บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ดำเนินการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อนซึ่งจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าได้มีผู้ทำการศึกษาค้นคว้า และพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นในบทที่ 2 นี้ จึงได้นำเสนอการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยแบ่งรายละเอียดออกเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยแต่ละหัวข้อได้มีการนำเสนองานวิจัยตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของงานวิจัย พร้อมทั้งสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัยและเนื้อหาในส่วนท้ายของบทได้นำเสนองานวิจัยที่ได้รับการต่อยอดและพัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุมได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับระบบต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการใช้งานที่สูง สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าได้ตามความต้องการ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับระบบโดยรวมได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามตัวควบคุมแต่ละแบบมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการนำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อศึกษาและค้นหาตัวควบคุมที่มีความเหมาะสมต่อระบบไฟฟ้าที่พิจารณา รายละเอียดดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2020	A. Kumar, P. Dwivedi, and S. Bose	บทความนี้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ใช้ในการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัค โดยการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนใช้พื้นผิวการเลื่อนที่เป็นการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัค
2020	S. H. M. Hashmi, and A. Y. Memo	บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยเน้นไปที่การนำเสนอการควบคุมที่มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบ
2021	S. Mohanty, A. Choudhury, S. Pati, S. K. Kar, and S. Khatua	บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมโหมดการเลื่อน สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัคเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ผลการเปรียบเทียบพบว่า วงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนไม่ปรากฏการพุ่งเกิน และสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอ กล่าวคือ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนมีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าและมีความน่าเชื่อถือสูงกว่าตัวควบคุมพีไอ
2021	J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K. Chaicharoenudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัค โดยการออกแบบพารามิเตอร์ดังกล่าวใช้วิธีการหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดและเทียบสัมประสิทธิ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบมาตรฐานของระบบอันดับสอง

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	I. -C. Mituletu, D. Anghel, L. Ardeljan, and M. Magda	บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งสามารถควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตัวควบคุมดังกล่าวจะให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว สามารถควบคุมระบบได้ตามต้องการ และมีความคงทนต่อการรบกวนจากภายนอก
2021	T. K. Roy, M. A. H. Pramanik, F. Faria, and S. K. Ghosh	บทความนี้นำเสนอการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผ่านการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสามารถให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วและมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดและการรบกวนจากภายนอก
2022	S. Mouslim, S. Jenkal, B. Imodane, M. Ajaamoum, and M. Oubella	บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยการออกแบบตัวควบคุมอาศัยสมการพื้นผิวการเลื่อนที่เป็นการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะ
2022	N. Setthawong, K-N. Areerak, P. Santiprapan, C. Panpean, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรกรองกำลังไฟฟ้าแบบแอกทีฟ โดยตัวควบคุมดังกล่าวจะให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว มีการพุ่งเกินที่ต่ำและมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดและการรบกวนจากภายนอก
2022	J. M. Kumbhare, S. G. Kadwane, and M. Patil	บทความนี้กล่าวถึงการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ ซึ่งมีข้อดีคือให้ผลตอบสนองที่ดีและแม่นยำ รวมถึงมีความคงทนต่อการรบกวน แต่มีข้อเสียคือการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมมีความยุ่งยากและซับซ้อน
2022	G. Ramesh, and V. R. Babu	บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมฟัซซี่ สำหรับการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัค โดยผลการเปรียบเทียบพบว่า ตัวควบคุมฟัซซี่มีผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอ

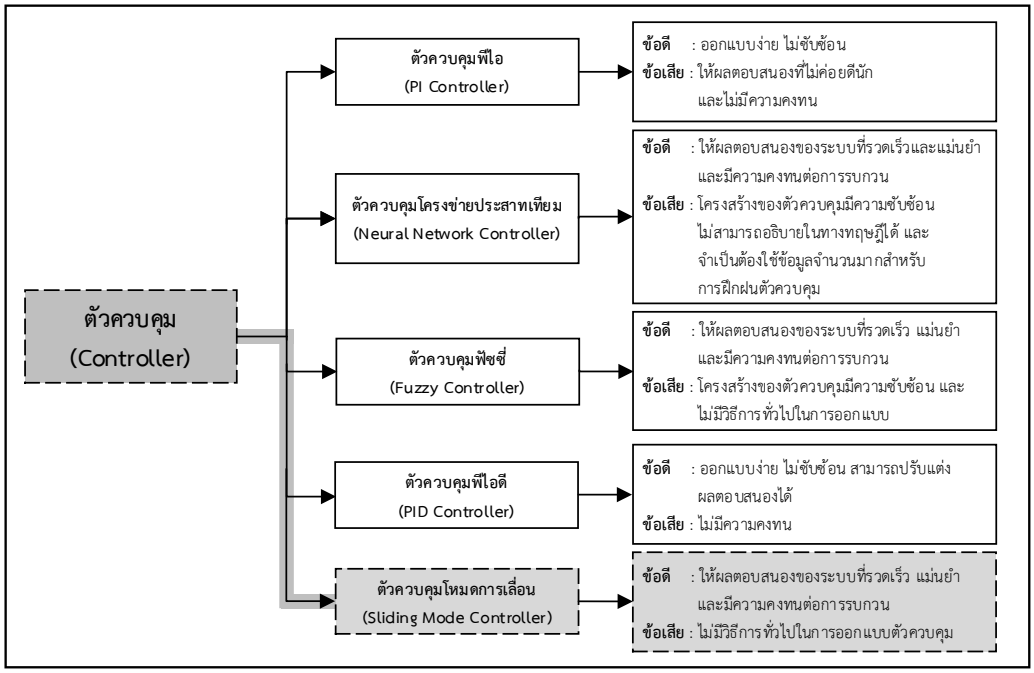
ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	S. Yadav, K. Namrata, N. Kumar, and A. Samadhiya	บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคด้วยตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งให้ผลตอบสนองของระบบที่รวดเร็วและแม่นยำ แต่มีข้อเสียคือเกิดการพุ่งเกินที่สูง อีกทั้งการออกแบบตัวควบคุมมีความยุ่งยากและซับซ้อน
2022	S. Kalson, and S. R. Kar	บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอดี ตัวควบคุมฟัซซี่ และตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับวงจรแปลงผันแบบบัค ผลการเปรียบเทียบพบว่า ตัวควบคุมฟัซซี่มีการพุ่งเกินที่ต่ำที่สุดและสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วที่สุด ตัวควบคุมพีไอดีมีเวลาขาขึ้นที่เร็วที่สุด ในขณะที่ตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียมมีความคงทนต่อการรบกวนมากที่สุด
2023	M. N. Tarik, S. P. Biswas, S. Mondal, N. I. Nahin, A. K. Paul, and S. S. Haque	บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคที่ใช้ในการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมพีไอ ซึ่งเป็นตัวควบคุมพื้นฐานที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ของตัวควบคุมพีไออาจไม่ดีนัก ซึ่งอาจส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยตรง
2023	K. Gaurav, D. Joshi, and S. Upadhyaya	บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมระหว่างตัวควบคุมฟัซซี่และตัวควบคุมพีไอ สำหรับวงจรแปลงผันแบบบูสต์ ผลการเปรียบเทียบพบว่า ตัวควบคุมฟัซซี่มีสมรรถนะการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอ โดยสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้รวดเร็วกว่าตัวควบคุมพีไอ
2023	M. Adeel, U. Fayyaz, U. Rafi, and M. Umar Farooq	บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวงจรแอนะล็อกเพื่อควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัค ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีไอที่ออกแบบมีผลตอบสนองที่ดี อีกทั้งยังสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้อย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2024	T. Mao, L. Li, and Y. Cao	บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคชนิดซิงโครนัสด้วยการใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผลตอบสนองของระบบมีความรวดเร็วและมีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอก
2024	W. Ning, L. Li, and Y. Cao	บทความนี้นำเสนอการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคโดยใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งสามารถควบคุมได้ทั้งระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนยังมีความคงทนสูงและให้ผลตอบสนองที่ดีและรวดเร็ว

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังตารางที่ 2.1 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ดังรูปที่ 2.1 ดังนี้



รูปที่ 2.1 แผนภาพตัวควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

จากแผนภาพการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม ตัวควบคุมฟัซซี่ ตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยตัวควบคุมพีไอเป็นตัวควบคุมที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและมีวิธีการทั่วไปในการออกแบบ อีกทั้งยังสามารถลดค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวได้ ซึ่งทำให้ผลตอบสนองของระบบมีความแม่นยำ แต่มีข้อเสียคือ ในบางครั้งผลตอบสนองเชิงพลวัตของระบบที่ได้อาจไม่ค่อยดีนัก และไม่มีความคงทนต่อสิ่งรบกวนภายจากภายนอก รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบ สำหรับตัวควบคุมพีไอดี มีข้อดีคือ มีวิธีการทั่วไปในการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ซึ่งสามารถปรับแต่งผลตอบสนองเชิงพลวัตของระบบ ได้แต่มีข้อเสียคือ ไม่มีความคงทนต่อสิ่งรบกวนภายนอกและการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบ ในขณะที่ตัวควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม มีข้อดีคือ ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว แม่นยำ และมีความคงทนต่อสิ่งรบกวน แต่มีข้อเสียคือ โครงสร้างของตัวควบคุมมีความซับซ้อนและไม่สามารถอธิบายในทางทฤษฎีได้ อีกทั้งยังจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากมาฝึกฝนเพื่อให้สามารถควบคุมระบบได้อย่างมีสรรมถนะ สำหรับตัวควบคุมฟัซซี่ ถึงแม้จะมีผลตอบสนองที่รวดเร็ว แม่นยำ และมีความคงทนต่อสิ่งรบกวน แต่มีข้อเสียคือโครงสร้างของตัวควบคุมมีความซับซ้อนและไม่มีวิธีการทั่วไปในการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับการควบคุมวงจรแปลงผันแบบบัคของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังแสดงด้วยพื้นที่สีเทาในรูปที่ 2.1 เนื่องจากตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว แม่นยำ อีกทั้งยังมีความคงทนต่อการรบกวนและการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบอีกด้วย อย่างไรก็ตาม วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม ไม่ว่าจะใช้ตัวควบคุมใด ๆ ล้วนแต่ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณานั้นเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากพฤติกรรมของวงจรแปลงผันที่เปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยเฉพาะวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมถือเป็นสิ่งสำคัญในการขับเคลื่อนและพัฒนานวัตกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมก่อนที่จะส่งจ่ายไปยังโหลดต่าง ๆ ภายในระบบ อย่างไรก็ตามเมื่อวงจรแปลงผันกำลังถูกเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรอง จะพบว่าวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยตรง อันเป็นเหตุนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า จนกระทั่งระบบไฟฟ้าโดยรวมอาจเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

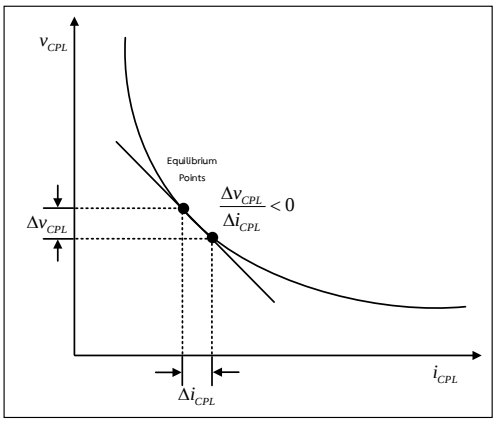
ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2019	K. E. L. Marcillo, and et al.	บทความนี้นำเสนอการทำงานของระบบที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมหลายวงจร ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังเหล่านี้จะมีพฤติกรรมเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพิ่มขึ้น ระบบจะเกิดการขาดเสถียรภาพ และอาจนำไปสู่ความเสียหายของระบบโดยรวมได้
2019	O. Lorzadeh, I. Lorzadeh, M. N. Soltani, and A. Hajizadeh	บทความนี้นำเสนอปัญหาเสถียรภาพในระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่เชื่อมต่อกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวผ่านวงจรกรอง ซึ่งโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะมีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบ ในขณะที่การหน่วงของวงจรกรองมีลักษณะเป็นตัวต้านทานเชิงบวก เมื่อความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวไปลดทอนความต้านทานเชิงบวกของการหน่วงจะทำให้สัญญาณไฟฟ้าของตัวกรองเกิดการสั่นไกวเพิ่มขึ้น และอาจนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบ
2020	X. Li, X. Zhang, W. Jiang, J. Wang, P. Wang, and X. Wu	บทความนี้นำเสนอระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันแบบบูสต์ที่มีการควบคุมหลายวงจร โดยวงจรแปลงผันแบบบูสต์นี้จะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโครงข่าย
2020	B. Babaiahgari, Y. Jeong, and J. -D. Park	บทความนี้นำเสนอปัญหาเกี่ยวกับเสถียรภาพในระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก อันเนื่องมาจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยโหลดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบ เมื่อความต้านทานติดลบของโหลดเพิ่มขึ้น จะทำให้การหน่วงของระบบซึ่งมีลักษณะเป็นตัวต้านทานเชิงบวกลดลง จนนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบ

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2020	A. D. Scher, M. Kosík, P. Pham, D. Costinett, and E. Hossain	บทความนี้นำเสนอระบบส่งผ่านพลังงานด้วยการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (inductive power transfer system) ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเชื่อมต่ออยู่ ซึ่งโหลดนี้จะมีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อความต้านทานติดลบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ
2021	M. Mahdavyfakhr, N. Amiri, H. Lin, and J. Jatskevich	บทความนี้นำเสนอระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยโหลดดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบที่ส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ
2022	C. Yuan, Y. Huangfu, H. Bai, S. Pang, H. Zhang, and W. Shi	บทความนี้นำเสนอระบบไฟฟ้าของอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแปลงผันแบบบูสต์ และวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมเหล่านี้มีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยรวม
2023	M. Sebastià-Rullo, A. Cid-Pastor, H. Valderrama-Blavi, A. E. Aroudi, and L. M. Salamero	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังแบบบูสต์ที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเชื่อมต่อกับระบบผ่านวงจรกรอง ซึ่งโหลดดังกล่าวนี้มีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบ ที่จะไปลดทอนความเป็นบวกของการหน่วงของวงจรกรองจนทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ
2023	S. Deng, T. Lei, X. Jin, H. Yu, X. Zhang, and X. Zhang	บทความนี้นำเสนอระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) เป็นแหล่งพลังงาน โดยมีโหลดกำลังไฟฟ้า-คงตัวต่อกับระบบผ่านวงจรกรอง ซึ่งความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะไปลดทอนค่าความหน่วงของวงจรกรองที่มีค่าเป็นบวกจนนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบ

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 พบว่า วงจรแปลงผันกำลังเมื่อมีการควบคุมการทำงานให้อยู่ในสภาวะสมดุลที่จุดปฏิบัติงานหรือจุดสมดุลของระบบ (operating points หรือ equilibrium points) จะทำให้กำลังไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังมีค่าคงที่ ดังนั้นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจึงมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งมีคุณลักษณะของแรงดันไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 จากรูปจะสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเปลี่ยนแปลง (Δi_{CPL}) ด้วยการเพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวก็จะมีการเปลี่ยนแปลง (Δv_{CPL}) ด้วยการลดลง ในทางกลับกันเมื่อกระแสไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวลดลง แรงดันไฟฟ้าของโหลกำลังไฟฟ้าคงตัวก็จะเพิ่มขึ้น เพื่อให้กำลังไฟฟ้ามีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้จะส่งผลให้ค่าความต้านทานของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเป็นลบหรืออิมพีแดนซ์ติดลบต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งหากนำโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านวงจรกรอง โหลดดังกล่าวจะส่งผลให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้น อันเนื่องจากค่าความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะไปลดทอนค่าความหน่วง (damping) ของวงจรกรองซึ่งปกติมีค่าความต้านทานเป็นบวก โดยการลดลงของค่าความหน่วงนี้จะส่งผลให้ แรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรองเกิดการกระเพื่อม ซึ่งหากปริมาณกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพิ่มขึ้นนั่นคืออิมพีแดนซ์ของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะมีค่าติดลบเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรองเกิดการกระเพื่อมเพิ่มขึ้นอย่างมากและไม่สามารถลู่เข้าสู่จุดปฏิบัติงานของระบบจนกระทั่งระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้น โดยการขาดเสถียรภาพของระบบอาจจะส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมหรืออาจส่งผลให้ระบบโดยรวมเกิดความเสียหายได้ นอกจากนี้โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้น กล่าวคือเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งทำให้ระบบมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่มีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพื่อให้สามารถคาดเดาปริมาณกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่จะส่งผลให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ดังรายละเอียดที่จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.2 คุณลักษณะสมบัติแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากหัวข้อที่ 2.3 ที่ผ่านมาพบว่า วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเหมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีลักษณะเป็นค่าความต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อนำโหลดดังกล่าวมาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านวงจรกรอง ความต้านทานติดลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จะไปลดทอนค่าความต้านทานที่เป็นบวกของความหน่วงของวงจรกรอง ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรองเกิดการกระเพื่อม จนนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้ ดังนั้นหัวข้อนี้จึงเป็นการนำเสนอการศึกษางานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นวิธีสำหรับการคาดเดาปริมาณกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่จะส่งผลทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	W. Du, J. Zhang, Y. Zhang, Z. Qian, and F. Peng	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังในรถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ นอกจากนี้ยังได้มีการนำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านการวิเคราะห์ระนาบเฟส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม
2018	Y. Shen, S. Yang, H. Xing, D. Wang, and L. Wang	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ
2019	Y. Ma, K. Corzine, A. Maqsood, F. Gao, and K. Wang	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมทำงานขนานกันในระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก โดยใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คำนึงถึงเสถียรภาพของระบบอีกด้วย

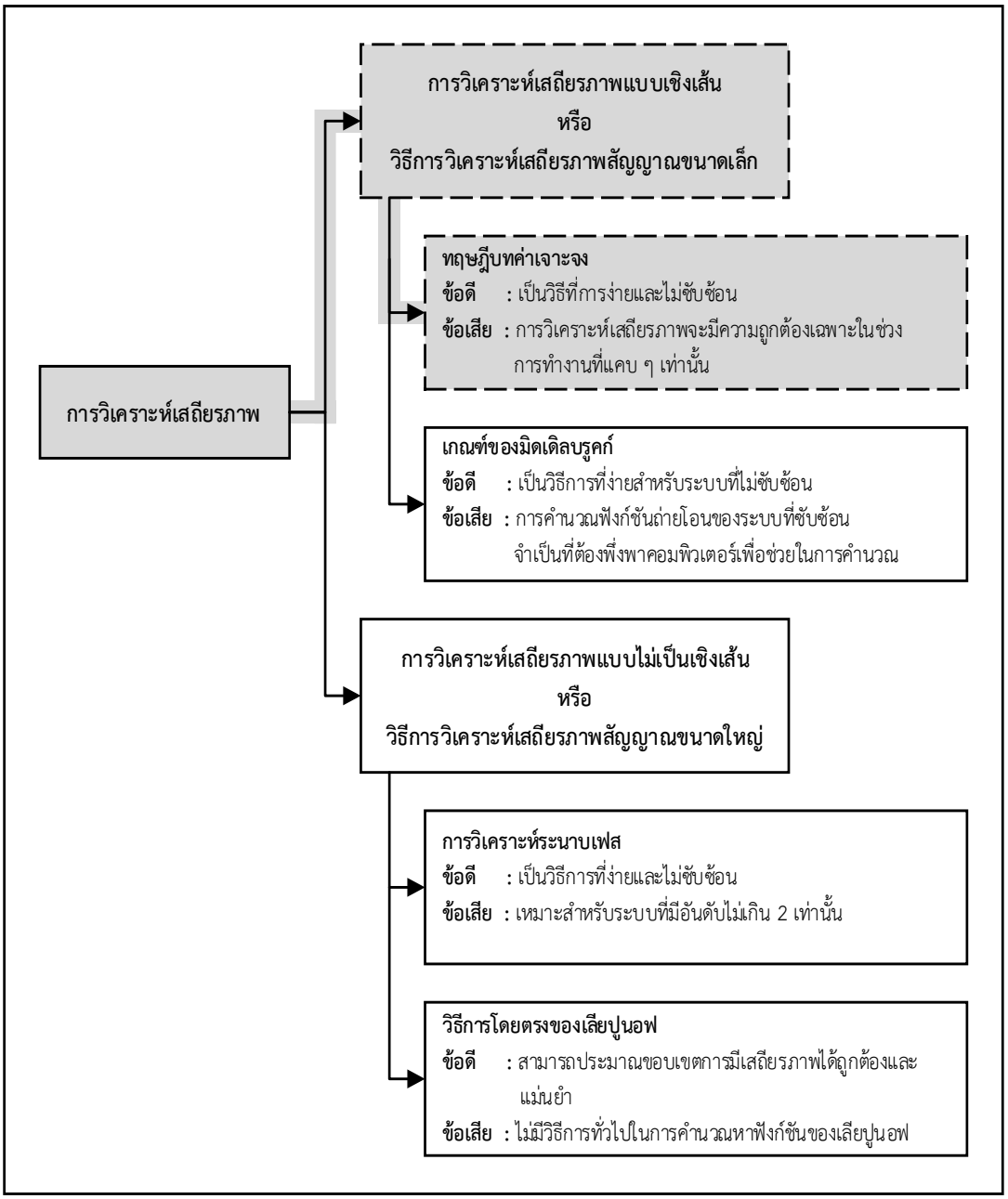
ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2020	M. Veerachary, and Anu	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันแบบบัคอันดับที่สี่ (fourth-order buck converter) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอ
2020	F. M. Serra, G. L. Magaldi, W. Gil-González, and O. Montoya	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่อาศัยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอโดยพิจารณาเสถียรภาพของระบบร่วมด้วย
2021	R. Roy, and S. Kapat	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคที่เชื่อมต่อกับโหลดวงจรแปลงผันแบบบัคผ่านวงจรกรอง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูค นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบอีกด้วย
2021	B. Babes, S. Mekhilef, A. Boutaghane, and L. Rahmani	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ
2022	M. Veerachary, and Anu	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังที่มีควบคุมและเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	H. Li, and et al	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันกำลังแบบบัคที่มีตัวเหนี่ยวนำสองตัวเชื่อมต่อกัน (coupled inductor based buck converter) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเมื่อมีการปรับเปลี่ยนขนาดของตัวเหนี่ยวนำทั้งสอง
2023	G. Ghosh, S. Vyapari, and V. N. R	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของโหลดที่ควบคุมแบบเชิงเส้นในระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และได้นำเสนอผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเมื่อขนาดของตัวต้านทานมีการเปลี่ยนแปลง
2023	Z. M. Dalala, O. S. Saadeh and, Z. U. Zahid	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบกักเก็บพลังงานที่เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังผ่านตัวเก็บประจุทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง (DC link capacitor) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูค และได้นำเสนอผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวเก็บประจุทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดังตารางที่ 2.3 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนี้



รูปที่ 2.3 แผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากแผนภาพในรูปที่ 2.3 จะพบว่าการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 แนวทางหลัก ได้แก่ การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal stability analysis) และการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ (large-signal stability analysis) การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้น ส่วนใหญ่มักจะใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง และเกณฑ์ของมิดเดิลบรูค ซึ่งทฤษฎีบทค่าเจาะจงจะพิจารณาค่าเจาะจงของระบบที่คำนวณผ่านแบบจำลอง

ทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ส่วนเกณฑ์ของมิดเดิลบรูคเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นด้วยการเขียนแผนภาพโบเด (bode plot) ของฟังก์ชันถ่ายโอนอิมพีแดนซ์ขาเข้าและขาออกของระบบ ซึ่งการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นทั้ง 2 วิธีนี้ มีข้อดีที่เหมือนกันคือ เป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่มีข้อจำกัดคือ ความแม่นยำในการคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพของระบบที่พิจารณาจะจำกัดอยู่ในช่วงการทำงานที่แคบ ๆ เท่านั้น สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยตรงด้วยทฤษฎีควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งนิยมใช้วิธีการวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase plane analysis) และวิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method) โดยการวิเคราะห์ระนาบเฟสเป็นวิธีการสร้างกราฟิกที่แสดงวิถีการโคจรของสมการอนุพันธ์ของระบบลงบนระนาบของตัวแปรสถานะสองตัว จากนั้นตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากวิถีการโคจรบนระนาบเฟส อย่างไรก็ตามวิธีนี้สามารถใช้กับระบบที่มีอันดับไม่เกินสองเท่านั้น แต่เมื่อใช้กับระบบที่มีอันดับสูงกว่าจะต้องแปลงระบบดังกล่าวให้เป็นระบบอันดับสองก่อน ซึ่งอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้ ในขณะที่วิธีการโดยตรงของเลียปูนอฟเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและสามารถประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (region of asymptotic stability: RAS) ได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีความยุ่งยากและซับซ้อนในการหาฟังก์ชันเลียปูนอฟ (Lyapunov's function) เนื่องจากไม่มีวิธีการทั่วไปในการคำนวณหาฟังก์ชันดังกล่าว ดังนั้นจากที่กล่าวมาทั้งหมดดังข้างต้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง ดังแสดงด้วยพื้นที่สีเทาในรูปที่ 2.3 สำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพไม่ว่าจะอาศัยวิธีการใด ๆ จำเป็นต้องดำเนินการผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังจะถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

โดยทั่วไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจะเป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเนื่องจากผลของอุปกรณ์สวิตช์ภายในระบบ ซึ่งหากนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพจะมีความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นในหัวข้อที่ 2.5 นี้จึงเป็นการนำเสนอการศึกษางานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมต่อการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบ โดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K. Chaicharoenudomrung, K-N. Areerak, and K-P. Areerak	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยดำเนินการผ่านวิธีการแปลงดีคิว ในขณะที่ส่วนของวงจรแปลงผันแบบบัค ดำเนินการโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะ-ทั่วไป
2021	W. Liu, M. Zhang, and M. Zhan	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยวิธีการแปลงดีคิว พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม SIMULINK/MATLAB ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความถูกต้อง
2022	R. Phosung, K-N. Areerak, T. Sopapirm, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีซึ่งมีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ 2 วงจรที่ต่อขนานกัน โดยในส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีดำเนินการผ่านวิธีการแปลงดีคิว ในขณะที่วงจรแปลงผันแบบบัค จะใช้วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิ-สถานะทั่วไปเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ
2022	S. Zhao, C. Tang, Y. Fei, and P. Deng	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอของยานยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธีการค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป เพื่อใช้สำหรับออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	K. Chaicharoenaudomrung, J. Pakdeeto, K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก ซึ่งมีวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีแบบสองทิศทาง (bi-directional converter) และวงจรแปลงผันแบบบูสต์เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว การพิสูจน์หาแบบจำลองของวงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซีดำเนินการโดยใช้วิธีการแปลงดีคิว ในขณะที่วงจรแปลงผันแบบบัคและวงจรแปลงผันแบบบูสต์ดำเนินการพิสูจน์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิ-สถานะทั่วไป
2023	K. Jessen, M. Soltani, A. Hajizadeh, S. H. Jensen, and E. Schaltz	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองทิศทาง โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ย-ปริภูมิสถานะทั่วไป นอกจากนี้ยังได้มีการนำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่อาศัยแบบจำลองดังกล่าว ซึ่งจากผลการตรวจสอบพบว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้สามารถควบคุมได้อย่างมีสมรรถนะ
2024	J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซี ซึ่งมีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยการพิสูจน์ในส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีดำเนินการผ่านวิธีการแปลงดีคิว ในขณะที่วงจรแปลงผันแบบบัคพิสูจน์ผ่านวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพที่อาศัยแบบจำลองดังกล่าวอีกด้วย

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังแสดงในตารางที่ 2.4 พบว่า อุปกรณ์สวิตช์ในวงจรแปลงผันกำลังจะส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งหากนำไปใช้สำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่มีการกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจึงมีความสำคัญ ในปัจจุบันการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลามี 2 วิธีการที่ได้รับความนิยม ได้แก่ วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (generalized state-space averaging method: GSSA method) และวิธีดีคิว (DQ method) วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป มักใช้ในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ได้มีความแม่นยำ ในขณะที่วิธีดีคิวจะนิยมใช้กับส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส เช่น วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูงและไม่ซับซ้อน สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ที่ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะประกอบไปด้วยส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสและส่วนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงใช้วิธีผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา เพื่อให้ได้แบบจำลองของระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษางานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะได้รับการนำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีการควบคุมจะมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดลักษณะนี้จะมีลักษณะเป็นตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อนำโหลดดังกล่าวไปเชื่อมต่อกับระบบ ผ่านวงจรกรอง ตัวต้านทานที่เป็นลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะไปลดทอนค่าความหน่วงที่เป็นบวกของวงจรกรอง ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรองเกิดการสั่นไกว เมื่อปริมาณกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะมีค่าความต้านทานติดลบเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรองเกิดการสั่นไกวเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งไม่สามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลและขาดเสถียรภาพของระบบไปในที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเพื่อคาดเดา แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพเพียงอย่างเดียว

ไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงดำเนินการศึกษาแนวทางการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพโดยรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแสดงได้ดังตารางที่ 2.5 ดังนี้

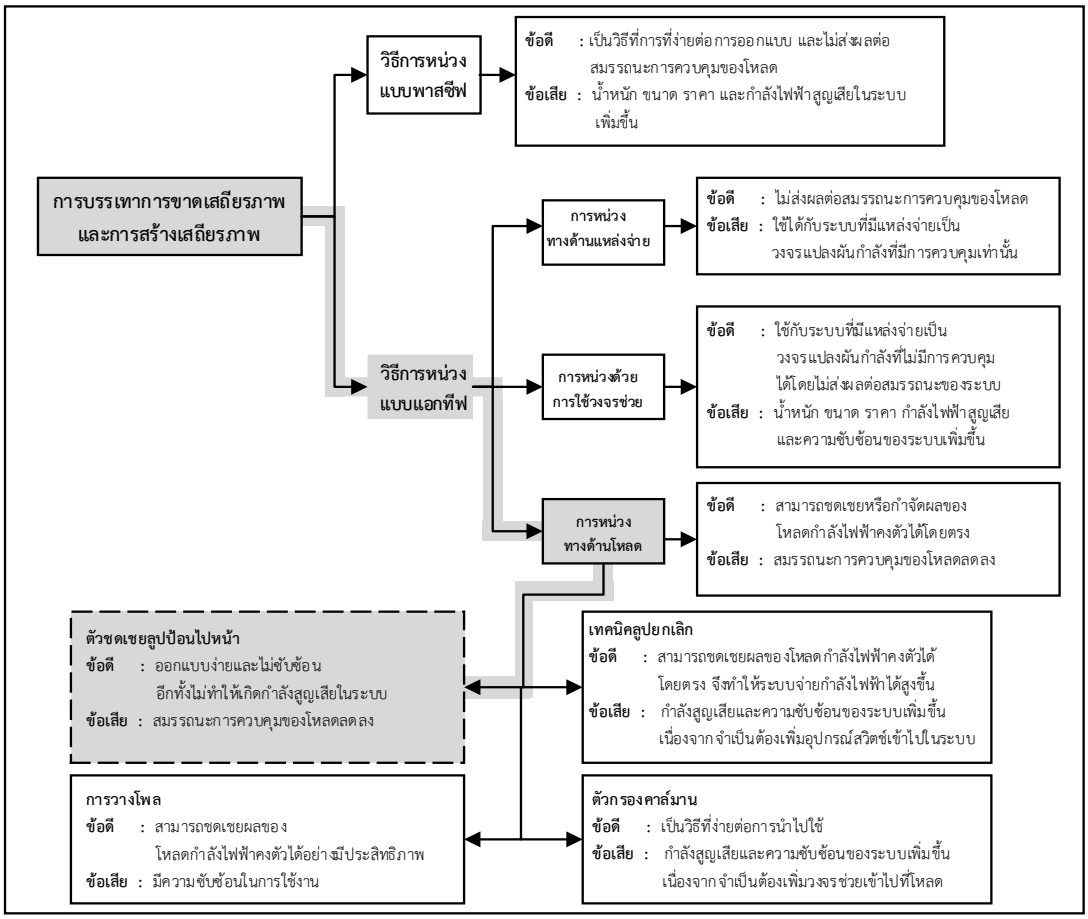
ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2018	K-N. Areerak, T. Sopapirm, S. Bozhko, C.I. Hill, A. Suyapan, and K-L. Areerak.	บทความนี้นำเสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีด้วยเทคนิคลูปยกเลิกพร้อมทั้งยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ
2021	J. Pakdeeto, K-N. Areerak, S. Bozhko, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่มีการเชื่อมต่อกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยใช้เทคนิคการชดเชยแบบแอกทีฟทางด้านโหลดด้วยเทคนิคลูปยกเลิกและได้นำเสนอผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม SIMULINK/MATLAB
2022	Z. Shan, S. Fan, X. Liu, X. Ding, and Z. Li	บทความนี้นำเสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคโดยใช้วิธีการชดเชยแบบพาสซีฟด้วยวงจรช่วยซึ่งผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม SIMULINK/MATLAB แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถสร้างเสถียรภาพของระบบได้
2022	K. Miao, Y. Zhang, J. Zhang, S. Fan, and X. Yin	บทความนี้นำเสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบโครงข่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก ซึ่งมีการเชื่อมต่อกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวผ่านวงจรกรอง โดยการชดเชยดำเนินการผ่านตัวกรองความถี่ต่ำอันดับสองที่กรองสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นป้อนสัญญาณกลับไปยังตัวควบคุมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวเพื่อสร้างความต้านทานเสมือนที่ขนานกับวงจรกรอง

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	Z. Shan, S. Fan, X. Liu, X. Ding, and Z. Li	บทความนี้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลังดีซีเป็นดีซี โดยการเพิ่มวงจรช่วยเข้าไประหว่างแหล่งจ่ายและโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งวงจรช่วยเป็นการเพิ่มตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบ ทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพได้
2024	J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ โดยการบรรเทาเสถียรภาพได้ดำเนินการด้วยวิธีการวางโพล
2024	R. Phosung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak	บทความนี้นำเสนอวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินที่เพิ่มมากขึ้นโดยใช้การชดเชยแบบแอกทีฟทางด้านโหลดด้วยเทคนิคลูปยกเลิก พร้อมทั้งได้นำเสนอการออกแบบพารามิเตอร์ของลูปยกเลิกที่อาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งได้ตรวจสอบผลของเสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม SIMULINK/MATLAB และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป
2024	S. Bouroju, and A. Tah	บทความนี้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก ด้วยวิธีการหน่วงแบบแอกทีฟทางด้านโหลด โดยอาศัยการดัดแปลงตัวควบคุม พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีการหน่วงแบบพาสซีฟ ซึ่งพบว่า วิธีการหน่วงแบบพาสจะส่งผลให้ขนาด ราคา น้ำหนัก และกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเพิ่มมากขึ้น

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดังตารางที่ 2.5 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยจากแผนภาพจะเห็นว่าวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถ แบ่งออกได้เป็น 2 วิธีหลัก คือ การหน่วงแบบพาสซีฟ (passive damping) และการหน่วงแบบแอกทีฟ (active damping) การหน่วงแบบพาสซีฟเป็นวิธีการปรับปรุงอุปกรณ์ภายในระบบไฟฟ้า โดยการเพิ่มค่าตัวเก็บประจุและ/หรือลดค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรอง รวมถึงการเพิ่มอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ตัวต้านทาน หรือตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ หรือตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำเข้าไปในระบบ ข้อดีของวิธีการนี้คือออกแบบง่าย สะดวกต่อการนำไปติดตั้งและใช้งาน อีกทั้งยังไม่ส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมของโหลดอีกด้วย แต่มีข้อเสียคือ ขนาด น้ำหนัก ราคา รวมถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบโดยรวมจะเพิ่มมากขึ้น สำหรับการหน่วงแบบแอกทีฟเป็นวิธีการสร้างความหน่วงเสมือนให้กับระบบด้วยการแก้ไขโครงสร้างของตัวควบคุม ซึ่งทำได้ด้วยการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าและ/หรือแรงดันไฟฟ้ามาวิเคราะห์เพื่อสร้างสัญญาณชดเชยและเพิ่มเข้าไปในตัวควบคุม โดยแนวทางการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 แนวทาง ได้แก่ การหน่วงแบบแอกทีฟทางด้านแหล่งจ่าย การหน่วงแบบแอกทีฟด้วยวงจรช่วย และการหน่วงแบบแอกทีฟทางด้านโหลด โดยการหน่วงแบบแอกทีฟทางด้านแหล่งจ่ายจะเหมาะสำหรับระบบที่มีแหล่งจ่ายที่สามารถควบคุมได้ ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมของโหลด แต่มีข้อจำกัดคือใช้ได้เฉพาะกับระบบที่มีแหล่งจ่ายเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมเท่านั้น ในขณะที่การหน่วงแบบแอกทีฟด้วยวงจรช่วยจะเป็นการเพิ่มวงจรช่วยเข้าไปในระบบระหว่างแหล่งจ่ายและโหลด มีข้อดีคือ สามารถใช้ได้กับทั้งระบบที่มีแหล่งจ่ายควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ อีกทั้งยังไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมของโหลดอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ การเพิ่มอุปกรณ์ของวงจช่วยเข้าไปในระบบจะเป็นการเพิ่มขนาด น้ำหนัก ราคา ความซับซ้อน และกำลังไฟฟ้าสูญเสียให้กับระบบ สำหรับการหน่วงแบบแอกทีฟทางด้านโหลดจะเป็นการแก้ไขหรือดัดแปลงตัวควบคุมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว จึงสามารถกำจัดผลกระทบที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้โดยตรง แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ สมรรถนะการควบคุมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะลดลง ดังนั้นจากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดดังข้างต้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้วิธีการหน่วงแบบแอกทีฟทางด้านโหลด ด้วยการเพิ่มตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าเข้าไปยังตัวควบคุมโหมดการเลื่อนเดิมของระบบที่มีอยู่แล้วสำหรับการสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาดังแสดงด้วยพื้นที่สีเทาของรูปที่ 2.4 ซึ่งมีข้อได้เปรียบคือไม่เพิ่มขนาด น้ำหนัก ราคา กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และความซับซ้อนให้กับระบบ และจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ดำเนินการในลักษณะนี้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้นจึงถือได้ว่าเป็นจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้



รูปที่ 2.4 แผนภาพการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพ

2.7 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง พร้อมทั้งนำเสนอการสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม ซึ่งถือเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับใช้เป็นแนวทางในการทำงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่มีการดัดแปลงร่วมกับตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า เพื่อจะทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพ และสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบ ซึ่งเป็นจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์