

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ได้รับผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ได้มีผู้ศึกษาค้นคว้าและพัฒนางานวิจัยอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในบทที่ 2 จึงนำเสนอการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในแต่ละหัวข้อได้นำเสนองานวิจัยโดยเรียงลำดับตามปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยไว้พอสังเขป พร้อมทั้งสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรมเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัยวิทยานิพนธ์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า

ในปัจจุบัน การนำพลังงานสะอาดมาประยุกต์ใช้ในระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อลดการพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล รวมถึงลดผลกระทบต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม จากแนวโน้มดังกล่าวทำให้ยานยนต์ไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบจักรยานไฟฟ้า ซึ่งเป็นยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีการนำพลังงานสะอาดมาประยุกต์ร่วมกับระบบขับเคลื่อน ส่งผลให้ระบบดังกล่าวได้มีการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าเพื่อเป็นข้อมูลที่จะนำมาเลือกเป็นระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งสามารถแสดงเป็นปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	Mellino, S., Petrillo, A., Cigolotti, V., Autorino, C., Jannelli, E., and Ulgiati, S.	บทความนี้นำเสนอการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการผลิตและใช้งานพลังงานจากแบตเตอรี่ลิเทียม (lithium) และเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane fuel cell : PEMFC) ด้วยวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต (life cycle assessment : LCA) โดยครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการผลิตไปจนถึงการใช้งานจักรยานไฟฟ้า ซึ่งผลการประเมินพบว่า ระบบที่ใช้พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ นอกจากนี้ได้มีการเสนอให้ประเมินต้นทุนการผลิตตลอดอายุการใช้งานเพื่อสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนในอนาคต
2020	Hung, N. B., and Lim, O.	บทความนี้ทบทวนองค์ความรู้เกี่ยวกับการพัฒนา การออกแบบ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจักรยานไฟฟ้าไว้อย่างละเอียด โดยเริ่มจากนำเสนอสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าในปัจจุบัน ซึ่งจำแนกออกเป็น 3 ประเภท คือ ระบบจักรยานไฟฟ้าแบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านคันเร่ง ระบบจักรยานไฟฟ้าแบบช่วยปั่น และระบบจักรยานไฟฟ้าแบบสองโหมดการขับเคลื่อน นอกจากนี้ได้กล่าวถึงแหล่งพลังงานที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนและประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาของเทคโนโลยีระบบขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้าในอนาคต

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	Isorna Llerena, F., López González, E., Caparrós Mancera, J. J., Segura Manzano, F., and Andújar, J. M.	บทความนี้นำเสนอการออกแบบและทดสอบระบบจักรยานไฟฟ้าระหว่างระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวกับระบบไฮบริดที่มีเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับแบตเตอรี่ โดยทำการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ใกล้เคียงกันเพื่อประเมินสมรรถนะต่าง ๆ ของระบบ ได้แก่ ประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงาน ระยะทางในการขับขี่ ระยะเวลาการเติมพลังงาน และความยืดหยุ่นในการตอบสนองต่อโหลด ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ระบบไฮบริดมีสมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ทั้งในแง่ความหนาแน่นของพลังงานที่สูงกว่า ระยะทางการขับขี่ที่ไกลกว่า รวมถึงระยะเวลาการเติมพลังงานที่สั้นกว่า ทำให้ระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบจักรยานไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว
2022	Modesti, D. M.	งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบระบบจักรยานไฟฟ้าขนส่งสินค้าพลังงานไฮโดรเจนแบบไฮบริดที่มีการใช้เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนร่วมกับแบตเตอรี่และอาศัยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก สำหรับจัดการพลังงานของระบบอย่างมีประสิทธิภาพ ผลจากการถ่วงน้ำหนักพบว่า ระบบจักรยานไฟฟ้าแบบไฮบริดมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าทั้งการใช้พลังงานและระยะทางการขับขี่เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้เพียงแบตเตอรี่อย่างเดียว

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	Sahwal, C. P., Dinh, T. Q., and Sengupta, S.	บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบจัดการความร้อน (thermal management system : TMS) ขั้นสูงที่รองรับทั้งการระบายความร้อนและการทำความร้อนแบบพาสซีฟ (passive) และแอคทีฟ (active) สำหรับระบบจักรยานไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาอุณหภูมิของส่วนประกอบหลักภายในระบบขับเคลื่อน ได้แก่ ชุดแบตเตอรี่ วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี อินเวอร์เตอร์ ชุดชาร์จแบตเตอรี่ และมอเตอร์ไฟฟ้า นอกจากนี้ได้มีการสร้างแบบจำลองพลวัตของระบบส่งกำลังจักรยานไฟฟ้าที่รวมระบบการเบรกแบบสร้างพลังงานกลับคืน (regenerative braking) เข้ากับระบบจัดการความร้อน เพื่อรองรับการพัฒนาและประเมินผลการควบคุม
2022	Contò, C., and Bianchi, N.	บทความนี้นำเสนอองค์ความรู้และแนวโน้มในปัจจุบันของระบบจักรยานไฟฟ้า โดยเน้นข้อดีของระบบจักรยานไฟฟ้าแบบช่วยปั่น (pedal-assisted bicycle) อีกทั้งได้นำเสนอเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานที่ใช้ในระบบ โดยมุ่งเน้นไปที่แบตเตอรี่ลิเทียม ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานกับระบบจักรยานไฟฟ้าแบบช่วยปั่น นอกจากนี้ได้นำเสนอตำแหน่งการติดตั้งและประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งพบว่าตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมคือ ส่วนตรงกลางของจักรยานไฟฟ้าเนื่องจากช่วยกระจายน้ำหนักได้ดี และประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (permanent magnet synchronous motor : PMSM)

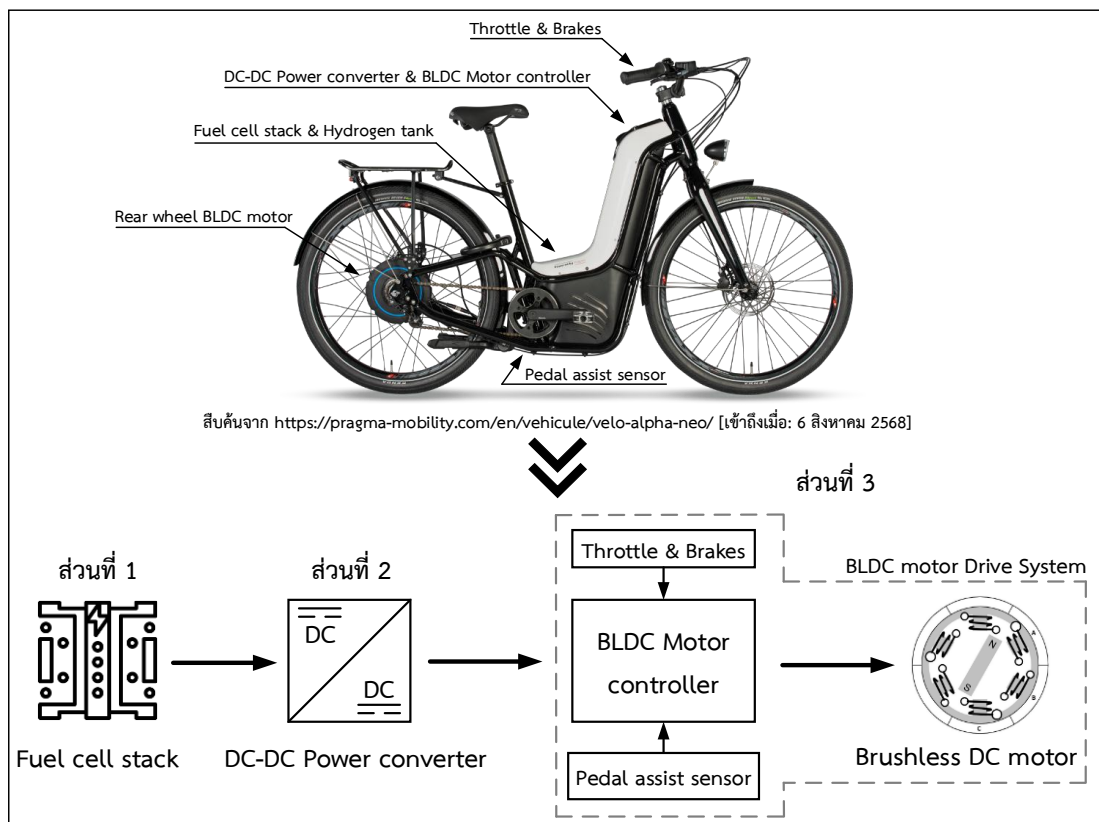
ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2024	Mittal, U., Varshney, G., Yadav, S., Pawar, A., Singh, S., and Roy, A. K.	บทความนี้นำเสนอการออกแบบระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นการพัฒนาและปรับปรุงมาจากระบบจักรยานไฟฟ้าแบตเตอรี่แบบดั้งเดิม โดยระบบดังกล่าวจะประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ วงจรแปลงผันกำลัง-ดิซีเป็นดิซี และโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (brushless DC motor : BLDC motor) ที่มีการควบคุม ซึ่งถูกติดตั้งบริเวณล้อหลังของจักรยานไฟฟ้า อีกทั้งได้มีการคำนวณแรงต้าน กำลังไฟฟ้าที่ต้องใช้ การเลือกขนาดแบตเตอรี่ และสมรรถนะการทำงานภายใต้น้ำหนักของผู้ขับขี่ที่แตกต่างกัน
2025	Kumai, A., Sonkar, K., Chaudhari, C., Jindal, T., Katiyar, A., Singh, S., Bera, T., Badhe, M. R., Srivastva, U., and Sharma, A.	บทความนี้เสนอแนวคิด การพัฒนา และการออกแบบระบบควบคุมจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนแบบไฮบริด โดยมุ่งเน้นไปที่การออกแบบขนาดความจุของเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนร่วมกับชุดแบตเตอรี่ เพื่อให้สามารถลดการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบโดยรวม อีกทั้งได้มีการยืนยันผลโดยเปรียบเทียบระหว่างการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการสร้างชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้างดังตารางที่ 2.1 พบว่า สถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ ประเภทแรกคือ ระบบจักรยานไฟฟ้าแบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าโดยตรง (pure electric bicycle) เป็นระบบที่ผู้ขับขี่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านคันเร่ง (throttle) ที่บริเวณแฮนด์ของจักรยานไฟฟ้า

เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังมอเตอร์ไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งทำให้จักรยานไฟฟ้าประเภทนี้สามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องออกแรงปั่น ประเภทที่สองคือ ระบบจักรยานไฟฟ้าแบบช่วยปั่น จักรยานไฟฟ้าประเภทนี้เป็นระบบที่ผสมผสานระหว่างกำลังการปั่นจากผู้ขี่ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้า โดยอาศัยเซ็นเซอร์ตรวจวัดความเร็วรอบหรือแรงบิดของการปั่น เพื่อส่งสัญญาณควบคุมไปยังหน่วยควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (electronic control unit : ECU) สำหรับประมวลผลและสั่งการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าให้ส่งกำลังที่เหมาะสมขณะผู้ขี่ขี่กำลังปั่น และประเภทที่สามคือ ระบบจักรยานไฟฟ้าแบบสองโหมดการขับเคลื่อน (dual-mode electric bicycle) เป็นระบบที่รวมโหมดการทำงานของสองประเภทแรกเข้าด้วยกัน โดยที่ผู้ขี่สามารถเลือกใช้งานได้ทั้งโหมดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านคันเร่งหรือโหมดช่วยปั่นผ่านเซ็นเซอร์ตรวจวัดความเร็วรอบของการปั่น และเมื่อพิจารณาไปที่แหล่งพลังงานที่ใช้ในระบบจักรยานไฟฟ้าสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ระบบที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นระบบที่ในปัจจุบันเป็นที่นิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีระบบรองรับการชาร์จแบตเตอรี่อย่างกว้างขวาง แต่ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ ระยะทางวิ่งต่อการชาร์จที่จำกัด น้ำหนักโดยรวมของระบบ ระยะเวลาการชาร์จแบตเตอรี่ยาวนาน ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลงเมื่อใช้งานผ่านไปแล้วในระยะยาว รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตและการใช้งานของแบตเตอรี่ ในส่วนถัดมาจะเป็นระบบที่ใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยระบบดังกล่าวมักมีลักษณะเป็นระบบแบบไฮบริดที่มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บริเวณด้านบนของจักรยานเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าและนำไปเก็บสะสมในแบตเตอรี่ แนวทางนี้ช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากโครงข่ายสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ แต่อย่างไรก็ตามการผลิตพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความเข้มแสงของพื้นที่การติดตั้ง รวมถึงประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ยังไม่สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานหลักได้อย่างต่อเนื่องในทุกสภาวะการใช้งาน จากข้อจำกัดที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นจึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงมาเป็นระบบที่ใช้พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ซึ่งมีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น ระยะเวลาการเติมเชื้อเพลิงที่รวดเร็วกว่าการชาร์จแบตเตอรี่ ระยะทางในการขับขี่ที่ยาวนานกว่า และน้ำหนักโดยรวมที่เบา ซึ่งทำให้ระบบที่ใช้พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีประสิทธิภาพมากกว่าระบบที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ แต่อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวยังมีข้อเสียในแง่ของต้นทุนการผลิตที่สูง ความปลอดภัยสำหรับการจัดเก็บเชื้อเพลิงไฮโดรเจน รวมถึงสถานที่เติมเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่น้อย ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกศึกษาระบบขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้าที่ใช้แหล่งพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน เนื่องจากมีข้อดีเกี่ยวกับประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ อีกทั้งยังเป็นระบบที่มีแนวโน้มจะได้รับการพัฒนาและต่อยอดได้ในอนาคต โดยระบบดังกล่าวมีองค์ประกอบหลักอยู่ 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 แหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน มีหน้าที่ผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังภายในระบบ ส่วนที่ 2 วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี ทำหน้าที่ควบคุม

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงให้เหมาะสมกับโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าของระบบซึ่งเป็นองค์ประกอบในส่วนที่ 3 และโดยทั่วไปจะเป็นโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีการควบคุมความเร็วรอบ โดยสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 สถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณา

จากสถาปัตยกรรมของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่พิจารณาดังแสดงในรูปที่ 2.1 จะสังเกตได้ว่า พลังงานหลักของระบบมาจากแหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน ซึ่งโดยทั่วไปแหล่งจ่ายประเภทนี้จะผลิตแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าไม่คงที่ และขึ้นอยู่กับความต้องการของโหลด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ให้มีค่าคงที่และเหมาะสมกับโหลดชุดขับเคลื่อน สำหรับงานงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางเนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังดังกล่าวสามารถทำงานได้ทั้งในโหมดขับเคลื่อนและโหมดแปลงผันพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อ โดยพลังงานสูญเสียที่ได้จะถูกนำมาเก็บไว้ในอุปกรณ์เสริม เช่น แบตเตอรี่ หรือตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) เป็นต้น

ส่งผลให้ระบบโดยรวมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัยทั้งหมดในวิทยานิพนธ์จะพิจารณาเฉพาะโหมดการขับเคลื่อนเท่านั้น ซึ่งการเลือกใช้วงจรแปลงผันกำลังแบบสองทิศทางเพื่อเป็นสถาปัตยกรรมที่สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นระบบไฟฟ้าแบบไฮบริดได้สำหรับงานวิจัยในอนาคต โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง

วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีมีความสำคัญอย่างมากต่อระบบขับเคลื่อนจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจน เนื่องจากทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่เซลล์เชื้อเพลิงผลิตได้ให้มีค่าคงที่และเหมาะสมกับโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าของระบบ หากไม่มีการใช้งานวงจรแปลงผันกำลังดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนโดยรวมได้ และเพื่อให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถต่อยอดเป็นระบบไฟฟ้าแบบไฮบริดได้สำหรับงานวิจัยในอนาคต ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษาค้นคว้าข้อดีและข้อเสียที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนเพื่อเป็นข้อมูลที่จะนำมาเลือกใช้เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งสามารถแสดงเป็นปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2019	Gorji, S. A., Sahebi, H. G., Ektesabi, M., and Rad, A. B.	บทความนี้ได้ทบทวนโทโพโลยี (topology) ของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางโดยจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแบบแยกกราวด์ (isolated type) และประเภทแบบไม่แยกกราวด์ (non-isolated type) พร้อมทั้งนำเสนอข้อดีและข้อเสียของวงจรแต่ละประเภท
2020	Keshavarzi, M. D., and Ali, M. H.	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางสำหรับใช้ในระบบกักเก็บพลังงานของดีซีไมโครกริด (DC microgrid) และไมโครกริดแบบผสม (hybrid microgrid) โดยใช้วงจรแปลงผันแบบบูสต์จำนวนสองชุดที่ต่อ

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง (ต่อ)

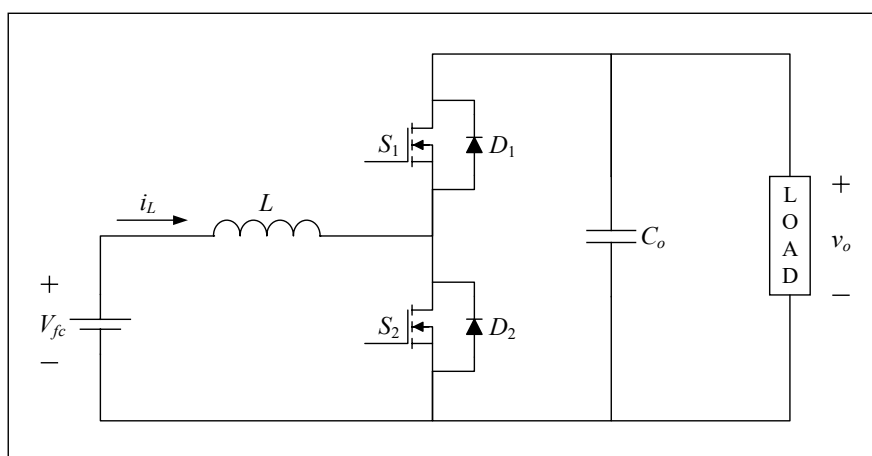
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		แบบหันหลังชนกัน (back-to-back) ซึ่งมีการปรับการทำงานแบบสมมาตรและมีอัตราขยายแรงดันเท่ากันทั้งในโหมดการชาร์จประจุและโหมดคายประจุพร้อมทั้งนำเสนอการวิเคราะห์ระบบโดยอาศัยผลตอบแทนเชิงความถี่และการประมาณค่าความต้านทานโหลดสมมูลเพื่อปรับปรุงสมรรถนะการทำงานของวงจรให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
2022	Wang, J., Wang, B., Zhang, L., Wang, J., Shchurov, N. I., and Malozyomov, B. V.	บทความนี้นำเสนอการทบทวนโทโพโลยีของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด (hybrid energy storage system : HESS) ในยานยนต์ไฟฟ้าทั้งแบบที่มีการแยกกราวด์และแบบไม่มีการแยกกราวด์ เพื่อประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของวงจรทั้งในด้านการแปลงผันพลังงาน ความเค้นของอุปกรณ์ การกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้า ประสิทธิภาพ ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า และจำนวนอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร
2023	Nimitti, F. G., Giacomini, J. C., and Andrade, A. M. S. S.	บทความนี้เสนอวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางชนิดไม่แยกกราวด์ โดยรวมวงจรแปลงผันแบบบัสและแบบบูสต์เข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันและลดความเค้นทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร ซึ่งส่งผลให้วงจรมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น
2025	Tuluhong, A., Xu, Z., Chang, Q., and Song, T.	บทความนี้เสนอวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางทั้งประเภทแบบแยกกราวด์และแบบไม่แยกกราวด์สำหรับใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (photovoltaic : PV)

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
		พร้อมทั้งวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรแต่ละประเภท นอกจากนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมตั้งแต่วิธีแบบดั้งเดิมไปจนถึงวิธีขั้นสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดการสูญเสียภายในวงจร
2026	Seesamlee, P., Pakdeeto, J., Suyapan, A., and Areerak, K-N.	บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบuck-บูสต์แบบสองทิศทางที่ใช้ในระบบยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบระหว่างการออกแบบด้วยวิธีแบบดั้งเดิมและวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ และยืนยันผลการออกแบบด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางดังตารางที่ 2.2 พบว่า วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากสามารถควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังโหลดของระบบได้และนอกจากนี้ยังมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ เพราะจากวงจรแปลงผันกำลังดังกล่าวสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดการทำงานแบบบูสต์ที่จะเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนและส่งจ่ายกำลังให้กับโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ส่วนโหมดการทำงานแบบบัค ซึ่งทำหน้าที่แปลงผันพลังงานสูญเสียขณะห้ามล้อเพื่อนำไปกักเก็บไว้ในอุปกรณ์เสริม เช่น แบตเตอรี่ โดยวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ วงจรประเภทแบบแยกกราวด์ และวงจรประเภทแบบไม่แยกกราวด์ โดยวงจรแบบแยกกราวด์จะอาศัยหม้อแปลงความถี่สูงเพื่อแยกกราวด์ระหว่างด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับระบบที่ต้องการแปลงระดับแรงดันในช่วงที่กว้างและต้องการความน่าเชื่อถือสูง แต่จะมีข้อจำกัดทางด้านโครงสร้างที่ซับซ้อน ต้นทุนสูง รวมถึงการสูญเสียต่าง ๆ

ที่เกิดจากหม้อแปลง ในขณะที่วงจรแบบไม่แยกกราวด์จะอาศัยการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งวงจรประเภทนี้มีจุดเด่นคือ มีน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพสูง เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการแปลงแรงดันไฟฟ้าในระดับที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกพิจารณาวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง (bidirectional buck-boost dc-dc converter) ซึ่งเป็นวงจรประเภทแบบไม่แยกกราวด์ โดยวงจรดังกล่าวมีข้อดีคือ เป็นวงจรที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน มีอุปกรณ์ภายในวงจรน้อย ทำให้การวิเคราะห์และการออกแบบอุปกรณ์ภายในวงจรสามารถดำเนินการได้ง่าย ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 โดยจากรูปจะพบว่า วงจรแปลงผันดังกล่าวมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำนวน 2 ตัว ที่มีการทำงานแบบสลับกัน ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุภายในวงจรสำหรับใช้กรองสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าตามลำดับ และโหลดซึ่งสำหรับระบบจักรยานไฟฟ้าจะเป็นชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดบัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบจักรยานไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบหลักสำคัญเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับโหลดของระบบ หรือโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ ซึ่งอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังและระบบควบคุม แต่อย่างไรก็ตาม

วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดดังกล่าวนอกจากจะส่งผลทำให้ระบบเกิดความไม่เป็นเชิงเส้นแล้ว ยังส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย เมื่อระบบเกิดการขาดเสถียรภาพจะส่งผลทำให้สมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมลดลง หรืออาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบโดยรวมได้ สำหรับระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถแสดงเป็นปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2006	Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C. H., and Williamson, G. A.	บทความนี้นำเสนอานิยามของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้า ซึ่งหมายถึงโหลดที่มีการรักษาค่ากำลังไฟฟ้าให้คงที่ เช่น วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ หรือโหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ โดยโหลดในลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์เชิงลบต่อระบบโดยรวม และเป็นสาเหตุทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพ
2008	Khaligh, A.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวต่อเสถียรภาพในระบบยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังเมื่อมีการควบคุมที่แสดงถึงค่าอิมพีแดนซ์เชิงลบต่อระบบโดยรวม และนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

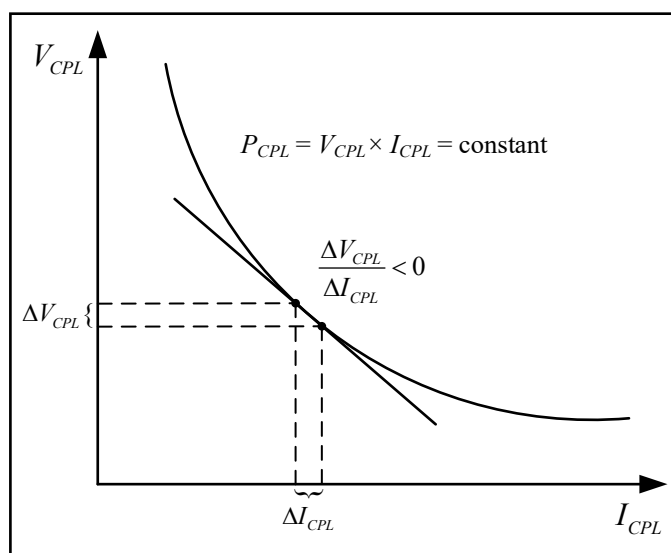
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2010	Rahimi, A. M., Williamson, G. A., and Emadi, A.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างเสถียรภาพของระบบ-อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยเทคนิคลูปยกเลิก (loop cancellation) ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นการป้อนกลับแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อชดเชยผลกระทบที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและสามารถทำให้ระบบกลับมาเสถียรภาพ
2020	Wu, H., Pickert, V., Ma, M., Ji, B., and Zhang, C.	บทความนี้แนะนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยวิธีเมทริกซ์แบบครบหนึ่งคาบ (complete-cycle matrix) เพื่อวิเคราะห์ความไม่เสถียรของระบบในช่วงเวลาเร็ว (fast timescale instability) ที่เกิดจากค่าความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวภายในระบบ
2022	Phosung, R., Areerak, K-N., Sopapirm, T., and Areerak, K-L.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยวิธีการชดเชยลูปป้อนไปหน้า (feedforward loop) ร่วมกับเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (adaptive tabu search : ATS) ซึ่งวิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบอันเนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์เชิงลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2023	Alipour, M., Zarei, J., Razavi-Far, R., Saif, M., Mijatovic, N., and Dragičević, T.	บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบดีซีไมโครกริดที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยผสมผสานระหว่างเทคนิคการทำให้เป็นเชิงเส้นแบบป้อนกลับที่แม่นยำ (exact feedback linearization) การควบคุมโหมดการเลื่อน (sliding mode control) และการควบคุมแบบย้อนกลับทีละขั้น (backstepping control) ร่วมกับตัวสังเกตการรบกวนแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear disturbance observe : NDO) เพื่อกำจัดผลกระทบต่อเสถียรภาพที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์เชิงลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
2024	Hassan, M. A., Su, C. L., Pou, J., Almakhles, D., Zhan, T. S., and Lo, K. Y.	บทความนี้นำเสนอการควบคุมแบบพาสซีฟที่มีความคงทน (robust passivity-base control) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทางชนิดอินเวอร์ตลิฟในระบบดีซีไมโครกริดบนเรือ (DC shipboard microgrid) เพื่อแก้ปัญหาความไม่เสถียรภาพที่เกิดจากค่าความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบ นอกจากนี้ยังได้มีการเพิ่มตัวสังเกตการรบกวนแบบไม่เป็นเชิงเส้น (NDO) เข้าไปในระบบเพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวของแรงดันบัสไฟตรง (DC bus)

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดังตารางที่ 2.3 พบว่า วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงานซึ่งในสภาวะคงตัว (steady state) จะมีค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ที่ค่าหนึ่งโดยขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของ

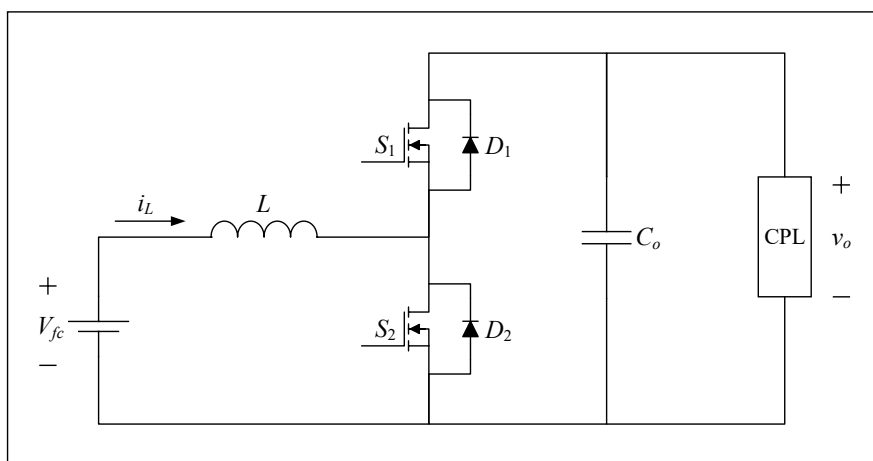
ระบบ (operating points) ดังนั้นการทำงานของวงจรแปลงผันดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยโหลดในลักษณะนี้จะมีเส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากรูปจะสังเกตได้ว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าของโหลด (I_{CPL}) มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด (V_{CPL}) มีค่าลดลง ในทางกลับกันหากกระแสไฟฟ้าของโหลดมีค่าลดลง แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อให้กำลังไฟฟ้าของโหลดมีค่าคงที่ จึงส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโหลดมีค่าติดลบ ($\frac{\Delta V_{CPL}}{\Delta I_{CPL}} < 0$) กล่าวคือ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะมีลักษณะเป็นค่าความต้านทานหรือค่าอิมพีแดนซ์แบบติดลบ (negative resistance/negative impedance) ต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อนำโหลดดังกล่าวนี้มาต่อกับระบบผ่านวงจรกรองจะทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพได้



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งคุณลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

เมื่อพิจารณาระบบขับเคลื่อนของจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนในรูปที่ 2.1 จะพบว่า โหลดชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีการควบคุมความเร็วรอบให้คงที่ จะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เนื่องจากภายในโหลดดังกล่าวจะมี วงจรแปลงผันกำลังที่ทำหน้าควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าตามความต้องการของผู้ขับ ซึ่งหากนำมาต่อเข้ากับระบบโดยรวมผ่านวงจรกรองจะส่งผลทำให้ความหน่วง (damping) ของวงจรกรองที่มีค่าเป็นบวกมีค่าลดลง เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ติดลบของโหลด ซึ่งทำให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายในระบบเพิ่มสูงขึ้น จนนำไปสู่การหลุดออกจาก

จุดปฏิบัติงานเดิม โดยเป็นสถานะที่เรียกว่า ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพและเมื่อระบบจักรยานไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมและอาจเป็นสาเหตุทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบได้รับความเสียหาย ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนโดยระบบจักรยานไฟฟ้าที่พิจารณาเมื่อแทนโหลดชุดขับเคลื่อนด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้สามารถคาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.4 ระบบจักรยานไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมและผลตอบสนองของระบบภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ รวมถึงใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ แต่โดยทั่วไปแบบจำลองของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังมักเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาอันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ดังกล่าวและได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปใช้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยสามารถแสดงเป็นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1997	Mahdavi, J., Emaadi, A., Bellar, M. D., and Ehsani, M.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี ได้แก่ วงจรแปลงผันแบบบับค วงจรแปลงผันแบบบูสต์ และวงจรแปลงผันแบบบับค-บูสต์ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging : GSSA) เพื่อกำจัดพจน์ตัวแปรเวลาอันเนื่องมาจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถอธิบายพฤติกรรมของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ
2004	Emadi, A.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันดีซีแบบหลายตัว (multiconverter DC power electronic systems) ต่อขนานกัน โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK
2004	Emadi, A.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเอซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกับโหลดตัวต้านทาน ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป และได้แนะนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กของระบบโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้น

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2007	Han, L., Wang, J., and Howe, D.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบหกพัลส์และสับสองพัลส์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะเพื่อกำจัดผลของสวิตช์ไดโอดภายในวงจรและได้แบบจำลองของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา อีกทั้งได้นำเสนอผลการเปลี่ยนแปลงมุมเหลื่อมของวงจรเรียงกระแสที่ส่งผลต่อความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์ขึ้น
2020	Azer, P., and Emadi, A.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีชนิดหลายเฟสแบบอินเตอร์ลีฟ (multi-phase interleaved) ทั้งประเภทแบบบับค แบบบูสต์ และแบบบับค-บูสต์ ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อจำลองพฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบ อีกทั้งได้มีการตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบกับแบบจำลองสวิตช์บนโปรแกรม PLECS
2021	Lu, Z., Song, J., Zheng, C., Xu, W., and Wang, X.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรบริดจ์แอคทีฟชนิดฮาล์ฟบริดจ์หลายชุดที่ต่อเรียงกัน (Cascade H-bridge Multiple Active Bridge : CHB-MAB) ที่มีการต่อแบบอินพุตอนุกรมเอาต์พุตขนาน (Input Series Output Parallel : ISOP) โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับแบบจำลองแม่นยำ

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	Chaicharoenaudomrung, K., Pakdeeto, J., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant) ของระบบดีซีไมโครกริดที่มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV arrays) จ่ายให้กับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ต่อแบบขนาน โดยใช้วิธีดีคิวร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อกำจัดฟังก์ชันการสวิตช์ของอุปกรณ์ภายในวงจร พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์
2022	Alrajhi, H.	บทความนี้เสนอแบบจำลองเฉลี่ยของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีแบบบัก แบบบูสต์ และแบบบัก-บูสต์ที่มีการต่อขนานกันสำหรับระบบดีซีไมโครกริด โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK
2024	Mokhtari, K., Shokri-Kojori, S., and Aliyari-Shoorehdeli, M.	บทความนี้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งควอไซด์ (quasi Z-source : qZSI) โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อใช้ออกแบบตัวควบคุมของระบบ และได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบด้วยวิธีอสมการเมทริกซ์แบบเชิงเส้น (linear matrix inequality) พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2025	Daengdon, S., Suyapan, A., Areerak, K-N., and Pakdeeto, J.	บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคซึ่งควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (sliding mode controller : SMC) โดยใช้วิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา และได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงมาวิเคราะห์ผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบ พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป และจากชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังดังตารางที่ 2.4 พบว่าโดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) อันเนื่องมาจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจร หากนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมและการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบจะส่งผลให้เกิดความยุ่งยากและความซับซ้อนอย่างมาก ด้วยเหตุนี้การกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์และได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมและการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบได้ง่ายมากยิ่งขึ้น โดยการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาที่นิยมใช้กับวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีคือ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ สำหรับงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ซึ่งมีระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุม ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมต่อการออกแบบระบบควบคุมและการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบ โดยรายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้ากำลังไม่เพียงแต่ทำให้ระบบเกิดความไม่มั่นคง แต่ยังส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมอีกด้วย ด้วยเหตุนี้การตรวจสอบและการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อให้สามารถคาดการณ์จุดทำงานของระบบที่อาจส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และหลีกเลี่ยงการทำงาน ณ จุดดังกล่าวได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถแสดงเป็นปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.5 ดังนี้

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S. V., Asher, G. M., and Thomas, D. W. P.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น เพื่อคาดการณ์จุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ นอกจากนี้ได้นำเสนอผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ และยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2012	Riccobono, A., and Santi, E.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้เกณฑ์ของมิตเดิลบรูก์ เกณฑ์อัตราขยายเฟื้อและเฟสเฟื้อ (gain margin phase margin criteria) เกณฑ์การใช้ข้อโต้แย้งฝั่งตรงข้าม (opposing argument criteria) และเกณฑ์การวิเคราะห์พลังงาน (energy analysis criteria) เพื่อกำหนดขอบเขตการมีเสถียรภาพของระบบบนแผนภาพโพลาร์ โดยอาศัยอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ทางฝั่งอินพุตและเอาต์พุตของวงจร นอกจากนี้ได้นำเสนอเกณฑ์การวิเคราะห์แบบพาสซีฟโดยใช้อิมพีแดนซ์รวมที่บัสไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับใช้ในการออกแบบระบบ
2015	Lu, X., Sun, K., Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Huang, L., and Wang, J.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กสำหรับระบบดีซีไมโครกริดที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยพิจารณาจากอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ทางฝั่งอินพุตและเอาต์พุตของระบบ พร้อมทั้งนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการสร้างอิมพีแดนซ์เสมือน (virtual-impedance based stabilizers) เพื่อเพิ่มการหน่วง (damping) ให้กับระบบ นอกจากนี้ได้ยืนยันผลการวิเคราะห์และการสร้างเสถียรภาพผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

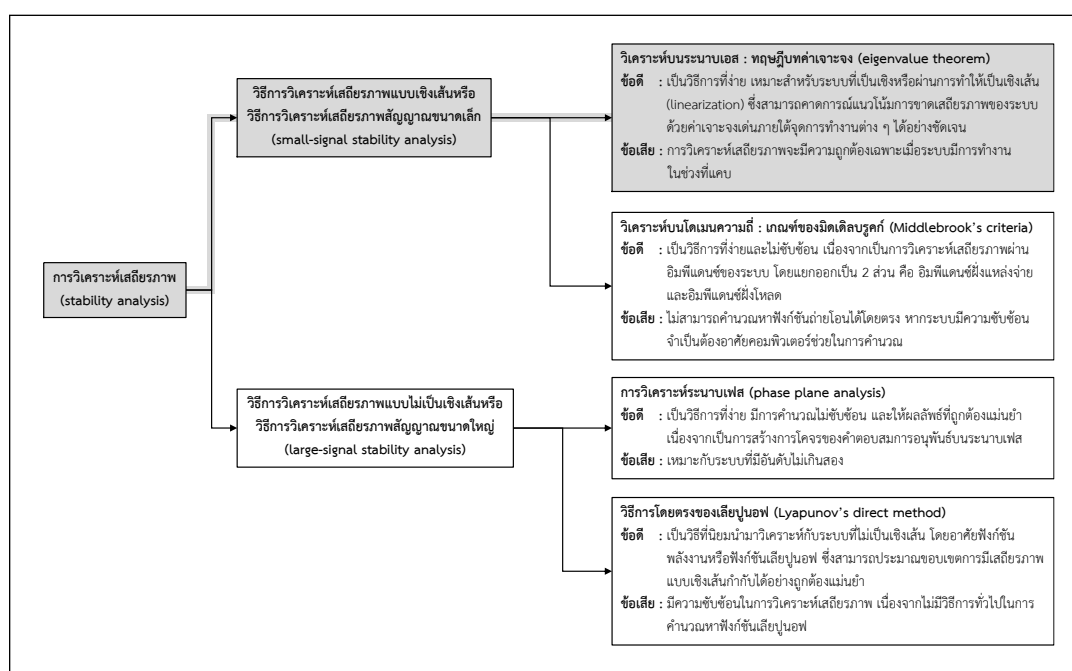
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	Amin, M., and Molinas, M.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กของวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี โดยเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ระหว่างวิธีการวิเคราะห์แบบอิมพีแดนซ์และทฤษฎีบทค่าเจาะจง ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีสามารถใช้ประเมินความไม่เสถียรของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2021	Pakdeeto, J., Areerak, K-N., Bozhko, S., and Areerak, K-L.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงสำหรับระบบดีซีไมโครกริดที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพของระบบโดยใช้เทคนิคการชดเชยแบบแอกทีฟทางฝั่งโหลดด้วยเทคนิคลูปยกเล็ก นอกจากนี้ได้ยืนยันผลการวิเคราะห์และการสร้างเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ
2021	Suyapan, A., Areerak, K-N., Bozhko, S., Yeoh, S. S., and Areerak, K-L.	บทความนี้เสนอการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีลูปยกเล็กร่วมกับสมการป้อนกลับอย่างง่ายสำหรับระบบไฟฟ้ากระแสตรงบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น (more electric aircraft : MEA) ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมทั้งนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กและสัญญาณขนาดใหญ่ โดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการวิเคราะห์ระนาบเฟส ตามลำดับ นอกจากนี้ได้มีการยืนยันผลการวิเคราะห์และการสร้างเสถียรภาพของระบบดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	Zhang, Y., Zhang, C., and Cai, X.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของการซิงโครไนซ์กริด (grid-synchronization stability : GSS) ที่มีการป้อนกลับแบบเฟสล็อกลูป (phase-locked loop) โดยอาศัยวิธีการโดยตรงของเลียบนอฟผ่านการสร้างฟังก์ชันเลียบนอฟเพื่อประเมินขอบเขตการมีเสถียรภาพของระบบได้อย่างแม่นยำ
2024	Phosung, R., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้นของระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยอาศัยทฤษฎีบทความเจาะจงและการวิเคราะห์ระนาบเฟส และได้แนะนำการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบโดยใช้เทคนิคลูปยกเลิกร่วมกับค่าอัตราขยายแบบป้อนกลับที่เหมาะสมเพื่อกำจัดความไม่เสถียรที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมทั้งยืนยันผลการวิเคราะห์และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป
2025	Liu, P., Zeng, X., Xi, J., Feehally, T., He, Y., and Pei, X.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสตรงบนเครื่องบินที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell-powered electric aircraft : FCEA) ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยอาศัยทฤษฎีบทความเจาะจงร่วมกับทฤษฎีการแตกแขนง (bifurcation theory) เพื่อประเมินความไม่เสถียรที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2026	Zeng, X., Cao, L., Ye, Y., Loo, K. H., and Huang, X.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพ สัญญาณขนาดเล็กด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และสัญญาณขนาดใหญ่ด้วยวิธีการโดยตรงของ เลียปูนอฟ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังแบบดิวอัล- แอกทีฟบริดจ์ (dual-active bridge : DAB) ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และประเมินขอบเขต การมีเสถียรภาพของระบบ พร้อมทั้งยืนยันผลการ วิเคราะห์จากชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2.5 แผนภาพสรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดังตารางที่ 2.5 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจากรูป จะพบว่า วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถจำแนกได้เป็น 2 วิธีการหลัก ๆ ได้แก่ วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นหรือวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณ

ขนาดเล็ก (small-signal stability analysis) ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการสำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้น แต่ในกรณีที่ระบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถอาศัยการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) อันดับหนึ่ง เพื่อให้แบบจำลองของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น และการวิเคราะห์เสถียรภาพมี 2 แนวทาง คือ แนวทางที่ 1 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) เป็นวิธีการวิเคราะห์ค่าเจาะจงเด่น (dominant poles) ของระบบบนระนาบเอส ในขณะที่แนวทางที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของมิตเติลบุรค์ เป็นวิธีการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ทางฝั่งแหล่งจ่ายหรืออินพุตอิมพีแดนซ์ (input impedance) และอิมพีแดนซ์ทางฝั่งโหลดหรือเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (output impedance) ของระบบบนโดเมนความถี่ โดยแนวทางทั้งสองที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ง่าย ไม่ซับซ้อนและสามารถคาดการณ์จุดการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างแม่นยำ แต่จะมีข้อจำกัดคือการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะมีความถูกต้องในช่วงการทำงานที่แคบ (small range operation) เท่านั้น สำหรับวิธีที่สองเป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ (large-signal stability analysis) วิธีดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกัน 2 แนวทางที่นิยมใช้ คือ แนวทางที่ 1 การวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase plane analysis) เป็นวิธีการทางกราฟิกที่จะสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ (trajectory) ลงบนระนาบเฟส จากนั้นจะดำเนินการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากการโคจรดังกล่าว ซึ่งเป็นแนวทางที่ง่ายและให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวมีข้อจำกัดคือ สามารถนำมาวิเคราะห์กับระบบที่มีอันดับไม่เกิน 2 เท่านั้น ในขณะที่แนวทางที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method) เป็นแนวทางที่อาศัยการสร้างฟังก์ชันพลังงาน (energy-like function) หรือฟังก์ชันเลียปูนอฟเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง และยังสามารถประมาณขอบเขตการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (region of asymptotic stability : RAS) ได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวจะมีความยุ่งยากและซับซ้อน เนื่องจากไม่มีวิธีการทั่วไปในการคำนวณหาฟังก์ชันพลังงานหรือฟังก์ชันเลียปูนอฟ สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ดังแสดงด้วยพื้นที่สีเทาในรูปที่ 2.4 เนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถคาดการณ์จุดปฏิบัติงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบที่ส่งผลต่อเสถียรภาพได้อีกด้วย

2.7 สรุป

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสถาปัตยกรรมของระบบจ่ายไฟฟ้า ผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง พร้อมทั้งสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปรีทัศน์วรรณกรรม ซึ่งถือเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับนำไปใช้เป็นแนวทางของการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจ่ายไฟฟ้าพลังงานไฮโดรเจนที่ได้รับผลกระทบจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว เพื่อให้ทราบถึงจุดการทำงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และหลีกเลี่ยงการทำงาน ณ จุดดังกล่าว อีกทั้งสามารถประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบเพื่อใช้เป็นแนวทางการออกแบบระบบให้กับวิศวกร ซึ่งจะได้รับคำแนะนำไว้ในบทต่อ ๆ ไป