เพื่อนำไปใช้พิสูจน์หาแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งจะช่วยอธิบายพฤติกรรมของจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่เสมือนจริงมากยิ่งขึ้น จากนั้นได้ดำเนินการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์พาสซีฟของวงจรดังกล่าว ได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเพื่อให้การกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุเป็นไปตามการออกแบบที่อ้างอิงมาตรฐาน ISO 21780:2020 อย่างไรก็ตามอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเมื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้พิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนโดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร และได้แบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์พฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบได้ สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปจะเริ่มต้นจากการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบจักรยานไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ไปพัฒนาต่อยอดเป็นแบบจำลองของระบบจักรยานไฟฟ้าในกรณีที่มีตัวควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ได้จะพบว่าเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงได้ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งมาทำการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้น โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยรอบจุดปฏิบัติงานของระบบ ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กหรือแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น จากนั้นดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์พบว่า แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตที่สอดคล้องและตรงกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว อีกทั้งยังสามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุให้อยู่ในระดับ 48 V ได้อย่างเหมาะสมและเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21780:2020 ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้อง แม่นยำ และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ สำหรับรายละเอียดการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 3

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยนำเมทริกซ์จาโคเบียน $\mathbf{A}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์หาค่าเจาะจงทั้งหมดของระบบ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพ

สามารถพิจารณาเฉพาะค่าเจาะจงเด่นของระบบได้ เนื่องจากค่าเจาะจงเด่นดังกล่าวมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบมากที่สุด ซึ่งการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของค่าเจาะจงเด่นจะสามารถบ่งบอกหรือคาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ โดยการขาดเสถียรภาพจะทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้ามีการสั่นไหวที่สูงเพิ่มมากขึ้นและไม่อยู่ภายใต้ขอบเขตของมาตรฐาน ISO 21780:2020 ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ภายในระบบและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยผลที่ได้แสดงจุดการขาดเสถียรภาพที่สอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสรุปและยืนยันได้ว่าระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และจุดการขาดเสถียรภาพเกิดก่อนค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบ โดยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้นำเสนอสามารถคาดการณ์จุดการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ นอกจากนี้ได้มีการนำเสนอการวิเคราะห์และการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เกี่ยวกับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ ซึ่งถือเป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับวิศวกรในการออกแบบระบบที่ต้องคำนึงถึงเสถียรภาพด้วย โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลัง (C_o) ไม่ว่าจะมามีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ ในขณะที่เมื่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลัง (L) ค่าความถี่ธรรมชาติของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (ω_{nv}) และค่าความถี่ธรรมชาติของลูปกระแสไฟฟ้า (ω_{ni}) มีค่าเพิ่มขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าคงตัวของโหลดมีค่าลดลงในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมแรงดันไฟฟ้า (ζ_v) มีค่าเพิ่มขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มการขาดเสถียรภาพที่ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าอัตราส่วนการหน่วงของลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า (ζ_i) จะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ถือเป็นประโยชน์และมีความสำคัญต่อวิศวกรในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบโดยมีการคำนึงถึงผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยรวมอีกด้วย สำหรับรายละเอียดการวิเคราะห์เสถียรภาพและการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทั้งหมดได้รับการนำเสนอรายละเอียดไว้ในบทที่ 4

การยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน รวมถึงการยืนยันผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ส่งผลต่อเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปเป็นการดำเนินการเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยในการยืนยันผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรม MATLAB/SIMULINK กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียงกันและได้เปรียบเทียบกับผลการจำลอง

สถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผลจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ผลจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปแสดงถึงจุดการขาดเสถียรภาพที่ตรงกัน ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่า วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงที่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำไปต่อยอดพัฒนาใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ สำหรับรายละเอียดของการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป รวมถึงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ในรูปได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 5

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

6.2.1 ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะโหมดการขับเคลื่อนเท่านั้นเนื่องจากเป็นโหมดการทำงานโดยส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามการทำงานของระบบจักรยานไฟฟ้ายังมีโหมดการแปลงผันพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรมีการพิจารณาโหมดการทำงานการสูญเสียขณะห้ามล้อเพื่อให้ครอบคลุมการทำงานทั้งหมดของระบบจักรยานไฟฟ้า

6.2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเป็นเพียงการวิเคราะห์เพื่อคาดการณ์จุดการขาดเสถียรภาพของระบบเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและทำงานต่อได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงานภายใต้เงื่อนไขพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรมีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพหรือการสร้างเสถียรภาพเพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้จนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด