

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันแนวคิดและแนวโน้มของวิศวกรรมการบินสมัยใหม่ (modern aerospace engineering) เกี่ยวกับเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น (More-Electric Aircraft : MEA) (Weimer, J.A., 1993; Emadi, A., and Ehsani, M., 2000; Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P., 2011; Ni, K., Liu, Y., Mei, Z., Wu, T., Hu, Y., Wen, H., and Wang, Y., 2019) ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการพัฒนาเครื่องบินพาณิชย์เป็นจำนวนมาก อาทิเช่น เครื่องบินแอร์บัส A330 (Airbus A330) และโบอิง 787 (Boeing 787) เป็นต้น โดยแนวความคิดดังกล่าวเป็นแนวคิดที่ต้องการจะเปลี่ยนแหล่งพลังงานหลักในเครื่องบินรุ่นแรก (Conventional Aircraft) ซึ่งได้มาจากระบบทางกล (mechanical system) ระบบนิวแมติก (pneumatic system) ระบบไฮดรอลิก (hydraulic system) ระบบไฟฟ้า (electrical system) ไปเป็นแหล่งพลังงานย่อยจากระบบไฟฟ้าเพียงระบบเดียวเท่านั้น เนื่องจากระบบทางกลมีความยุ่งยากซับซ้อนในการบำรุงรักษา (Ni, K., Liu, Y., Mei, Z., Wu, T., Hu, Y., Wen, H., and Wang, Y., 2019) ในส่วนของระบบนิวแมติกและระบบไฮดรอลิกเกิดการรั่วไหลของพลังงานได้ง่าย ยากต่อการตรวจจับความผิดปกติ ซึ่งอาจนำไปสู่อุบัติเหตุขณะนำเครื่องลงจอดและทำให้เที่ยวบินเกิดความล่าช้าได้ (Rosero, J.A., Ortega, J.A., Aldabas, E., and Romeral, L., 2007) ด้วยเหตุนี้อุปกรณ์ทางกล นิวแมติก และไฮดรอลิก หลายอย่างจึงได้ถูกแทนที่ด้วยอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ยกตัวอย่างเช่น การปั้มน้ำมันและเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ (fuel and oil pumping) ที่อาศัยพลังงานจากระบบทางกล จะถูกแทนที่ด้วยปั้มน้ำมันเชื้อเพลิงไฟฟ้า (electrical fuel pump) ของระบบไฟฟ้า ระบบป้องกันการเกาะของน้ำแข็งบนปีกเครื่องบิน (Wings Anti-Icing System : WAI) และระบบควบคุมสภาพอากาศภายในห้องโดยสาร (Environment Control System : ECS) ที่ปกติใช้ระบบนิวแมติก จะถูกแทนที่ด้วยอุปกรณ์ทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (electrical heaters) และชุดคอมเพรสเซอร์ (compressor) ที่ใช้พลังงานไฟฟ้า ตามลำดับ ตัวกระตุ้นแบบไฮดรอลิก (Electro-Hydraulic Actuators : EHAs) จะถูกแทนที่ด้วยการใช้ตัวกระตุ้นเชิงกลไฟฟ้า (Electromechanical Actuators : EMAs) เป็นต้น สำหรับสถาปัตยกรรมต้นแบบแรกของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (AC distribution system) ทั้งแบบความถี่คงที่ 400 Hz ขนาดแรงดัน 115 Vac และแบบปรับเปลี่ยนค่าความถี่ได้ตั้งแต่ 320-800 Hz ขนาดแรงดัน 115/230 Vac

(Wheeler, P., and Bozhko, S.V., 2014; Ni, K., Liu, Y., Mei, Z., Wu, T., Hu, Y., Wen, H., and Wang, Y., 2019) โดยบริษัทผู้ผลิตเครื่องบินอากาศยานและยูทอปรกรณ์ ดังเช่น แอร์บัสกรุ๊ป (Airbus Group) และบริษัทโบอิง (The Boeing Company) ได้นำสถาปัตยกรรมดังกล่าวมาใช้เป็นต้นแบบของเครื่องบินพาณิชย์ในเครื่องบินจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น สถาปัตยกรรมของเครื่องบินแอร์บัส A330 (Airbus A330) และโบอิง 767 (Boeing 767) เป็นต้น และต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นระบบจำหน่ายแบบผสม (hybrid distribution system) ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับและไฟฟ้ากระแสตรงร่วมกัน (Areerak, K-N., Wu, T., Bozhko, S.V., Asher, G.M., and Thomas, D.W.P., 2011; Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., De Lillo, L., and Thomas, D.W.P., 2012) เช่น เครื่องบินแอร์บัส A380 (Airbus A380) และโบอิง 787 (Boeing 787) เป็นต้น แต่สำหรับสถาปัตยกรรมของเครื่องบินที่ถูกนำมาใช้งานจริงในปัจจุบันและยังคงมีแนวโน้มการใช้งานอย่างต่อเนื่องจนถึงในอนาคต ทั้งในเชิงพาณิชย์และด้านการทหารเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC distribution system) เนื่องจากให้สมรรถนะการทำงานและความน่าเชื่อถือของระบบที่สูงกว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสสลับและแบบผสม นอกจากนี้ยังไม่จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจึงทำให้น้ำหนักเบาและสามารถลดกำลังงานสูญเสียในระบบได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการนำระบบไฟฟ้ามาใช้บนเครื่องบินมากขึ้นนอกจากจะมีประโยชน์ในหลาย ๆ มิติดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีประเด็นของปัญหาด้านเสถียรภาพที่ต้องนำมาพิจารณาอย่างละเอียดอีกด้วย เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลัง (Electrical Power System : EPS) ที่ใช้งานบนเครื่องบินโดยส่วนใหญ่ล้วนมีส่วนประกอบหลักเป็นวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมการทำงาน ยกตัวอย่างเช่น วงจรแปลงผันกำลังที่เชื่อมต่อกับชุดคอมเพรสเซอร์ของระบบควบคุมสภาพอากาศภายในห้องโดยสาร และวงจรแปลงผันกำลังที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งมีทำหน้าที่ในการบังคับทิศทางให้เครื่องบินหันหัวซ้าย – ขวา หรือเรียกว่าหางเสือ (Rudder) เป็นต้น ซึ่งวงจรแปลงผันที่มีการควบคุมดังกล่าวมักจะแสดงพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant Power Loads : CPLs) (Jusoh, A.B. 2004; Rivetta, C.H., Geoffrey, A., Williamson, G.A., and Emadi, A., 2005; Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C.H., and Williamson, G.A, 2006) ที่สามารถลดทอนเสถียรภาพโดยรวมของระบบไฟฟ้าบนเครื่องบินได้ (Kim, S., and Williamson, S.S., 2011; Areerak, K-N., Bozhko, S.V., Asher, G.M., De Lillo, L., and Thomas, D.W.P., 2012; Gao, F., and Bozhko, S.V., 2016) ซึ่งการขาดเสถียรภาพนั้นไม่เพียงทำให้สมรรถนะการควบคุมลดลงจนกระทั่งสูญเสียการควบคุมทั้งระบบเท่านั้น แต่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบที่นำไปสู่เที่ยวบินล่าช้าหรืออุบัติเหตุทางการบินได้ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว (adaptive stabilization) ที่อาศัยสมการอย่างง่ายหรือสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวในการคำนวณหาตัวอัตราขยายสำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพซึ่งสามารถแปรเปลี่ยนค่าได้ตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีการเปลี่ยนแปลงไป

จึงทำให้ระบบไฟฟ้าที่ศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ นั่นคือ ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC Distribution More Electric Aircraft Power Systems) สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดช่วงการทำงานภายใต้ระดับกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัดของระบบ อย่างไรก็ตามการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยแนวทางที่มีอยู่ในปัจจุบันไม่สามารถทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงดีขึ้นได้ ยิ่งไปกว่านั้นอาจทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงของระบบลดลงไม่เป็นไปตามมาตรฐาน MIL-STD-704F ได้ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ประยุกต์ใช้แนวทางการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของ รัฐพล โพธิ์สังข์ และคณะ (Phosung, R., Areerak, K., Sopapirm, T., and Areerak, K., 2022) ที่นำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Technique : AI) มาใช้ในกระบวนการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของลูปป้อนไปหน้า (feedforward loop) ที่มีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพและสมรรถนะการควบคุมแรงดันของโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวขนานกัน มาพัฒนาและต่อยอดการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search Algorithm : ATS) (Puangdownreong, D., Areerak, K-N., Sujitjorn, S., and Kulworawanichpong, T., 2004; Sopapirm, T., Areerak, K-N., and Areerak, K-L., 2012; Pakdeeto, J., Chanpittayagit, R., Areerak, K-N., and Areerak K-L., 2017) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบสัมประสิทธิ์ของสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวเพื่อให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และสอดคล้องตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดระยะทางและระยะเวลาทำการบิน ซึ่งถือได้ว่าเป็นงานวิจัยที่ต่อยอดจากในอดีตจนถึงปัจจุบัน และยังไม่มียานวิจัยใด ๆ ดำเนินการในลักษณะเช่นนี้กับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์วิธีการอื่น ๆ อาทิเช่น วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm : GA) (Narongrit, T., Areerak, K-N., and Areerak, K-L., 2010) และวิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) (Chonsatidjamroen, S., Areerak, K-N., and Areerak, K-L., 2012) ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับแนวทางการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้เช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษา ค้นคว้า และเสริมสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับสถาปัตยกรรมต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น

1.2.2 เพื่อศึกษา ค้นคว้า และเสริมสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น

1.2.3 เพื่อศึกษา ค้นคว้า และเสริมสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดี่ยว ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ และการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบได้

1.2.4 เพื่อศึกษา ค้นคว้า และเสริมสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง เทคนิคการวิเคราะห์แบบโมเดลที่เรียกว่า การวิเคราะห์ตัวประกอบการมีส่วนร่วม และวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นผ่านการวิเคราะห์ระนาบเฟส ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดี่ยว

1.2.5 เพื่อศึกษา ค้นคว้า และเสริมสร้างองค์ความรู้สำหรับการชดเชยแบบแอ็กทีฟด้านแหล่งจ่ายโดยใช้เทคนิคคลุกย่อยของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดี่ยว

1.2.6 เพื่อต่อยอด พัฒนา และสร้างองค์ความรู้ใหม่สำหรับการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดี่ยว ด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบไฟฟ้าที่ศึกษาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นและมีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดี่ยว (single-generator-single-bus)

1.3.2 ระบบควบคุมของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาเป็นตัวควบคุมแบบเวกเตอร์บนแกนดีคิว ซึ่งจะประกอบไปด้วย ตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า ตัวควบคุมแบบดรู๊ป และตัวชดเชยแรงดันไฟฟ้า

1.3.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรเรียงกระแสภาคหน้าแบบแอ็กทีฟจะอาศัยวิธีการแบบดั้งเดิม

1.3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาจะพิสูจน์มาจากวิธีดีคิว

1.3.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาจะอาศัยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง เทคนิคการวิเคราะห์แบบโมเดลที่เรียกว่า การวิเคราะห์ตัวประกอบการมีส่วนร่วม และวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นผ่านการวิเคราะห์ระนาบเฟส

1.3.6 การบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาจะใช้การชดเชยแบบแอ็กทีฟด้านแหล่งจ่ายด้วยเทคนิคคลุกย่อย

1.3.7 การสร้างสมการอย่างง่ายของค่าอัตราขยายป้อนกลับที่แปรเปลี่ยนค่าได้ตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลด สำหรับการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาจะอาศัยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวในการออกแบบค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ของสมการอย่างง่ายที่อยู่ในรูปของสมการโพลิโนเมียล

1.3.8 งานวิจัยวิทยานิพนธ์จะไม่พิจารณาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ

1.3.9 การจำลองสถานการณ์ของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาจะอาศัยชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB และเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป (hardware-in-the-loop : HIL)

1.3.10 ชุดทดสอบจริงที่ถูกสร้างขึ้นภายในห้องปฏิบัติการของระบบไฟฟ้าที่ศึกษา ซึ่งใช้สำหรับยืนยันผลการศึกษาเสถียรภาพทั้งหมดจะมีพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 114.4 W

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์มุ่งเน้นที่จะศึกษาการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นและมีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดี่ยว โดยอาศัยการชดเชยแบบแอคทีฟด้านแหล่งจ่ายด้วยเทคนิคลูปยกเล็กเท่านั้น

1.4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีชนิดแม่เหล็กถาวรที่พิจารณาจะทำงานไม่เกินความเร็วรอบที่ค่าพิกัดเท่านั้น

1.4.3 การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังในระบบไฟฟ้าที่ศึกษาจะพิจารณาในย่านโหมดการนำกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode: CCM) เท่านั้น

1.4.4 แบบจำลองของวงจรเรียงกระแสภาคหน้าแบบแอคทีฟที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์บนโปรแกรม MATLAB เป็นแบบจำลองแบบฟังก์ชัน (functional model)

1.4.5 การทำแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่ง

1.4.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ในขณะที่การตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการบรรเทาการขาดเสถียรภาพ และการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวจะอาศัยทั้งการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป และการสร้างชุดทดสอบจริงภายในห้องปฏิบัติการ

1.4.7 การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาจะพิจารณาเฉพาะภายใต้พิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ

1.4.8 วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ในการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะใช้อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

1.5 สมมติฐานการวิจัย

การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินด้วยเทคนิคคุยกเล็ก ร่วมกับอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว นอกจากจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดระยะทาง และระยะเวลาทำการบินแล้ว ยังสามารถทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และสอดคล้องตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ซึ่งสามารถยืนยันและตรวจสอบผลได้โดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB การจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูป และการสร้างชุดทดสอบจริงภายในห้องปฏิบัติการ

1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

1.6.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหาแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงตก อันเนื่องมาจากพฤติกรรมการทำงานของตัวควบคุมแบบดรูปในระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน

1.6.2 งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการวิเคราะห์หาตัวแปรสถานะที่มีความเกี่ยวข้องกับค่าเจาะจงเด่นของระบบเพื่อใช้สร้างระนาบเฟสสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยการวิเคราะห์ระนาบเฟส

1.6.3 งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำวิธีการห้วงแบบแอกทีฟด้านแหล่งจ่ายที่อาศัยเทคนิคคุยกเล็กมาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีความทันสมัยนั้นคือ ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามกขึ้นที่รวมตัวชดเชยแรงดันเข้าไปในโครงสร้างของตัวควบคุมแบบเวกเตอร์บนแกนดีคิว

1.6.4 งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวในการออกแบบสัมประสิทธิ์ของสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว เพื่อให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และสอดคล้องตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดระยะทางและระยะเวลาทำการบิน

จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทั้ง 4 ข้อนี้ ถือได้ว่าเป็นงานวิจัยที่ต่อยอดจากในอดีตจนถึงปัจจุบัน และยังไม่มียานวิจัยใด ๆ ดำเนินการในลักษณะเช่นนี้กับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน รวมถึงการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับสถาปัตยกรรมต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น

1.7.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น

1.7.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้น

1.7.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีคิด ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ และการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดี่ยว

1.7.5 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ และการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดี่ยว

1.7.6 ได้สร้างองค์ความรู้ใหม่สำหรับการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดี่ยว ด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว

1.7.7 ได้บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ระดับชาติและนานาชาติ รวมทั้งลิขสิทธิ์โปรแกรม

1.8 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์มีส่วนประกอบทั้งหมด 8 บท โดยแต่ละบทได้มีการนำเสนอรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย สมมติฐานของการวิจัย จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสถียรภาพ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังได้สรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมเพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัยในปัจจุบันและพัฒนาต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

บทที่ 3 นำเสนอสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่สนใจศึกษานั้นคือระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรงแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดียวและแบตเตอรี่ การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาทั้งในกรณีที่ยังไม่มีตัวควบคุมและมีตัวควบคุมด้วยวิธีดีคิว รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ผ่านชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB สำหรับการออกแบบตัวควบคุมของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาจะได้รับการอธิบายไว้อย่างละเอียดในบทนี้ด้วยเช่นกัน

บทที่ 4 นำเสนอมาตรฐาน MIL-STD-704F ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่ศึกษา และการศึกษาผลกระทบที่มีต่อเสถียรภาพอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบโดยการวิเคราะห์และศึกษาเสถียรภาพดังกล่าวจะอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงควบคู่ไปกับวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยการวิเคราะห์ระนาบเฟส พร้อมทั้งดำเนินการวิเคราะห์หาตัวประกอบการมีส่วนร่วมของระบบผ่านทฤษฎีบทค่าเจาะจงสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทั้งหมดจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

บทที่ 5 นำเสนอหลักการในการกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวด้วยเทคนิคคุปยกเล็กและการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคคุปยกเล็ก รวมถึงการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวผ่านวิธีการแบบดั้งเดิมของระบบไฟฟ้าที่ศึกษา พร้อมทั้งยืนยันผลการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

บทที่ 6 นำเสนอหลักการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัวและการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว พร้อมทั้งยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยการจำลองสถานการณ์ผ่านชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป

บทที่ 7 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบและผลการทดสอบของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว โดยเนื้อหาในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ๆ คือ คือ ส่วนที่ 1 จะเป็นเนื้อหาเกี่ยวกับสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาและมาตรฐาน MIL-STD-704F สำหรับชุดทดสอบจริง ส่วนที่ 2 จะกล่าวถึงรายละเอียดต่าง ๆ ของชุดทดสอบจริงที่ได้รับการสร้างขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ พร้อมทั้งการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชุดทดสอบภายใต้กรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ส่วนที่ 3 จะเป็นการศึกษาและวิจัยด้านเสถียรภาพของชุดทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษา

และส่วนที่ 4 ได้นำเสนอผลการทดสอบจากชุดทดสอบจริงเพื่อใช้ยืนยันผลการศึกษาและวิจัยด้านเสถียรภาพทั้งหมด

บทที่ 8 สรุปผลการดำเนินงานและแนวทางวิจัยในอนาคต

ภาคผนวกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีอยู่ด้วยกัน 5 ส่วน ภาคผนวก ก. แสดงรายการผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา ภาคผนวก ข. แสดงโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ของนิวตัน – ราฟสันสำหรับคำนวณหาค่ามุมต่างเฟสระหว่างแรงดันไฟฟ้าภายในและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ภาคผนวก ค. แสดงรายละเอียดสมการในรูปแบบทั่วไปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้น ภาคผนวก ง. แสดงรายละเอียดการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว ภาคผนวก จ. แสดงรายละเอียดโปรแกรมการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงของชุดทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน