

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ดำเนินการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรงแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดียวและบัสเดียว ด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาปูเชิงปรับตัว ซึ่งตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีผู้ทำการศึกษาค้นคว้าและพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวกับวิทยานิพนธ์เป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวในหัวข้อนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาและนำเสนอปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยจะแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อและนำเสนอตามลำดับดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งในแต่ละหัวข้อได้นำเสนองานวิจัยเรียงตามลำดับปีที่ตีพิมพ์ รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของงานวิจัยนั้น ๆ พร้อมทั้งสรุปองค์ความรู้ที่จำเป็นและสำคัญในแต่ละงานไว้พอสังเขปเพื่อใช้เป็นหลักการและแนวทางสำหรับการทำวิจัยด้านเสถียรภาพในปัจจุบันและในอนาคตต่อไป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน

เครื่องบินพาณิชย์ในปัจจุบันมีจุดประสงค์และเป้าหมายหลักเพื่อลดต้นทุนการทำงาน ลดการใช้เชื้อเพลิง ลดค่าบำรุงรักษา ลดขนาดและน้ำหนักของเครื่องบินโดยรวม ตลอดจนลดผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งทำให้สถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินได้รับการพัฒนาและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์เป็นระบบที่มีการใช้จริงในปัจจุบันและมีแนวโน้มที่จะได้รับการพัฒนาต่อยอดสำหรับใช้งานต่อไปในอนาคต ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ผู้วิจัยจึงเริ่มจากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน โดยปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน ตามที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1993	Weimer, J.A.	บทความนี้นำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น ที่มุ่งเน้นในการใช้ประโยชน์จากระบบไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวเพื่อเป็นแหล่งพลังงานหลักบนเครื่องบิน โดยจากเดิมจะพึ่งพาแหล่งพลังงาน 4 ระบบด้วยกันคือ ระบบไฟฟ้า ระบบนิวแมติก ระบบทางกล และระบบไฮดรอลิก ซึ่งแนวคิดนี้สามารถเป็นไปได้ด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
2000	Emadi, A., and Ehsani, M.	บทความนี้นำเสนอแนวคิดและแนวโน้มในการพัฒนาเรื่อง เครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น ที่ต้องการจะเปลี่ยนการใช้พลังงานจากระบบทางกล ระบบไฟฟ้า ระบบนิวแมติก และระบบไฮดรอลิกในเครื่องบินยุคแรกไปเป็น การใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าเพียงระบบเดียวเท่านั้น ซึ่งถือเป็นการปรับปรุงและพัฒนาสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่อาศัยความก้าวหน้าของวงจรรีเลย์ทรอนิกส์กำลัง การขับเคลื่อน การควบคุม และไมโครโพรเซสเซอร์ นอกจากนี้ยังนำเสนอหัวข้องานวิจัยที่ควรได้รับการพัฒนาต่อในอนาคต อาทิเช่น การออกแบบสถาปัตยกรรม การจัดการพลังงานไฟฟ้า และการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ เป็นต้น
2007	Rosero, J.A., Ortaga, J.A., Aldabas, E., and Romeral, L.	บทความนี้นำเสนอปัญหาต่าง ๆ ของการใช้งานระบบนิวแมติก ระบบทางกล และระบบไฮดรอลิก เป็นแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อนระบบต่าง ๆ บนเครื่องบินรุ่นแรกหรือยุคแรก จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะพัฒนาเรื่องเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น และได้นำเสนอสถาปัตยกรรมต้นแบบแรกของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่ใช้ระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่คงที่ 400 Hz และมีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ $115 V_{rms}$

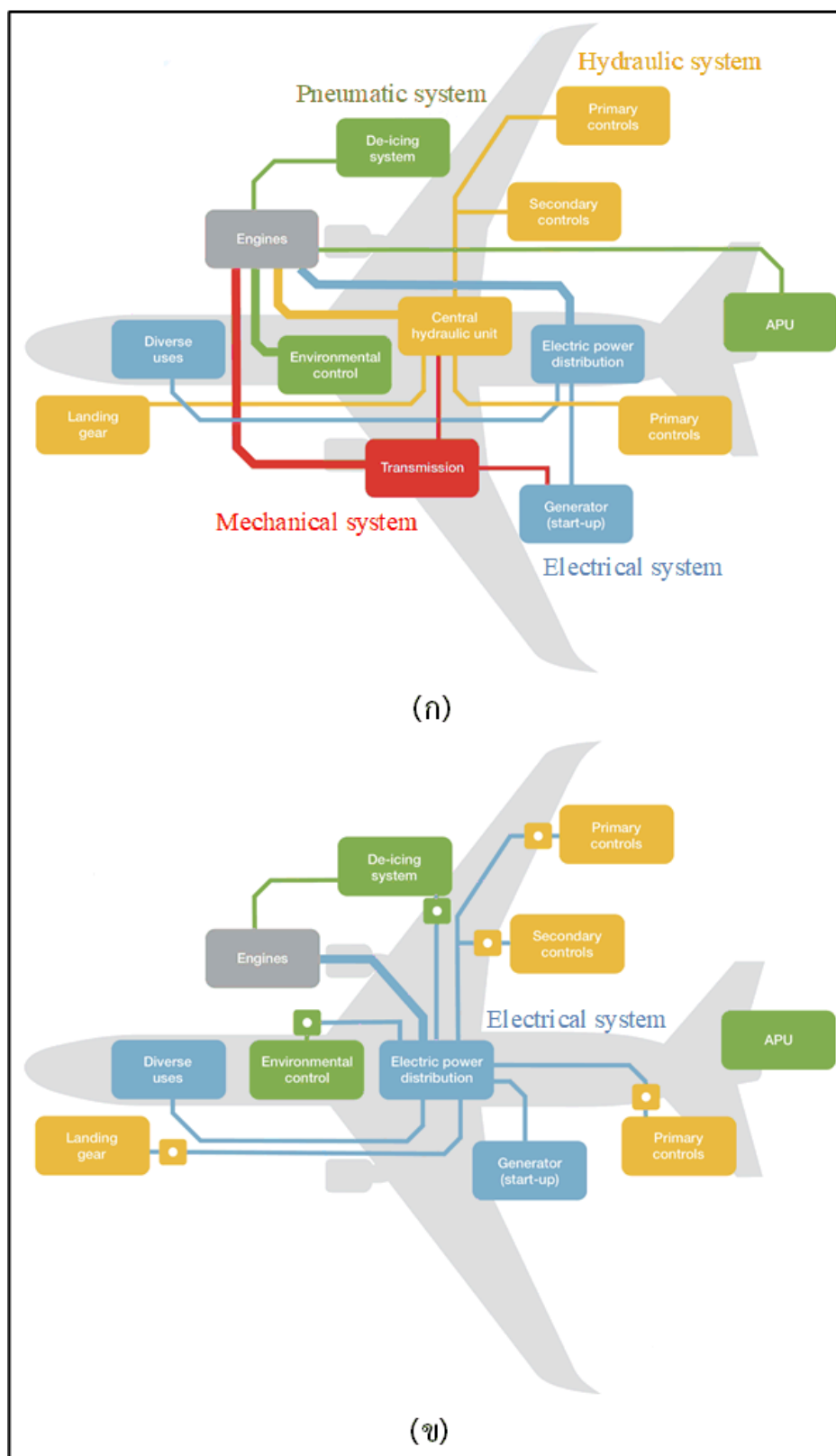
ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน (ต่อ)

2011	Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพและวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบผสมที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้รับการพัฒนาต่อมาจากระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสสลับ
2014	Wheeler, P., and Bozhko, S.V.	บทความนี้เสนอวิวัฒนาการของสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่อาศัยความก้าวหน้าและการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยสถาปัตยกรรมต้นแบบแรกของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ต่อมาได้พัฒนามาเป็นระบบจำหน่ายแบบผสม สำหรับในปัจจุบันและในอนาคตได้มีแนวโน้มที่จะใช้งานระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรง นอกจากนี้ยังได้นำเสนอระดับของการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินอีกด้วย
2015	Gao, F., Zheng, X., Bozhko, S.V., Hill, C., and Asher, G.	บทความนี้เสนอสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 270 V ไว้อย่างละเอียด อีกทั้งยังนำเสนอการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน
2016	Gao, F., Bozhko, S.V., Asher, G., Wheeler, P., and Patel, C.	บทความนี้เสนอวิธีการชดเชยแรงดันตกอันเนื่องมาจากตัวควบคุมแบบรูปของเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 270 V แบบหลายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและบัสเดียว พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการดังกล่าวในการชดเชยแรงดันตกทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่มีความผิดปกติ นอกจากนี้ยังนำเสนอผลพลอยได้ในแง่ของเสถียรภาพที่ได้รับการปรับปรุงจากวิธีการดังกล่าว

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2017	Gao, F., Bozhko, S.V., Costabeber, A., Asher, G.M., and Wheeler, P.	บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมของเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 270 V แบบหลายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและบัสเดียว พร้อมทั้งนำเสนอผลการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบในกรณีที่ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบดรูปมีค่าเปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากจำนวนของแหล่งจ่ายที่ใช้งานและอัตราส่วนการแบ่งกำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง
2019	Ni, K., Liu, Y., Mei, Z., Wu, T., Hu, Y., Wen, H., and Wang, Y.	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลังและอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เป็นส่วนสำคัญในการผลักดันแนวคิดเรื่องเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น โดยมุ่งเน้นที่จะนำเสนอในส่วนของระบบส่งกำลังและระบบไฟฟ้ากำลังเป็นหลัก รวมทั้งอธิบายเกี่ยวกับความเป็นมาและความสำคัญของเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นไว้พอสังเขป

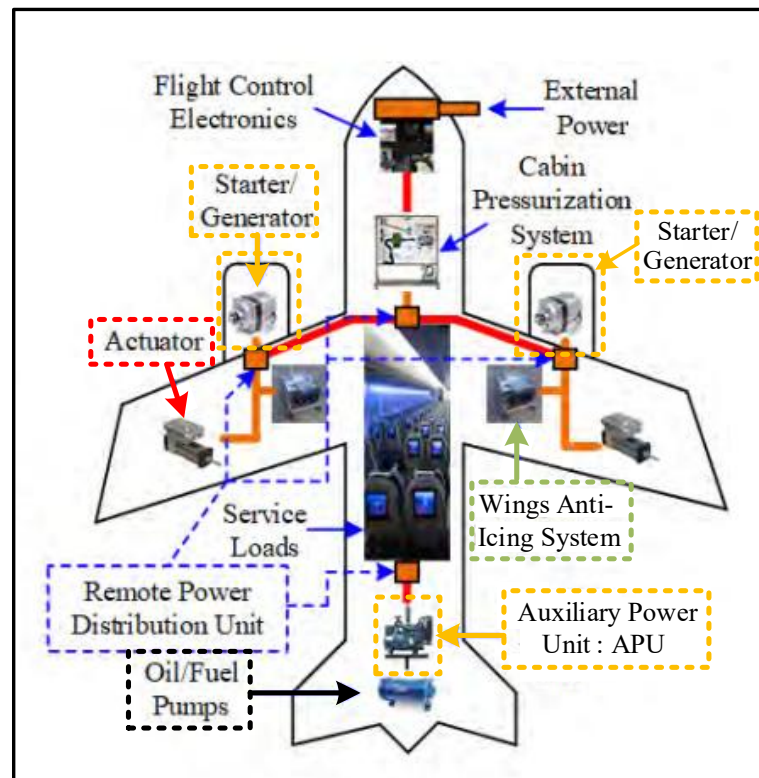
จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินดังในตารางที่ 2.1 พบว่า เครื่องบินรุ่นแรกหรือยุคแรก (Conventional Aircraft) จะมีการใช้แหล่งพลังงานหลักจาก 4 ระบบด้วยกันคือ ระบบไฟฟ้า (electrical system) ระบบนิวแมติก (pneumatic system) ระบบไฮดรอลิก (hydraulic system) และระบบทางกล (mechanical system) ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.1 (ก) อย่างไรก็ตาม เมื่อคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยของผู้โดยสาร ค่าใช้จ่ายตลอดวงจรชีวิต ขนาดและน้ำหนักของเครื่องบิน สมรรถนะการทำงานและความน่าเชื่อถือของระบบโดยรวมบนเครื่องบิน จึงทำให้แนวคิดและแนวโน้มของวิศวกรรมการบินสมัยใหม่ (modern aerospace engineering) เกี่ยวกับเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น (More-Electric Aircraft : MEA) ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการพัฒนาเครื่องบินพาณิชย์เป็นจำนวนมาก อาทิเช่น เครื่องบินแอร์บัส A330 (Airbus A330) และโบอิง 787 (Boeing 787) เป็นต้น โดยแนวความคิดดังกล่าวเป็นแนวคิดที่ต้องการใช้แหล่งพลังงานย่อยจากระบบเพียงระบบเดียวในการขับเคลื่อนระบบต่าง ๆ บนเครื่องบินเท่านั้น ซึ่งระบบเดียวที่ถูกพิจารณาคือระบบไฟฟ้าที่แสดงได้ดังในรูปที่ 2.1 (ข) เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สะอาด มีคุณภาพและความยืดหยุ่นสูง อีกทั้งยังมีการวิจัย (advanced diagnostics) และการพยากรณ์ขั้นสูง (advanced prognostics) ที่สามารถตรวจจับความผิดปกติของอุปกรณ์ภายในระบบได้ง่าย ดังนั้นอุปกรณ์ทางกล



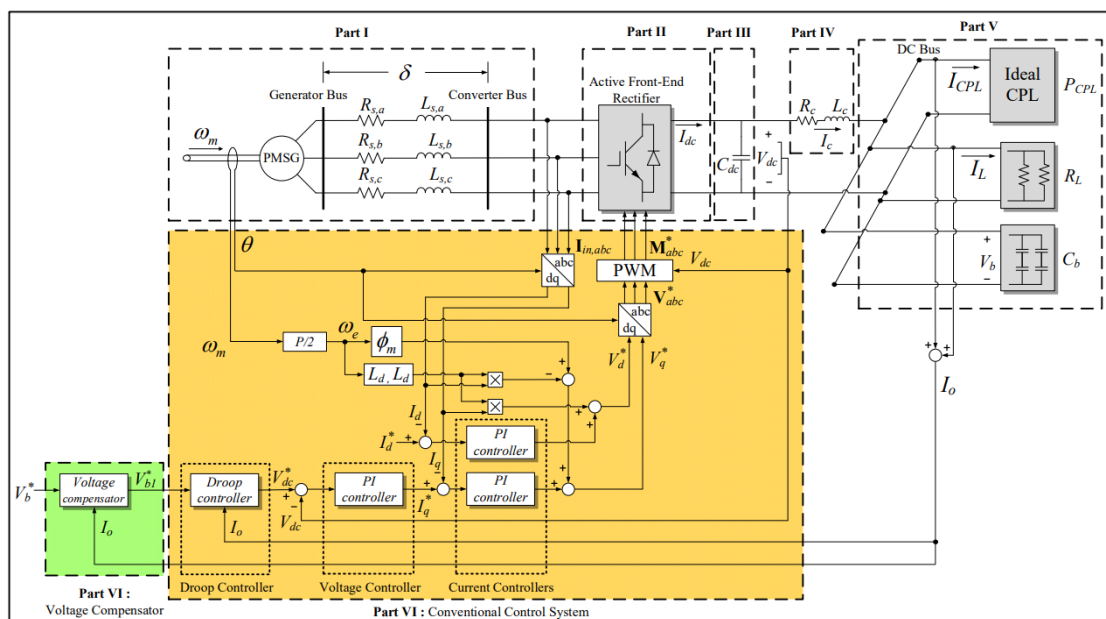
รูปที่ 2.1 สถาปัตยกรรมของเครื่องบิน (ก) เครื่องบินยุคแรก (ข) เครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น
(สืบทัดจาก <http://www.aertrcsolutions.com/infographics>)

นิวแมติก และไฮดรอลิก หลายอย่างจึงได้ถูกแทนที่ด้วยอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ยกตัวอย่างเช่น ปั๊มน้ำมันหรือเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ (fuel/oil pumps) ดังแสดงในกรอบเส้นประสีดำของรูปที่ 2.2 ที่พลังงานจากระบบทางกลจะถูกแทนที่ด้วยปั๊มเชื้อเพลิงไฟฟ้า (electrical fuel pump) ของระบบไฟฟ้า ระบบป้องกันการเกราะของน้ำแข็งบนปีกเครื่องบิน (Wings Anti-Icing System : WAI) ดังแสดงในกรอบเส้นประสีเขียวของรูปที่ 2.2 ที่ปกติใช้ระบบนิวแมติก จะถูกแทนที่ด้วยอุปกรณ์ทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (electrical heaters) และตัวขับเคลื่อนหรือตัวกระตุ้น (Actuator) ที่แสดงในกรอบเส้นประสีแดงของรูปที่ 2.2 จากเดิมที่ใช้ตัวขับเคลื่อนแบบไฮดรอลิก (Electro-Hydraulic Actuators : EHAs) จะถูกแทนที่ด้วยการใช้ตัวขับเคลื่อนเชิงกลไฟฟ้า (Electro-Mechanical Actuators : EMAs) เป็นต้น โดยสถาปัตยกรรมต้นแบบแรกของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC distribution system) ทั้งแบบความถี่คงที่ 400 Hz ขนาดแรงดัน 115 Vac และแบบปรับเปลี่ยนค่าความถี่ได้ตั้งแต่ 320-800 Hz ขนาดแรงดัน 115/230 Vac โดยบริษัทผู้ผลิตเครื่องบินต่ออากาศยานและยูทิลิตี้เครื่องบิน ดังเช่นแอร์บัสกรุ๊ป (Airbus Group) และบริษัทโบอิง (The Boeing Company) ได้นำสถาปัตยกรรมดังกล่าวมาใช้เป็นต้นแบบของเครื่องบินพาณิชย์ในเครื่องบินจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น สถาปัตยกรรมของเครื่องบินแอร์บัส A330 (Airbus A330) และโบอิง 767 (Boeing 767) เป็นต้น และต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นระบบจำหน่ายแบบผสม (hybrid distribution system) ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกัน เช่น เครื่องบินแอร์บัส A380 (Airbus A380) และโบอิง 787 (Boeing 787) เป็นต้น แต่สำหรับสถาปัตยกรรมของเครื่องบินที่ถูกนำมาใช้งานจริงในปัจจุบันและยังคงมีแนวโน้มการใช้งานอย่างต่อเนื่องจนถึงในอนาคต ทั้งในเชิงพาณิชย์และด้านการทหารเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC distribution system) เนื่องจากให้สมรรถนะการทำงานและความน่าเชื่อถือของระบบที่สูงกว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสสลับและแบบผสม นอกจากนี้ยังไม่จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจึงทำให้มีน้ำหนักเบาและสามารถลดกำลังงานสูญเสียในระบบได้เป็นอย่างดี

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้แนวโน้มของการวิจัยเกี่ยวกับเครื่องบินในปัจจุบันมุ่งเน้นไปที่การศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC distribution more electric aircraft) ซึ่งโครงสร้างแบบดั้งเดิมจะเป็นแบบหลายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและบัสเดียว (multiple-generator-single-bus) ดังแสดงในกรอบเส้นประสีส้มของรูปที่ 2.2 ที่ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลัก 2 ชุด (Starter/Generator) ทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดทั้งหมดบนเครื่องบิน และชุดของแหล่งพลังงานสำรอง (Auxiliary Power Unit : APU) อีก 1 ชุด ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานสำรองให้กับเครื่องบินในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลักทั้ง 2 ชุดเกิดความผิดปกติจนกระทั่งไม่สามารถทำงานต่อไปได้ แต่เนื่องด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าง่ายกว่ามีขนาด



รูปที่ 2.2 ผังของเครื่องบินยุคแรกและเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น
(Ni, K., Liu, Y., Mei, Z., Wu, T., Hu, Y., Wen, H., and Wang, Y., 2019)



รูปที่ 2.3 ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดี่ยว

พิกัด และโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกันทุกประการ (symmetrical infrastructure) ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงสนใจและมุ่งเน้นที่จะศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดี่ยว (single-generator-single-bus) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม (Conventional Control System) ที่แสดงได้ดังในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมของรูปที่ 2.3 จะมีตัวควบคุมแบบดรู๊ป (Droop Controller) ซึ่งทำหน้าที่ในการแบ่งกำลังไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องให้มีความเหมาะสมและเพียงพอต่อความต้องการของโหลดต่าง ๆ บนเครื่องบินโดยอาศัยการกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของเอาต์พุต (output characteristic) ของแต่ละแหล่งจ่ายในรูปของแรงดันตก เป็นส่วนประกอบของระบบซึ่งพฤติกรรมการทำงานของตัวควบคุมดังกล่าวอาจส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าตกทางฝั่งเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสภาคหน้าแบบแอคทีฟ (V_{dc}) และฝั่งบัสไฟฟ้ากระแสตรง (V_b) ด้วยสาเหตุดังกล่าวงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหาด้วยการประยุกต์ใช้ตัวชดเชยแรงดันไฟฟ้า (Voltage Compensator) ที่แสดงได้ดังในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมของรูปที่ 2.3 เพื่อลดหรือป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้าของระบบตก

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นจึงได้ข้อสรุปว่า ระบบไฟฟ้าที่สนใจศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์คือ ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดี่ยว ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.3 (Gao, F., Zheng, X., Bozhko, S.V., and Hil, C.I., 2015) ซึ่งประกอบด้วย 6 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Generator with its parasitic parameters $R_{s,abc}$ and $L_{s,abc}$: PMSG) จะทำหน้าที่ในการผลิตไฟฟ้ากระแสสลับด้วยการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (gas turbine engines) ส่วนที่ 2 วงจรเรียงกระแสภาคหน้าแบบแอคทีฟ (Active Front-End rectifier : AFE) จะทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดต่าง ๆ บนเครื่องบิน ส่วนที่ 3 ตัวเก็บประจุทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง (DC-link capacitor : C_{dc}) ทำหน้าที่ลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสภาคหน้าแบบแอคทีฟให้มีรูปสัญญาณที่ราบเรียบมากยิ่งขึ้น ส่วนที่ 4 สายส่งกำลังไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง (DC transmission line : R_c and L_c) ส่วนที่ 5 โหลดต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน ซึ่งประกอบด้วย ตัวเก็บประจุ (capacitor bank : C_b) โหลดความต้านทาน (R_L) หรือโหลดอิมพีแดนซ์คงตัว (Constant Impedance Load : CIL) ซึ่งใช้แทนระบบป้องกันการเกราะของน้ำแข็งบนปีกเครื่องบิน และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (P_{CPL}) ซึ่งเป็นพฤติกรรมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม ยกตัวอย่างเช่น วงจรแปลงผันกำลังเอซีเป็นดีซี วงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นดีซี และวงจรแปลงผันกำลังดีซีเป็นเอซี ที่มีการจ่ายโหลดมอเตอร์ไฟฟ้าหรือ

โหลดตัวต้านทาน เป็นต้น และส่วนที่ 6 ระบบควบคุมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน (Conventional Control System with Voltage Compensator) ที่ประกอบไปด้วย ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า (Current Controllers) ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage controller) ตัวควบคุมแบบรูปและตัวชดเชยแรงดันไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสภาคหน้าแบบแอกทีฟและแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าคงที่และสอดคล้องกับมาตรฐาน MIL-STD-704F

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ

ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์กำลังจึงทำให้จำนวนของวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามักเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยโหลดดังกล่าวจะมีคุณลักษณะเป็นค่าความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ติดลบที่สามารถลดทอนการหน่วงของระบบได้โดยตรง จนกระทั่งระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ซึ่งการขาดเสถียรภาพนั้นไม่เพียงแต่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมเท่านั้น แต่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบโดยรวมที่มีผลต่อความปลอดภัยของนักบินและผู้โดยสารภายในเครื่องบินได้ ด้วยสาเหตุดังกล่าวงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ศึกษาค้นคว้างานวิจัยเกี่ยวกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งสามารถแสดงเป็นปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ

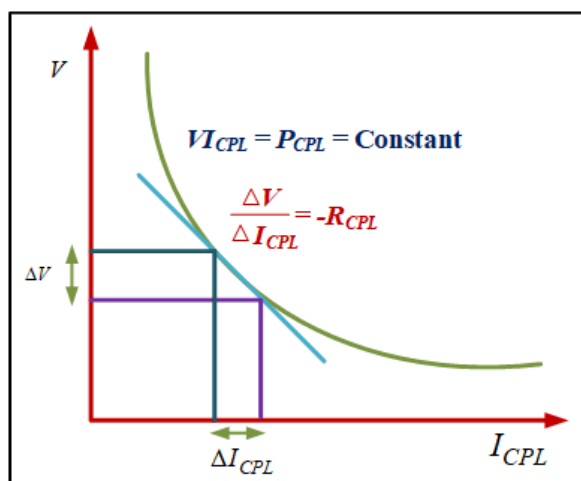
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1976	Middlebrook, R.D.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบต่อบระบบไฟฟ้ากำลังอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งโหลดดังกล่าวนี้จะมีลักษณะเป็นค่าอิมพีแดนซ์ติดลบหรือค่าความต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ที่นอกจากจะลดทอนเสถียรภาพของระบบแล้ว ยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการศึกษาเสถียรภาพจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อหลีกเลี่ยงจุดปฏิบัติงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ (ต่อ)

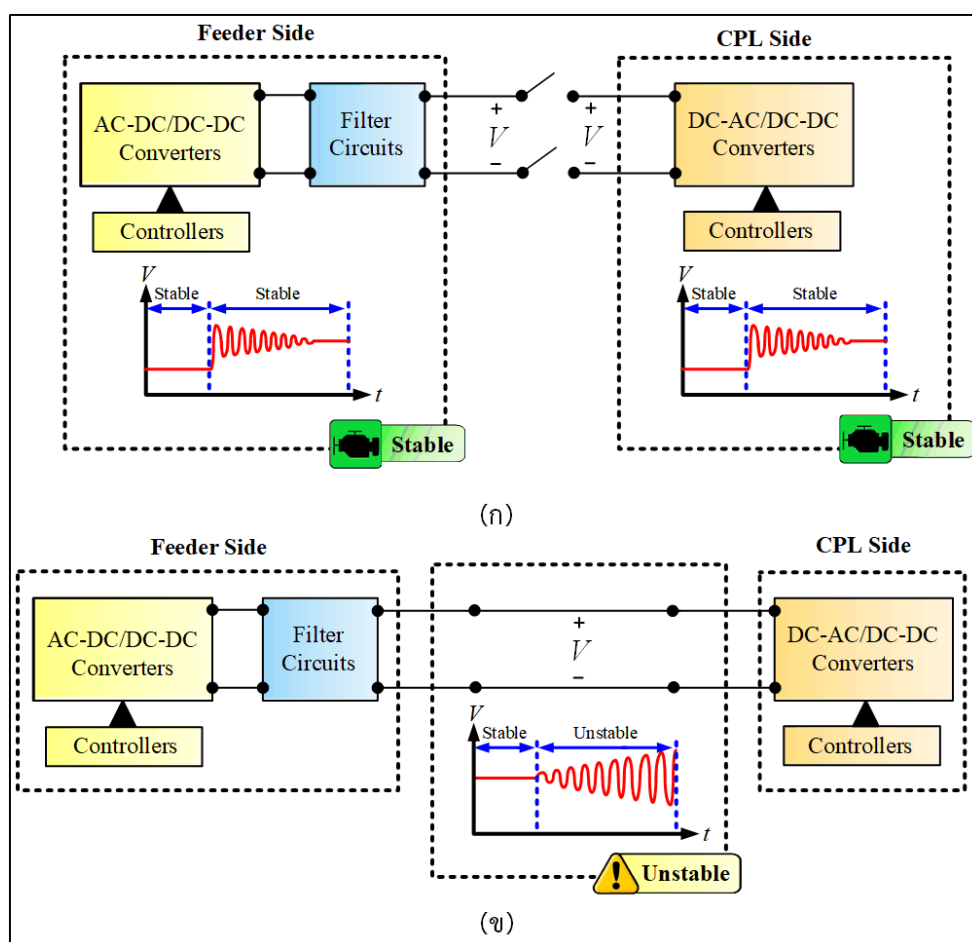
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2004	Jusoh, A.B.	บทความนี้นำเสนอผลกระทบของการขาดเสถียรภาพที่เกิดจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว รวมทั้งแนวทางการออกแบบวงจรกรองเพื่อบรรเทาการขาดเสถียรภาพ พร้อมทั้งยืนยันผลด้วยการจำลองสถานการณ์
2005	Rivetta, C.H., Williamson, G.A., and Emadi, A.	บทความนี้เสนอการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในเรือดำนํ้าอันเนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์เชิงลบของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังและวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีการควบคุม
2006	Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A.	บทความนี้เสนอการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในระบบยานยนต์อันเนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์เชิงลบของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังและวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีการควบคุม
2012	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., De Lillo, L., and Thomas, D.W.P.	บทความนี้เสนอการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบผสม อันเนื่องมาจากวงจรแปลงผันกำลังเอซีเป็นดีซีและดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุมการทำงาน ซึ่งจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมทั้งนำเสนอการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ
2016	Gao, F., and Bozhko, S.V.	บทความนี้เสนอการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรง แบบหลายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอิสระ อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอิมพีแดนซ์ลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ อีกทั้งนำเสนอการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในตารางที่ 2.2 พบว่า

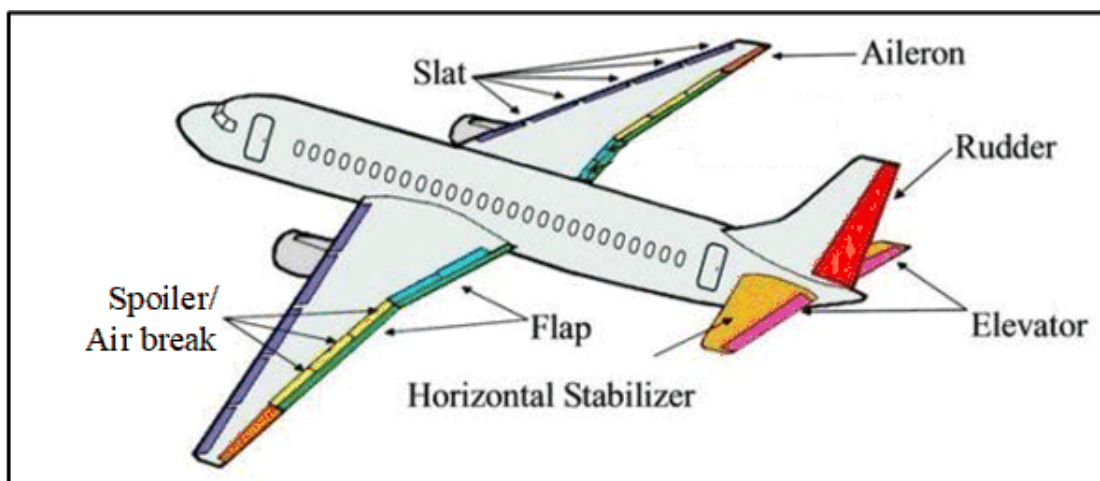
วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังโดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงานไม่ว่าจะเป็นวงจรแปลงผันกำลังเอซีเป็นดีซี ดีซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี และเอซีเป็นเอซี ในสภาวะอยู่ตัว (steady-state condition) จะมีค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานหรือจุดสมดุลของระบบ (operating points or equilibrium points) ดังนั้นโหลดดังกล่าวจึงมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยโหลดในลักษณะนี้จะมีคุณลักษณะสมบัติของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แปรผกผันกันดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า หากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด (V) มีค่าเพิ่มมากขึ้น กระแสไฟฟ้าของโหลด (I_{CPL}) จะมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้าม หากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดมีค่าลดลง กระแสไฟฟ้าของโหลดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโหลดดังกล่าวมีค่าติดลบหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีลักษณะเป็นค่าความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ติดลบ (negative resistance/negative impedance) ต่อระบบโดยรวม อย่างไรก็ตามการใช้งานโหลดที่เป็นโหลดวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมเพียงอย่างเดียวโดยไม่พิจารณาการทำงานร่วมกันกับระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังและวงจรกรอง (Filter Circuits) หรือกล่าวได้ว่า วงจรทางฝั่งแหล่งจ่าย (feeder side) ทำงานแยกกันกับวงจรทางฝั่งโหลด (CPL side) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) จะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าแต่อย่างใด แต่เมื่อคำนึงถึงการใช้งานจริงในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นในอากาศยาน เรือดำน้ำ รถไฟฟ้า ยานยนต์ หรือระบบควบคุมในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรม โหลดวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมการทำงานจะต่อกับระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังผ่านวงจรกรอง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข) ดังนั้นค่าความต้านทานติดลบของโหลดชนิดนี้จะไปลดทอนค่าความต้านทานที่เป็นบวกของวงจรกรอง (damping) การลดลงของค่าความต้านทานของวงจรกรองจะทำให้เกิดการกระเพื่อมของสัญญาณที่สูงขึ้น หากสัญญาณที่กระเพื่อมนั้นเกิดการลู่ออกจากจุดการปฏิบัติงานเดิมจะเรียกสภาวะนี้ว่า ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดการขาดเสถียรภาพ ซึ่งการขาดเสถียรภาพนั้นไม่เพียงแต่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมเท่านั้น แต่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบโดยรวมที่ทำให้เที่ยวบินเกิดความล่าช้าหรือทำให้เกิดอุบัติเหตุทางการบินได้ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ไม่ควรเกิดขึ้นตลอดระยะทางและระยะเวลาทำการบิน และนอกจากโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะส่งผลเสียต่อระบบดังที่ได้กล่าวไปในข้างต้นแล้ว ยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นเกิดขึ้น กล่าวคือทำให้ระบบเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่เชื่อมต่อโหลดวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่เป็นระบบไฟฟ้าแบบอิสระ (stand-alone system) และมีโหลดหรือส่วนประกอบของเครื่องบินโดยส่วนใหญ่เป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน



รูปที่ 2.4 คุณลักษณะสมบัติของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว



รูปที่ 2.5 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง (ก) ก่อนการเชื่อมต่อกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
(ข) หลังการเชื่อมต่อกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของเครื่องบินที่เป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
(สืบค้นจาก <https://tuemaster.com>)

ยกตัวอย่างเช่น ปีกเล็กแก้อียง (Aileron) ที่ใช้บังคับให้เครื่องบินเอียงซ้าย-ขวา เบรกอากาศ (Spoiler/Air brake) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ช่วยตัดแรงยกหรือลดความเร็วในการบิน ทางเสือ (Rudder) สำหรับใช้บังคับทิศทางให้เครื่องบินหันหัวซ้าย – ขวา ปีกเพิ่มลดแรงยก (Flap) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เพิ่มแรงยกให้ปีก และส่วนควบคุมแนวระดับ (Elevator) ที่ทำหน้าที่ใช้บังคับหัวเครื่องบินให้ก้ม-เงย (ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.6) เป็นต้น ดังนั้นในหัวข้อที่ 2.4 และหัวข้อที่ 2.5 จึงได้นำเสนอการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และงานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ตามลำดับ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแนวทางการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการดำเนินงานวิจัยในส่วนนี้จะมุ่งเน้นศึกษางานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับแนวทางการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาไปเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา เนื่องจากแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาหากนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบโดยตรงจะก่อให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก สำหรับงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
1997	Mahdavi, J., Emadi, A., Bellar, M.D., and Ehsano, M.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันแบบบัค-วงจรแปลงผันแบบบูสต์ และวงจรแปลงผันแบบบัค-บูสต์ ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป
2004	Uan-Zo-li, A., Burgos, R.P., Lacaux, F., Wang, F., and Boroyevich, D.	บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรเรียงกระแสแบบหกและสิบสองพัลส์
2004	Emadi, A.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปและการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซีที่มีการขนานกัน
2004	Emadi, A.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปและการวิเคราะห์เสถียรภาพสำหรับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบควบคุมได้และแบบควบคุมไม่ได้ที่จ่ายโหลดตัวต้านทานขนานกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว
2009	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., de Lillo, L., Asher, G.M., Thomas, D.W.P., Watson, A., and Wu, T.	บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามกขึ้นที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบผสมด้วยการแปลงดีคิวและทฤษฎีบทค่าเจาะจง ตามลำดับ พร้อมทั้งดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ต่อ)

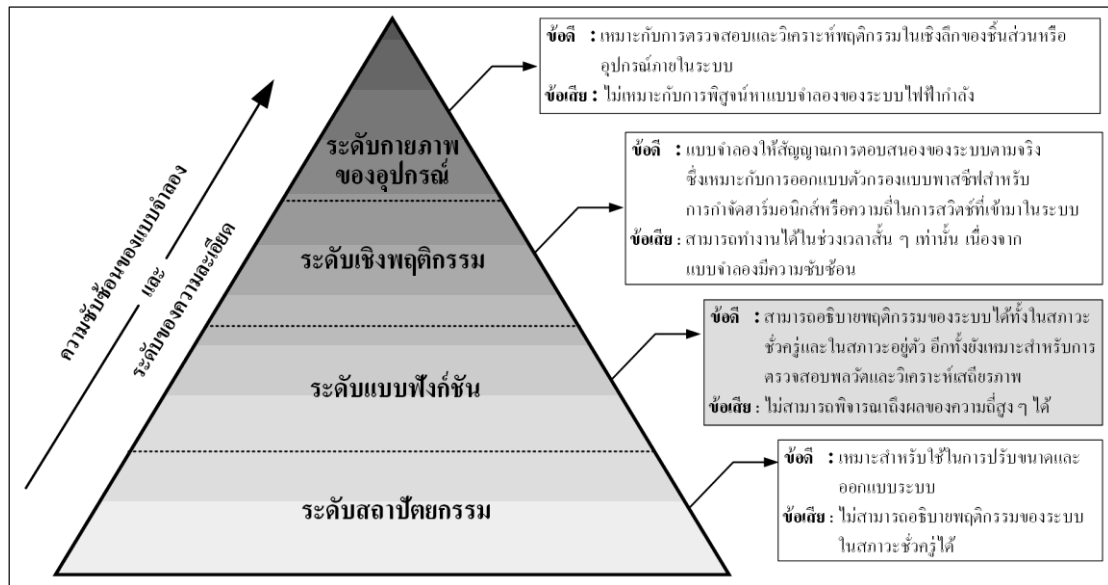
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Chaijarumnudomrung, K., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่ประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมเฟสได้ (Three-phase controlled rectifier) วงจรกรองสัญญาณดีซี และมีโหลดเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ด้วยวิธีดีคิว พร้อมทั้งดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและผลการวิเคราะห์จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB
2011	Sopapirm, T., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่ประกอบไปด้วย วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ (Three-phase diode rectifier) วงจรกรองสัญญาณดีซี และโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักชานกัน โดยอาศัยการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิวและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมทั้งดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB
2014	Wheeler, P., and Bozhko, S.V.	บทความนี้นำเสนอระดับของการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ระดับคือ ระดับกายภาพของอุปกรณ์ ระดับเชิงพฤติกรรม ระดับแบบฟังก์ชัน และระดับสถาปัตยกรรม พร้อมทั้งนำเสนอสถาปัตยกรรมของเครื่องบินที่มีการใช้งานในปัจจุบันและมีแนวโน้มที่จะได้รับการพัฒนาต่อในอนาคต นั่นคือ ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ต่อ)

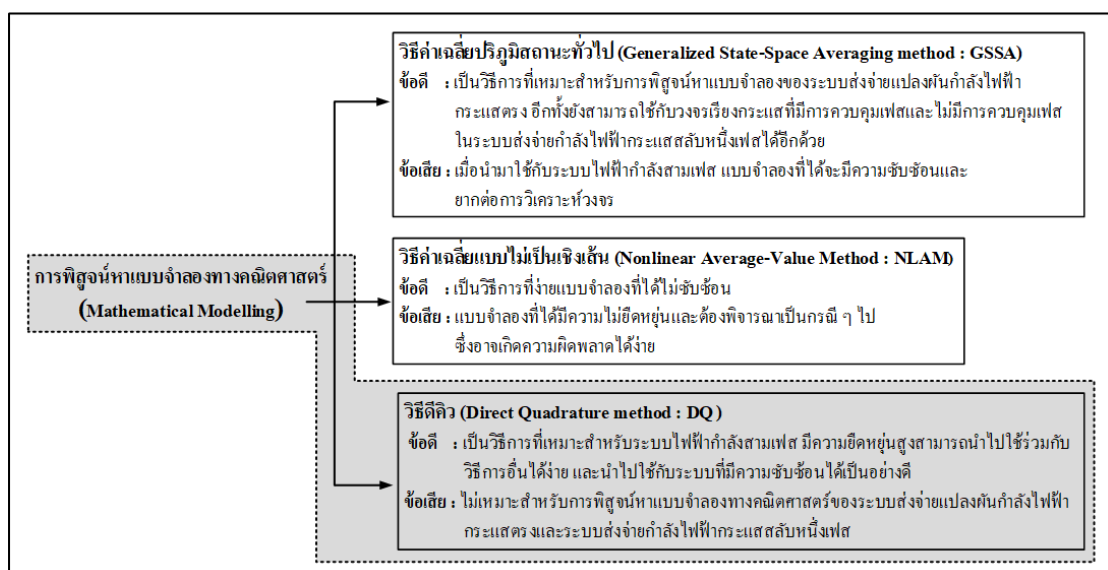
ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2015	Gao, F., Zheng, X., Bozhko, S., Hill, C.I., and Asher, G.M.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรงแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวบัสเดียวด้วยวิธีดีคิวกีที่ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร วงจรเรียงกระแสภาคหน้าแบบแอททิฟ โหลดความต้านทาน และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมทั้งได้นำเสนอการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่ศึกษาในกรณีที่มีและไม่มี การพิจารณาสายส่งกำลังไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง
2017	Pakdeeto, J., Areerak, K-N., and Areerak, K-L.	บทความนี้นำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สัญญาณขนาดใหญ่ของระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กที่ประกอบด้วย วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบ สองทิศทาง (Bidirectional converter) วงจรแปลงผันแบบบูสต์ และโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว โดยอาศัยวิธีดีคิวกีร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังดังตารางที่ 2.3 ซึ่งสามารถสรุปเป็นแผนภาพระดับของการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นและแผนภาพสรุปวิธีในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

จากแผนภาพในรูปที่ 2.7 จะพบว่า การพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นแบ่งออกเป็น 4 ระดับคือ ระดับที่ 1 ระดับสถาปัตยกรรม (architectural layer) เป็นระดับที่แบบจำลองมีความละเอียดและซับซ้อนน้อยที่สุด ซึ่งจะถูกใช้ในการศึกษาและวิจัยสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมในสถานะอยู่ตัวเท่านั้น ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้ในการปรับขนาดและออกแบบระดับระบบเป็นหลัก ในขณะที่ระดับที่ 2 ระดับแบบฟังก์ชัน (functional layer) เป็นการพิสูจน์หาแบบจำลองที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองแบบเฉลี่ยที่ไม่มีการสวิตช์



รูปที่ 2.7 ระดับของการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น



รูปที่ 2.8 แผนภาพสรุปวิธีในการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

(non-switching averaged model) แบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบไฟฟ้ากำลัง ในขณะที่ทำการบินได้อย่างถูกต้องแม่นยำทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองในระดับนี้จึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพและตรวจสอบพลวัตของระบบ ระดับที่ 3 ระดับเชิงพฤติกรรม (behavioral layer) เป็นระดับที่สามารถศึกษาและวิจัยถึงผลของค่าที่สูง

มาก ๆ (200-300 kHz) ซึ่งครอบคลุมความถี่สวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังโดยส่วนใหญ่ ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงให้สัญญาณการตอบสนองของระบบตามจริง ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในการออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟ (passive filter) สำหรับการกำจัดฮาร์โมนิกส์หรือความถี่ในการสวิตช์ที่เข้ามาในระบบ แต่มีข้อเสียคือ มีขีดความสามารถในการจำลองสถานการณ์ได้ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ เท่านั้น เนื่องจากความซับซ้อนของแบบจำลอง และระดับที่ 4 ระดับกายภาพของอุปกรณ์ (device physical layer) เป็นระดับที่แบบจำลองมีความละเอียดและความซับซ้อนมากที่สุด ซึ่งถูกใช้เพื่อตรวจสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมในเชิงลึกของชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ภายในระบบ ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับการสร้างแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวม

จากแผนภาพในรูปที่ 2.8 จะพบว่า วิธีการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปลี่ยนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-varying model) ไปเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-invariant model) มีอยู่ 3 วิธีที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย วิธีที่ 1 เรียกว่า วิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป (Generalized State-Space Averaging method : GSSA) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดผลของอุปกรณ์สวิตช์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เช่น วงจรแปลงผันแบบบัก วงจรแปลงผันแบบบูสต์ และวงจรแปลงผันแบบบัก-บูสต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้กับวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบควบคุมได้และแบบควบคุมไม่ได้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสได้อีกด้วย แต่เมื่อนำวิธีการนี้มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสจะทำให้แบบจำลองของระบบเป็นแบบจำลองอันดับสูง (high-order model) ซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ห้วงจร วิธีที่ 2 คือ วิธีค่าเฉลี่ยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Average-Value Method : NLAM) เป็นวิธีที่เรียบง่ายและแบบจำลองที่ได้ไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือ แบบจำลองที่ได้มีความยืดหยุ่นน้อยและต้องพิจารณาเป็นกรณี ๆ ไป สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองของแต่ละระบบซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่าย โดยวิธีการนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสแบบหกและสิบสองพัลส์ วิธีที่ 3 คือ วิธีดีคิว (Direct Quadrature method : DQ) เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการสร้างแบบจำลองของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสามเฟส ยกตัวอย่างเช่น วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ของระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบสองทิศทางสำหรับระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก เป็นต้น เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการอื่น ๆ ได้ง่าย ดังเช่นการประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปในการสร้างแบบจำลองของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมได้และไม่สามารถควบคุมได้ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัก เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้พิจารณาการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาในระดับแบบฟังก์ชันโดยอาศัยวิธีดีคิวเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์ห้วงจรด้วยทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน อีกทั้งยังเหมาะสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอีกด้วย

สำหรับรายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อที่ 2.5 ต่อไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

การเพิ่มขึ้นของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบไฟฟ้ากำลังไม่เพียงแต่จะทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้นแล้ว แต่ยังสามารถลดทอนเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมได้อีกด้วย ดังนั้นการตรวจสอบและการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพื่อทำนายจุดปฏิบัติงานของโหลดดังกล่าวที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ และหลีกเลี่ยงผลเสียต่อระบบที่จะเกิดขึ้นตามมา ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงเป็นปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Weijing, D., Junming, Z., Yang, Z., and Zhoamong, Q.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังของรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธีการกราฟฟิคที่เรียกว่า การวิเคราะห์ระนาบเฟส และทฤษฎีของเลียปูนอฟที่สามารถประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟกำลังสอง
2012	Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., De Lillo, L., and Thomas, D.W.P.	บทความนี้เสนอการคาดเดาจุดขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบผสม อันเนื่องมาจากวงจรแปลงผันกำลังเอซีเป็นดีซีและดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุมการทำงานซึ่งจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว พร้อมทั้งนำเสนอการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ

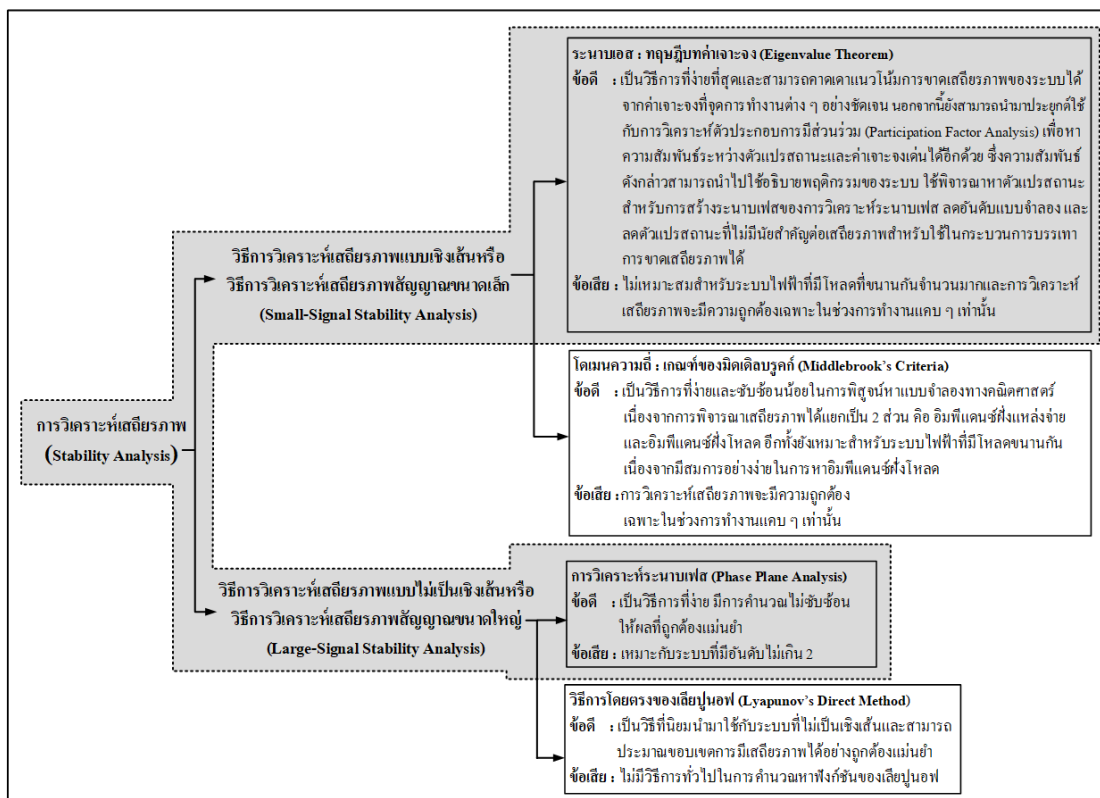
ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2012	Griffo, A., and Wang, J.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีในระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินที่มีระบบจำหน่ายแบบผสม โดยพิจารณาให้พฤติกรรมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้งหมดของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินรวมเป็นหนึ่งโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติ ซึ่งจะมุ่งเน้นในการประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับจากฟังก์ชันเลียปูนอฟที่คำนวณได้โดยอาศัยวิธีการที่นำเสนอโดยเบร์ยทันและมอเซอร์
2014	Riccobono, A., and Santi, E.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระแสตรงด้วยเกณฑ์ของมิตเดิลบรูกและเกณฑ์ของไนควิสต์ พร้อมทั้งได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ได้จากเกณฑ์ทั้งสอง
2016	Gao, F., and Bozhko, S.V.	บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 270 V ด้วยเกณฑ์ของมิตเดิลบรูก และได้นำเสนอผลการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบ
2018	Pakdeeto, J., Areerak, K., and Areerak, K.	บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กของระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	Suyapan, A., Areerak, K., Bozhko, S., Yeoh, S.S., and Areerak, K.	บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กและสัญญาณขนาดใหญ่โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการวิเคราะห์ระนาบเฟสสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 270 V และมีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีลูยกเล็ก พร้อมทั้งยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และชุดทดสอบจริงจากห้องปฏิบัติการ
2022	Phosung, R., Areerak, K., Sopapirm, T., and Areerak, K.	บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยลูบก้อนไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว ยิ่งไปกว่านั้นยังได้วิเคราะห์ถึงตัวแปรสถานะที่ส่งผลต่อค่าเจาะจงเด่นของระบบที่ได้จากทฤษฎีบทค่าเจาะจงด้วยการวิเคราะห์ตัวประกอบการมีส่วนร่วม สำหรับการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบดังกล่าวจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และชุดทดสอบจริงจากห้องปฏิบัติการ

จากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดังตารางที่ 2.4 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังได้ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งจากรูปจะพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นิยมใช้ในปัจจุบันสามารถจำแนกออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นหรือวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal stability analysis) และวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่ (large-signal stability analysis) โดยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นจะอาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น (linearization) เพื่อเปลี่ยนแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบที่ศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วย 2 แนวทางที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือ



รูปที่ 2.9 แผนภาพสรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

แนวทางที่ 1 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเฉพาะบนระนาบออส (eigenvalue theory) ซึ่งเป็นแนวทางการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ง่ายที่สุดและยังสามารถคาดเดาแนวโน้มการขาดเสถียรภาพของระบบผ่านการพิจารณาวิถีการเคลื่อนที่ของค่าเฉพาะได้อีกด้วย แต่มีข้อจำกัดคือ เมื่อระบบไฟฟ้าที่ศึกษามีการเพิ่มจำนวนโหลดในลักษณะของการต่อขนานกันมากขึ้น จะทำให้การวิเคราะห์เสถียรภาพมีความยุ่งยาก เนื่องจากต้องดำเนินการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่ทั้งระบบ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาเสถียรภาพของระบบดังกล่าวด้วยแนวทางที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของมิดเดิลบรูคบนโดเมนความถี่ (Middlebrook's criteria) ซึ่งเป็นแนวทางที่อาศัยการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ทางฝั่งแหล่งจ่ายหรือเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (output impedance) และอิมพีแดนซ์ทางฝั่งโหลดหรืออินพุตอิมพีแดนซ์ (input impedance) ของระบบ โดยหากโหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลงจะอาศัยเพียงการคำนวณหาอินพุตอิมพีแดนซ์ด้วยสมการอย่างง่ายเท่านั้น ในขณะที่เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของระบบยังคงเหมือนเดิม อย่างไรก็ตามทั้ง 2 แนวทางมีข้อเสียเช่นเดียวกันคือ ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพจะมีความคลาดเคลื่อนภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดปฏิบัติงานที่กว้าง ยกตัวอย่างเช่น สภาวะผิดปกติของระบบไฟฟ้ากำลังและสภาวะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด เป็นต้น ในส่วนของวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็น

เชิงเส้นจะเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นของระบบโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการทำให้เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 แนวทางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย นั่นคือ แนวทางที่ 1 การวิเคราะห์ระนาบเฟส (phase plane analysis) เป็นวิธีการทางกราฟฟิกที่จะสร้างการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ (trajectory) ลงบนระนาบเฟส (phase plane) โดยอาศัยการหาผลเฉลยสมการอนุพันธ์ของระบบจากเงื่อนไขเริ่มต้นที่พิจารณา จากนั้นจะดำเนินการพิจารณาเสถียรภาพของระบบจากการโคจรของคำตอบสมการอนุพันธ์ ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายและได้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง นอกจากนี้ยังสามารถแสดงถึงการตอบสนองทางพลวัตของระบบได้อีกด้วย แต่ข้อเสียของการวิเคราะห์ระนาบเฟสคือ เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่มีอันดับไม่เกิน 2 เท่านั้น แนวทางที่ 2 การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยตรงของเลียปูนอฟ (Lyapunov's direct method) เป็นแนวทางที่นิยมใช้ในการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเป็นอย่างมาก เนื่องจากให้ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง อีกทั้งยังสามารถประมาณขอบเขตของการมีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (Region of Asymptotic Stability : RAS) ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม แนวทางนี้จำเป็นต้องคำนวณหาฟังก์ชันพลังงานของเลียปูนอฟเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์เสถียรภาพตามทฤษฎีการมีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ซึ่งข้อเสียของแนวทางนี้คือ ไม่มีวิธีการทั่วไปในการหาฟังก์ชันพลังงานของเลียปูนอฟ ดังนั้นอาจจะต้องลองผิดลองถูก (trial and error) โดยพิจารณาเป็นกรณี ๆ ไป เพื่อให้ได้วิธีการที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณหาฟังก์ชันพลังงานของเลียปูนอฟสำหรับระบบนั้น ๆ จากที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่าแต่ละวิธีมีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยการวิเคราะห์ระนาบเฟสเพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษา โดยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเป็นแนวทางที่ง่ายที่สุดและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายแนวโน้มการขาดเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับการวิเคราะห์ตัวประกอบการมีส่วนร่วม (Participation Factor analysis : PF) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบโมเดล (modal analysis techniques) เพื่อวิเคราะห์หาตัวแปรสถานะ (state-variable) ที่มีอิทธิพลต่อค่าเจาะจงเด่นของระบบ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือค่าเจาะจงที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง ซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อมูลทางเสถียรภาพที่มีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเป็นอย่างมาก ในส่วนของการวิเคราะห์ระนาบเฟสไม่เพียงแต่สามารถวิเคราะห์หาจุดขาดเสถียรภาพได้เท่านั้น แต่ยังสามารถพิจารณาขนาดของแอมพลิจูดที่มีการสั่นไกวของผลตอบสนองได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปใช้ตรวจสอบผลตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองสถานการณ์ภายใต้กรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น โดยกระบวนการในการตรวจสอบดังกล่าวนี้จะสามารถดำเนินการได้ผ่านการวิเคราะห์ระนาบเฟสเท่านั้น ในขณะที่การวิเคราะห์

เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงไม่สามารถทำได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ระบบเฟสจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ยังเป็นการแสดงให้เห็นว่า ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทั้ง 2 แนวทางดังกล่าวมีความสอดคล้องกันอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เสถียรภาพดังกล่าวทำได้เพียงคาดเดาจุดที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพเท่านั้น แต่ไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อในระดับพิกัดกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเพื่อกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะได้รับการนำเสนอในหัวข้อ 2.6 ต่อไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและงานวิจัยที่ได้รับการพัฒนาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ สามารถทำนายจุดปฏิบัติการของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ แต่ไม่สามารถทำให้ระบบไฟฟ้ามีขีดความสามารถในการจ่ายโหลดในระดับกำลังที่สูงขึ้นจนถึงค่าพิกัดได้ โดยไม่ประสบปัญหาจากการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ศึกษาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน พร้อมทั้งหาแนวการต่อยอดและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันสามารถแสดงเป็นปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2005	Liu, X.Y., and Forsyth, A.J.	บทความนี้แนะนำการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดีซีเป็นเอซีที่จ่ายโหลดมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยตัวควบคุมการสร้างเสถียรภาพระบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งถือเป็นการชดเชยแบบแอกทีฟทางฝั่งโหลดที่อาศัยการป้อนกลับแบบไม่เป็นเชิงเส้นในการฉีดสัญญาณการสร้างเสถียรภาพไปยังลูบควบคุมกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดมอเตอร์

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2007	Liu, X.Y., Forsyth, A.J., and Cross, A.M.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้านโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังดีซีเป็นเอซีที่จ่ายโหลดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยตัวชดเชยค่าความต้านทานอินพุตเชิงลบที่อาศัยการฉีดสัญญาณชดเชยไปยังลูบควบคุมกระแสของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดมอเตอร์เพื่อปรับเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ของโหลด
2008	Usman Iftikhar, M., Godoy, E., Lefranc, P., Sadarnac, D., and Karimi, C.	บทความนี้แนะนำเสนอการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดีซีเป็นดีซีโดยอาศัยตัวควบคุมการป้อนกลับสถานะร่วมกับวิธีการวางตำแหน่งโพลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นการชดเชยแบบแอคทีฟทางฝั่งโหลด
2009	Rahimi, A.M., and Emadi, A.	บทความนี้แนะนำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันแบบบัค วงจรแปลงผันแบบบูสต์ และวงจรแปลงผันแบบบัค-บูสต์ที่จ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกับโหลดตัวต้านทานด้วยวิธีการห่วงแบบแอคทีฟ ซึ่งเป็นวิธีการที่อาศัยการสร้างตัวต้านทานเสมือนเพิ่มเข้าไปยังวงจรกรองเพื่อเพิ่มผลการห่วงของระบบ
2010	Rahimi, A.M., Williamson, G.A., and Emadi, A.	บทความนี้ได้แนะนำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกับโหลดตัวต้านทานด้วยเทคนิคลูบยกเล็ก ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในปัจจุบันเนื่องจากสามารถชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้โดยตรง

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2011	Kim, S., and Williamson, S. S.	บทความนี้นำเสนอการชดเชยแบบแอคทีฟด้านแหล่งจ่ายด้วยการควบคุมตำแหน่งค่าเจาะจงเด่นเพื่อชดเชยอิมพีแดนซ์เชิงลบในระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรง
2012	Magne, P., Marx, D., Nahid-Mobarakeh, B., and Pierfederic, S.	บทความนี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสด้วยการชดเชยแบบแอคทีฟด้านโหลดโดยอาศัยตัวเก็บประจุเสมือนเพื่อเติมการหน่วงในวงจรกรอง
2012	Mohamed, Y.A-R.I., Radwan, A.A.A., and Lee, T.K.	บทความนี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังดีซีเป็นเอซีที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบ PMSM ด้วยวิธีอาร์วีซีแบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุง โดยจะมุ่งเน้นไปที่การเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมความเร็วรอบที่ได้จาก 2 วิธีการ
2013	Zhang, X., Ruan, X., Kim, H., and Tse, K.T.	บทความนี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดีซีเป็นดีซีโดยอาศัยการเพิ่มวงจรช่วยที่เรียกว่า วงจรแปลงผันตัวเก็บประจุแบบแอคทีฟระหว่างวงจรฝั่งแหล่งจ่ายและฝั่งโหลด เพื่อทำการปรับเปลี่ยนเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของระบบให้มีค่าลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเป็นการเพิ่มการหน่วงให้กับวงจรกรอง

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2015	Wu, M., and D. D. C., Lu.	บทความนี้นำเสนออุปสรรคไปหน้าในการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดีซีเป็นดีซีที่มีการเชื่อมต่อโหลดวงจรแปลงผันแบบบัสผ่านวงจรกรองสัญญาณดีซี ซึ่งเป็นการชดเชยแบบแอคทีฟด้านโหลดที่มีประสิทธิภาพที่สุดเนื่องจากสามารถชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงจนถึงค่าพิกัดได้ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้แผนภาพไนควิสต์และเกณฑ์ของมิตเดิลบรูคค์พร้อมทั้งยืนยันผลการวิเคราะห์ทั้งหมดด้วยชุดทดสอบจริง
2016	Zhang, X., Zhong, Q-C., and Ming, W-L.	บทความนี้แนะนำการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวในกรณีที่แหล่งจ่ายของระบบมีการเปลี่ยนแปลงโดยอาศัยวิธีการควบคุมอิมพีแดนซ์เสมือนขนานกันเชิงปรับตัว พร้อมทั้งได้วิเคราะห์เสถียรภาพและยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพโดยใช้เกณฑ์ของมิตเดิลบรูคค์และผลจากชุดทดสอบจริง ตามลำดับ
2017	Sopapirm, T., Areerak K-N., and Areerak K-L.	บทความนี้แนะนำการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ไม่มีการควบคุมที่เชื่อมต่อโหลดวงจรแปลงผันแบบบัสที่มีการควบคุมแรงดันเอาต์พุตโดยอาศัยการประยุกต์ใช้วิธีการหวนแบบแอคทีฟพร้อมกับวงจรช่วยพร้อมทั้งดำเนินการตรวจสอบเสถียรภาพผ่านทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากนี้ยังได้ยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบด้วยชุดทดสอบจริง

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2018	Areerak, K-N., Sopapirm, T., Bozhko, S.V., Hill, C. I., Suyapan, A., and Areerak, K-L	บทความนี้ได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพที่มีการปรับตัวด้วยวิธีอุปยกเล็กในกรณีที่โหลดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเอซีเป็นดีซีที่ไม่มีการควบคุมมีการเปลี่ยนแปลง พร้อมทั้งวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการวิเคราะห์ระนาบเฟส นอกจากนี้ยังได้มีการยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพของระบบดังกล่าวด้วยชุดทดสอบจากห้องปฏิบัติการ
2018	Sopapirm, T.	บทความนี้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพทางฝั่งโหลดของวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ไม่มีการควบคุมและมีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการห่วงแบบแอกทีฟเพื่อเพิ่มค่าความต้านทานเสมือนในวงจรกรอง
2021	Pakdeeto, J., Areerak, Bozhko, S., and Areerak, K.	บทความนี้ได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพของระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กด้วยเทคนิคอุปยกเล็ก พร้อมทั้งดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจง นอกจากนี้ยังได้มีการยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพของระบบดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และชุดทดสอบจริงจากห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2021	Roy, R., and Kapat S.	บทความนี้นำเสนอวิธีการฉีดแรงดันกระแสเพื่อใช้ในการสร้างเสถียรภาพของระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังดีซีเป็นดีซีที่เชื่อมต่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวผ่านวงจรแปลงผันแบบบูสต์ที่มีการควบคุมหรือเรียกว่าวงจรแปลงผันบัสตรงกลาง โดยจะมุ่งเน้นในการสร้างเสถียรภาพเมื่อวงจรแปลงผันบัสตรงกลางและโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีการเพิ่มจำนวนมากขึ้น พร้อมทั้งดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยเกณฑ์ของมิตเดิลบรูค และยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพของระบบดังกล่าวด้วยชุดทดสอบจริง
2021	Suyapan, A., Areerak, K., Bozhko, S., Yeoh, S.S., and Areerak, K.	บทความนี้ได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีลูบยกเล็กในกรณีที่โหลดของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามกขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 270 V มีการเปลี่ยนแปลง พร้อมทั้งดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กและสัญญาณขนาดใหญ่โดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการวิเคราะห์ระบบเฟส ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้มีการยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพของระบบดังกล่าวด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และชุดทดสอบจริงจากห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2022	Phosung, R., Areerak, K., Sopapirm, T., and Areerak, K.	บทความนี้ได้นำเสนอการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกันโดยอาศัยอุปกรณ์ไปหน้าร่วมกับวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว พร้อมทั้งดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็กด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ถึงตัวแปรสถานะที่ส่งผลต่อค่าเจาะจงของระบบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ตัวประกอบมีส่วนร่วม สำหรับการยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพของระบบดังกล่าวจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลจากชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้างดังตารางที่ 2.5 สามารถสรุปเป็นแผนภาพการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การบรรเทาการขาดเสถียรภาพไม่ว่าจะวิธีการใดก็ตามจะตั้งอยู่บนพื้นฐานแนวคิดเดียวกันคือ การเพิ่มการหน่วงของระบบ (system damping) เพื่อชดเชยหรือกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวผ่านการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบภายในระบบที่ศึกษา (modifications) จากการศึกษาวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการนำเสนอวิธีการบรรเทาการขาดเสถียรภาพไว้ 2 วิธีการด้วยกันคือ วิธีที่ 1 วิธีแบบพาสซีฟจะอาศัยการแก้ไขส่วนประกอบทางด้านฮาร์ดแวร์ (hardware modifications) ด้วยการลดค่าตัวเหนี่ยวนำหรือเพิ่มค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองดีซีผ่านการขนานหรืออนุกรม รวมทั้งการเพิ่มอุปกรณ์พาสซีฟ ได้แก่ การนำตัวต้านทานมาต่ออนุกรม หรือขนานกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า หรือตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรอง เพื่อเพิ่มการหน่วงให้กับระบบ ซึ่งจะส่งผลทำให้เสถียรภาพโดยรวมของระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าเพิ่มขึ้น วิธีแบบพาสซีฟเป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อนในการออกแบบและการนำไปใช้งานจริงในทางปฏิบัติ แต่มีข้อเสียคือ ทำให้น้ำหนัก ขนาด ราคา และกำลังงานสูญเสียของระบบมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้สมรรถนะการทำงานของระบบโดยรวมลดลง วิธีที่ 2 วิธีแบบแอกทีฟเป็นวิธีการที่อาศัยการเพิ่มตัวชดเชยที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพในโครงสร้างการควบคุม (control structures modifications) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูงเมื่อเทียบกับ

วิธีแบบพาสซีฟเนื่องจากไม่มีการปรับเปลี่ยนส่วนประกอบทางด้านฮาร์ดแวร์ โดยวิธีการนี้สามารถจำแนกได้ 3 แนวทาง ดังแสดงในตารางที่ 2.6 แนวทางที่ 1 การชดเชยแบบแอคทีฟด้านแหล่งจ่าย (active compensation at feeder side) เป็นแนวทางที่อาศัยการสร้างสัญญาณชดเชย (compensation signal) หรือสัญญาณการบรรเทา (mitigation signal) บ้อนเข้าไปในโครงสร้างของระบบควบคุมด้านแหล่งจ่ายเพื่อสร้างผลการหน่วง (damping effect) ซึ่งทำให้การหน่วงของระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น นั่นคือ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังเช่น วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ (three-phase diode rectifier) และวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสแบบบริดจ์ (single-phase diode rectifier) จะไม่สามารถทำการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้ เนื่องจากอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรเรียงกระแสไม่สามารถควบคุมได้ผ่านสัญญาณควบคุมจากวงจรภายนอก แนวทางที่ 2 คือ การชดเชยแบบแอคทีฟด้านโหลด (active compensation at CPL side) ซึ่งจะอาศัยหลักในการเพิ่มผลการหน่วงให้กับระบบเช่นเดียวกับการหน่วงแบบแอคทีฟด้านแหล่งจ่าย แต่จะนำสัญญาณการบรรเทาที่สร้างขึ้นไปบ้อนให้กับโครงสร้างของระบบควบคุมด้านโหลดแทน โดยแนวทางนี้มีข้อดีคือ สามารถประยุกต์ใช้ได้กับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวทุกประเภท แต่มีข้อเสียคือ จะทำให้สมรรถนะการควบคุมการทำงานของโหลดลดลง ดังนั้น หากวงจรด้านแหล่งจ่ายของระบบที่ศึกษาประกอบด้วยวงจรแปลงผันกำลังที่ไม่สามารถควบคุมได้และสมรรถนะการทำงานของโหลดเป็นสิ่งสำคัญ การชดเชยหรือกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจำเป็นต้องพึ่งพาแนวทางที่ 3 คือ การชดเชยแบบแอคทีฟด้วยวงจรช่วย (active compensation using auxiliary circuits) โดยแนวทางนี้จะดำเนินการเพิ่มอุปกรณ์ (additional device) หรือวงจรช่วย (auxiliary circuits) ระหว่างด้านแหล่งจ่ายและด้านโหลดของระบบ ซึ่งส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบและทำให้ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมลดต่ำลง จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าแต่ละวิธีมีทั้งข้อดีและข้อเสีย รวมทั้งความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่ศึกษาแตกต่างกันออกไป สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะพิจารณาการชดเชยแบบแอคทีฟด้านแหล่งจ่ายด้วยเทคนิคลูปยกเลิก (loop-cancellation technique) เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้โดยตรงจึงทำให้ระบบไฟฟ้าที่ศึกษามีขีดความสามารถในการจ่ายระดับกำลังไฟฟ้าได้สูงจนถึงค่าพิกัดของระบบ โดยทั่วไปการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะวิเคราะห์และออกแบบให้เหมาะสมสำหรับการชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ณ จุดปฏิบัติงานจุดใดจุดหนึ่งเท่านั้น หากระบบที่ศึกษามีการเปลี่ยนแปลงจุดปฏิบัติงานอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวโดยที่ค่าที่ออกแบบไว้ไม่แปรเปลี่ยนตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลด อาจทำให้ระบบที่มีเสถียรภาพกลับมาขาดเสถียรภาพอีกครั้ง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว (adaptive stabilization) เพื่อทำให้ระบบไฟฟ้าที่ศึกษาสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานภายใต้ระดับกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัดของระบบ

ตารางที่ 2.6 ข้อดีและข้อเสียของการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยวิธีแบบแยกทีฟ

แนวทาง	ข้อดี	ข้อเสีย
การชดเชยแบบแยกทีฟด้านแหล่งจ่าย	ไม่ทำให้สมรรถนะการทำงานของโหลดลดลง	ไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบที่ไม่มีลูปควบคุมด้านแหล่งจ่าย
การชดเชยแบบแยกทีฟด้านโหลด	สามารถประยุกต์ใช้ได้กับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวทุกประเภท	ทำให้สมรรถนะการทำงานของโหลดลดลง
การชดเชยแบบแยกทีฟด้วยวงจรช่วย	สามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบที่ไม่มีลูปควบคุมด้านแหล่งจ่าย และไม่ทำให้สมรรถนะการทำงานของโหลดลดลง	ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบและทำให้ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมลดต่ำลง

การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวที่ได้มีการนำเสนอตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันมีอยู่มากมายหลากหลายแนวทาง ซึ่งสามารถจำแนกได้ตามพฤติกรรมการทำงานของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาได้ 2 กรณีหลัก ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 คือ กรณีที่ 1 แหล่งจ่ายของระบบมีการเปลี่ยนแปลงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองมีการเปลี่ยนแปลง โดยการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวสำหรับกรณีที่ 1 จะใช้วิธีการควบคุมอิมพีแดนซ์เสมือนขนานกันเชิงปรับตัวซึ่งเป็นการชดเชยแบบแยกทีฟด้านโหลดที่อาศัยหลักการในการค้นหาและตรวจจับค่าความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองที่เปลี่ยนไป อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของวงจรทางฝั่งแหล่งจ่ายเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว ภายใต้เงื่อนไขสมรรถนะการควบคุมของโหลดลดลงน้อยที่สุด แต่มีข้อจำกัดคือ การออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ใช้สำหรับการค้นหาค่าความถี่เรโซแนนซ์มีความยุ่งยากซับซ้อน หากค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดังกล่าวมีค่าไม่เหมาะสมจะส่งผลทำให้การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวเกิดความผิดพลาดได้ กรณีที่ 2 โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลง โดยการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวสำหรับกรณีที่ 2 นี้สามารถแบ่งออกได้ 2 แนวทางนั่นคือ แนวทางที่ 1 การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวที่อาศัยสมการที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (closed-form equation) เป็นแนวทางที่อาศัยสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยการพิสูจน์มาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยสมการดังกล่าวจะเป็นสมการอย่างง่ายของค่าอัตราขยายสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ ซึ่งจะแปรเปลี่ยนค่าได้ตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงไป โดยแนวทางนี้มีข้อดีคือ สมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวสามารถใช้สำหรับการสร้างเสถียรภาพของระบบได้ทุกกรณี ถึงแม้ว่าค่าพิกัดของระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่มีความซับซ้อน ยกตัวอย่างเช่น ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินและ

ระบบรางไฟฟ้า จะไม่สามารถหาสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบได้ แนวทางที่ 2 คือการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวที่อาศัยสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพ (adaptive stabilization equation based stability analysis) โดยสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวสำหรับแนวทางนี้จะอยู่ในรูปของค่าอัตราขยายที่แปรเปลี่ยนค่าได้ตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลด เช่นเดียวกับแนวทางที่ 1 เพียงแต่สมการดังกล่าวเป็นสมการพหุนาม (polynomial equation) ที่ได้มาจากการวิเคราะห์หาเส้นอเสถียรภาพ (instability line) ผ่านทฤษฎีบทค่าเจาะจง โดยแนวทางนี้มีข้อจำกัดคือ หากระบบไฟฟ้าที่ศึกษามีการเปลี่ยนแปลงพิกัดของระบบก็จำเป็นต้องหาสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวใหม่ สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะดำเนินการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวโดยอาศัยสมการที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและจะเรียกแนวทางการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวดังกล่าวว่า “วิธีการแบบดั้งเดิม (conventional design method)” เนื่องจากระบบไฟฟ้าที่ศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและแบตเตอรี่ ซึ่งมีความซับซ้อนและมีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวตามที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยแนวทางที่มีอยู่ในปัจจุบันไม่สามารถทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงดีขึ้นได้ ยิ่งไปกว่านั้นอาจทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงของระบบลดลงไม่เป็นไปตามมาตรฐาน MIL-STD-704F ได้

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ประยุกต์ใช้แนวทางการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของ รัฐพล โพธิ์สังข์ และคณะ (Phosung, R., Areerak, K., Sopapirm, T., and Areerak, K., 2022) ที่นำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Technique : AI) มาใช้ในกระบวนการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของลูปป้อนไปหน้า (feedforward loop) ที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพและสมรรถนะการควบคุมแรงดันของโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกัน มาพัฒนาและต่อยอดการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว (adaptive stabilization) โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูลาร์เชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search Algorithm : ATS) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบสัมประสิทธิ์ของสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวเพื่อทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และสอดคล้องตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดระยะทางและระยะเวลาทำการบิน ซึ่งถือได้ว่าเป็นงานวิจัยที่ต่อยอดจากในอดีตจนถึงปัจจุบัน และยังไม่มียานวิจัยใด ๆ ดำเนินการในลักษณะเช่นนี้กับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์วิธีการอื่น ๆ อาทิเช่น วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm : GA) และวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับแนวทางการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้เช่นกัน

ตารางที่ 2.7 ข้อดีและข้อเสียของการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว

กรณีศึกษา	แนวทาง	ข้อดี	ข้อเสีย
แหล่งจ่ายของระบบมีการเปลี่ยนแปลง	การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยการควบคุมอิมพีแดนซ์เสมือนขนานกันเชิงปรับตัว	ไม่ก่อให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบ	สมรรถนะการควบคุมของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวลดลงน้อยที่สุดและการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวจะเกิดความผิดพลาดหากออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอที่ใช้สำหรับค้นหาความถี่เรโซแนนซ์ของระบบไม่เหมาะสม
โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลง	การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยสมการอย่างง่ายที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	สมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวรองรับการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดของระบบ	ไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบที่มีความซับซ้อนได้
โหลดของระบบมีการเปลี่ยนแปลง	การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยสมการอย่างง่ายที่ได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพ	ประยุกต์ใช้ได้กับระบบที่มีความซับซ้อน	สมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวไม่รองรับการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดของระบบ

2.7 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 เป็นการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน ผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อเสถียรภาพ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์เสถียรภาพ และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งถือได้ว่าเป็นแนวทางและองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและแบตเตอรี่ ให้สามารถชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ประสิทธิผลที่ดี