

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการขยายตัวทางเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่แหล่งพลังงานที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่ยังคงพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่มีจำกัดและใช้แล้วหมดไป อีกทั้งยังเป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภาวะโลกร้อน ด้วยเหตุนี้ความต้องการนำพลังงานสะอาดมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลจึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยแหล่งพลังงานสะอาดที่ได้รับความสนใจและมีแนวโน้มถูกนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลทั้งในปัจจุบันและในอนาคต คือ พลังงานไฮโดรเจน เนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานที่สูงเมื่อเทียบกับพลังงานอื่น ๆ และไม่ค่อยก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม (international energy agency, 2024; Mellino, S., Petrillo, A., Cigolotti, V., Autorino, C., Jannelli, E., and Ulgiati, S. 2017) จากแนวโน้มดังกล่าวทำให้นโยบายด้านพลังงานของประเทศได้ส่งเสริมการใช้พลังงานไฮโดรเจนในภาคส่วนต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคการขนส่ง ซึ่งเป็นภาคส่วนที่มีการใช้พลังงานและการปล่อยมลพิษในปริมาณสูง การนำพลังงานไฮโดรเจนมาใช้ในระบบขับเคลื่อนถือเป็นแนวทางสำคัญที่จะช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ส่งผลให้ในปัจจุบันพลังงานไฮโดรเจนได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้ในระบบยานยนต์สมัยใหม่ เช่น จักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน (hydrogen-powered electric bicycles) ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell electric vehicles : FCEVs) รถบรรทุกพลังงานไฮโดรเจนขนาดใหญ่ (heavy-duty hydrogen trucks) รถไฟพลังงานไฮโดรเจน (hydrogen-powered trains) และเครื่องบินพลังงานไฮโดรเจน (hydrogen-powered aircraft) เป็นต้น โดยการใช้พลังงานไฮโดรเจนในภาคการขนส่งได้รับการคาดการณ์ว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงมากยิ่งขึ้นในอนาคต (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2564; คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2566) ซึ่งจากแนวโน้มดังกล่าวการพัฒนาระบบขับเคลื่อนที่ใช้พลังงานไฮโดรเจนจึงมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนผ่านจากพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลไปสู่พลังงานสะอาด ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกพิจารณาระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน เนื่องจากเป็นยานพาหนะที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และสามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนได้ง่าย ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับ

การศึกษาและพัฒนาระบบยานยนต์ไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนได้ โดยระบบจักษยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะมีย่อประกอบหลักที่สำคัญแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ชุดเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน (hydrogen fuel cell stack) ทำหน้าที่ผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านกระบวนการปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่อาศัยไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับโหลดของผู้ใช้งาน ส่วนที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี (dc-dc power converter) ที่มีการควบคุม ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตให้คงที่และเหมาะสมกับโหลดชุดขับเคลื่อนของระบบ และส่วนที่ 3 โหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC motor drive system) ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ตามความต้องการของผู้ใช้งาน (Kheirandish, A., Kazemi, M. S., and Dahari, M. 2014) โดยจากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะพบว่า โหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านของระบบที่พิจารณาประกอบด้วยวงจรแปลงผันกำลังที่มีตัวควบคุมเชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (constant power loads, CPLs) โหลดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม ซึ่งส่งผลทำให้ระบบเกิดความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearities) กล่าวคือ เป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear system) อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ โดยเฉพาะการทำงานในช่วงโหมดการขับเคลื่อน (driving mode) ของจักษยานไฟฟ้า ซึ่งเมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพนอกจากจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมที่ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลงแล้ว ยังส่งผลทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบได้รับความเสียหายและเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานอีกด้วย (Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C. H., and Williamson, G. A. 2006; Rahimi, A. M., and Emadi, A. 2008; Kim, S., and Williamson, S. S. 2012; Daengdon, S., Suyapan, A., Areerak, K-N., and Pakdeeto, J. 2025) ด้วยเหตุนี้การตรวจสอบและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าวจึงมีความสำคัญอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจำเป็นที่จะต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง ซึ่งโดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังจะเป็นแบบจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (time varying model) เนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร หากนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจะทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องพิสูจน์หาแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-invariant model) โดยวิธีที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายสำหรับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี ได้แก่ วิธีค่าเฉลี่ย-ปริภูมิสถานะทั่วไป (generalize state-space averaging method, GSSA) (Emadi, A. 2004; Azer, P., and Emadi, A. 2020) ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นการนำสัมประสิทธิ์อนุกรมฟูริเยร์เชิงซ้อน (complex Fourier series) ของแบบจำลองมาจัดพจน์ตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาและเหมาะสำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของ

ระบบ โดยแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจะถูกจำแนกออกเป็น 2 แนวทาง คือ แนวทางแรก การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพของสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal stability analysis) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยทฤษฎีบทค่าเฉพาะ (eigenvalue theorem) (Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S. V., Asher, G. M., and Thomas, D. W. 2011) และการวิเคราะห์เสถียรภาพบนโดเมนความถี่ด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูค (middlebrook's criteria) (Riccobono A. and Santi E., 2014) การวิเคราะห์เสถียรภาพลักษณะนี้มีความถูกต้องเฉพาะเมื่อระบบมีการทำงานในช่วงที่แคบ (small range operating) ถ้าโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด อาจส่งผลให้การวิเคราะห์เกิดความผิดพลาดได้ สำหรับแนวทางที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ (large-signal stability analysis) เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรง โดยการใช้การวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase plane analysis) (อภิชัย สุยะพันธ์, 2558) หรือวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method) (Mansour, M. Z., Me, S. P., Hadavi, S., Badrzadeh, B., Karimi, A., and Bahrani, B. 2021; Zhang, Y., Zhang, C., and Cai, X. 2021; Andic, C., Ozturk, A., and Turkay, B. 2022) ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพลักษณะนี้เหมาะสำหรับระบบที่มีความซับซ้อนไม่เป็นเชิงเส้น และสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเมื่อมีการทำงานในช่วงที่กว้างได้แต่ก็มีความยุ่งยากและซับซ้อน

ดังนั้นจากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจกรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ได้รับผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยจะเริ่มต้นจากการศึกษาระบบจกรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน รวมถึงศึกษาพฤติกรรมและผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เนื่องจากโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ของระบบมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งเป็นสาเหตุที่ส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ จากนั้นจะพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา และการวิเคราะห์เสถียรภาพจะอาศัยทฤษฎีบทค่าเฉพาะเพื่อคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบ นอกจากนี้การออกแบบค่าพารามิเตอร์ของระบบจะต้องอยู่ภายใต้มาตรฐาน ISO 21780:2020 ซึ่งเป็นมาตรฐานข้อกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าขนาด 48 V ในระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องและยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณาจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK รวมถึงการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์ทางทฤษฎีและการตรวจสอบความถูกต้องให้ผลที่สอดคล้องและ

ตรงกัน ซึ่งยืนยันได้ว่า ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่นำเสนอสามารถคาดการณ์จุดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

1.2.3 เพื่อประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ สำหรับเป็นแนวทางให้วิศวกรในการออกแบบระบบ

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัก-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีตัวควบคุมพีไอ ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะโหมดการขับเคลื่อนเท่านั้น

1.3.2 แหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนร่วมกับข้อมูลจากเอกสารผู้ผลิต

1.3.3 การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังในระบบจะพิจารณาเฉพาะโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (continuous conduction mode : CCM) เท่านั้น

1.3.4 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะถูกแทนที่ด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ

1.3.5 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปภายใต้การประมาณค่าอันดับศูนย์

1.3.6 การทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) จะอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง

1.3.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่พิจารณาจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง

1.3.8 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการพิสูจน์จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในขณะที่การยืนยันจุดการขาดเสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูปบน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB ร่วมกับบอร์ด TMDSDOCK28335

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนขนาด 500 W และระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตขนาด 48 V

1.4.2 แบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะอ้างอิงเซลล์เชื้อเพลิงรุ่น H-500 จากบริษัท Horizon Fuel Cell Technologies ซึ่งมีพิกัดกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 500 W

1.4.3 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ในระบบที่พิจารณาจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 21780:2020 เพื่อให้ระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน

## 1.5 สมมติฐานการวิจัย

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยการอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้นร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจงสามารถคาดการณ์จุดขาดเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้อย่างถูกต้องแม่นยำ อีกทั้งการออกแบบพารามิเตอร์ของระบบจะมีผลตอบสนองที่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 21780:2020 ซึ่งสามารถยืนยันผลทั้งหมดได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

## 1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่อาศัยแบบจำลองของระบบ ซึ่งเป็นการพิจารณาพลวัตของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนร่วมกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่มีตัวควบคุมเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ภายใต้มาตรฐาน ISO 21780:2020 โดยยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป ซึ่งยังไม่มีงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ใด ๆ ดำเนินการในลักษณะนี้มาก่อน

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้พิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพ

1.7.2 ได้วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน

1.7.3 ได้ประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบจักรยานไฟฟ้า พลังงานไฮโดรเจนที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ สำหรับเป็นแนวทางให้วิศวกรในการออกแบบระบบ

## 1.8 การจัดรูปแบบรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

รูปแบบรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์ประกอบด้วยเนื้อหาจำนวน 6 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ สมมติฐานการวิจัย จุดเด่นของงานวิจัย วิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า พร้อมทั้งสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา ทั้งในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุมและในกรณีที่มีตัวควบคุม เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับการวัดที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบ พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะได้รับการนำเสนอไว้ในส่วนที่เหมาะสมของบทนี้ด้วยเช่นกัน

บทที่ 4 นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน และการประเมินผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ พร้อมทั้งการยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

บทที่ 5 นำเสนอการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ ซึ่งกล่าวถึงบทสรุปของการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ สรุปจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะสำหรับเป็นแนวทางต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

ภาคผนวกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีทั้งหมด 4 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก แสดงรายการบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา ภาคผนวก ข แสดงรายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ภาคผนวก ค แสดงรายละเอียด

โปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และภาคผนวก ง  
แสดงรายละเอียดโปรแกรมภาษาซี สำหรับการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในอุปกรณ์  
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMDSDOCK28335