

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ดำเนินการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว โดยในเบื้องต้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ดำเนินการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินเพื่อพิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ทันสมัย ซึ่งถูกนำมาใช้งานจริงในปัจจุบันและยังคงมีแนวโน้มการใช้งานอย่างต่อเนื่องจนถึงในอนาคต ไม่ว่าจะเป็นในเชิงพาณิชย์หรือด้านการทหาร โดยระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ได้รับความสนใจและศึกษาคือ ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและแบตเตอรี่ อีกทั้งยังได้มีการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้า การวิเคราะห์เสถียรภาพ และการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า เพื่อเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการดำเนินงานวิจัยในปัจจุบันและพัฒนาต่อยอดงานวิจัยในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นแนวทางและองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาวิจัยด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตามเชิงปรับตัว เพื่อให้ผลตอบสนองของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเหมาะสมที่สุดและสอดคล้องตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดระยะเวลาและระยะเวลาทำการบิน ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์และยังไม่มีงานวิจัยใด ๆ ดำเนินการในลักษณะเช่นนี้กับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน รวมถึงการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวโดยรายละเอียดของผลงานวิจัยต่าง ๆ และการพัฒนาต่อยอดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามากขึ้นและมีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ซึ่งเป็นเนื้อหาที่ได้รับการนำเสนอในบทที่ 3 มีความสำคัญอย่างยิ่งต่องานวิจัยด้านเสถียรภาพ ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ และการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว แต่เมื่อพิจารณาสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาจะพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเป็นแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลา อันเนื่องมาจาก

พฤติกรรมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีชนิดแม่เหล็กถาวรและอุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจรเรียงกระแสภาคหน้าแบบแอคทีฟ ซึ่งทำให้การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงอาศัยองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 2 เพื่อเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสมในการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับเวลาของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินไปเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้เลือกวิธีดีคิวมาประยุกต์ใช้สำหรับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยจะเริ่มต้นจากการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาวิจัยแบบวงเปิด (ไม่พิจารณาตัวควบคุม) จากนั้นต่อยอดและพัฒนาไปเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแบบวงปิดโดยอาศัยการพิจารณาเพิ่มเติมเฉพาะในส่วนของตัวควบคุมแบบเวกเตอร์บนแกนดีคิวแต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการพิสูจน์จากวิธีดีคิวเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดใหญ่เท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ประยุกต์ใช้วิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นของอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งในการเปลี่ยนแบบจำลองดังกล่าวให้เป็นแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นที่มีความเหมาะสมและเพียงพอต่อการศึกษาวิจัยด้านเสถียรภาพผ่านการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเป็นเชิงเส้นหรือการวิเคราะห์เสถียรภาพสัญญาณขนาดเล็ก พร้อมทั้งดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะเห็นได้ว่า แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นและแบบจำลองที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นซึ่งได้รับการพิสูจน์ขึ้นสามารถอธิบายพฤติกรรมการทำงานและพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

การศึกษาวิจัยด้านเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาควรเริ่มต้นจากการวิเคราะห์เสถียรภาพเป็นอันดับแรก เพื่อให้ทราบถึงจุดปฏิบัติงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพและหลีกเลี่ยงผลเสียที่ตามมา ยกตัวอย่างเช่น สมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมลดลงจนไม่เป็นตามมาตรฐาน MIL-STD-704F หรือทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบโดยรวมที่นำไปสู่อุบัติเหตุทางการบิน เป็นต้น พร้อมทั้งพิจารณาหาแนวทางในการแก้ปัญหาด้านเสถียรภาพที่เหมาะสม หากระบบไฟฟ้ากำลังที่ศึกษาเกิดการขาดเสถียรภาพก่อนพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบก็จำเป็นจะต้องอาศัยกระบวนการในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ในทางตรงกันข้าม หากจุดปฏิบัติงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรมากกว่าพิกัดของระบบก็ไม่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการบรรเทาการขาดเสถียรภาพแต่อย่างใด โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาด้วยกัน 2 วิธีคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยการวิเคราะห์ระนาบเฟส เนื่องจากทฤษฎีบทค่าเจาะจงนั้นเป็นวิธีการที่ง่ายและยังสามารถพิจารณาถึงแนวโน้มการขาดเสถียรภาพของระบบผ่านวิธีการเคลื่อนที่ของค่าเจาะจงได้ อีกทั้งยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับการวิเคราะห์

ตัวประกอบการมีส่วนร่วมซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบโมเดลเพื่อวิเคราะห์หาตัวแปรสถานะที่มีอิทธิพลต่อตำแหน่งของค่าเจาะจงเด่น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรง โดยตัวแปรสถานะดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการสร้างระบบเฟสสำหรับการวิเคราะห์ระบบเฟส ในส่วนของการวิเคราะห์ระบบเฟสไม่เพียงแต่สามารถวิเคราะห์หาจุดขาดเสถียรภาพได้เท่านั้นแต่ยังสามารถตรวจสอบสมรรถนะการควบคุมแรงดันของแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการศึกษาผลกระทบที่มีต่อเสถียรภาพอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องโดยอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB และเทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป ซึ่งผลการตรวจสอบความถูกต้องแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพทั้ง 2 วิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ นอกจากจะสามารถคาดเดาจุดปฏิบัติงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพก่อนระดับกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัดได้อย่างถูกต้องแม่นยำแล้ว ยังสามารถวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อเสถียรภาพอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบได้อีกด้วย ซึ่งถือได้ว่า เป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบในการพิจารณาเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่พิจารณาให้มีความเหมาะสมและเพียงพอต่อการใช้งานจริงในทางปฏิบัติ โดยรายละเอียดของมาตรฐาน MIL-STD-704 การวิเคราะห์เสถียรภาพและการศึกษาผลกระทบที่มีต่อเสถียรภาพอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่พิจารณา รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 4

การวิเคราะห์และตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงปัญหาด้านเสถียรภาพและผลเสียที่ตามมาอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวในระบบ รวมทั้งทำให้ทราบถึงจุดปฏิบัติงานที่ทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพอีกด้วย อย่างไรก็ตามเพียงแค่การวิเคราะห์เสถียรภาพไม่สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพก่อนค่าพิกัดกำลังไฟฟ้ากลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อไปได้ ดังนั้นในบทที่ 5 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้ดำเนินการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็ก ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้โดยตรง จึงทำให้การบรรเทาการขาดเสถียรภาพมีประสิทธิภาพและทำให้ระบบมีขีดความสามารถในการจ่ายระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่สูงมากขึ้น สำหรับการวิเคราะห์หาค่าอัตราขยายการป้อนกลับของเทคนิคลูปยกเล็ก (K_{FB}) จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับทฤษฎีบทค่าเจาะจง การวิเคราะห์ตัวประกอบการมีส่วนร่วม และการวิเคราะห์ระบบเฟส พร้อมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์และออกแบบด้วยการจำลองสถานการณ์ จากผลการวิเคราะห์และผลการจำลองสถานการณ์ที่สอดคล้องกันแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ค่า K_{FB} ที่มากเกินไปกลับส่งผลเสียมากกว่าผลดีต่อการบรรเทาการขาดเสถียรภาพนั่นคือทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพได้ ในทางตรงกันข้าม การเลือกใช้ค่า K_{FB} ที่น้อยและเพียงพอต่อ

การบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ ณ จุดปฏิบัติงานนั้น ๆ ได้ ด้วยเหตุนี้การเลือกใช้ค่า K_{FB} สำหรับการบรรเทาการขาดเสถียรภาพจะอาศัยเกณฑ์การเลือกค่า K_{FB} ที่น้อยและเพียงพอ อย่างไรก็ตาม การบรรเทาการขาดเสถียรภาพเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทำงานจำเป็นต้องอาศัยการออกแบบค่า K_{FB} ที่เหมาะสมกับจุดปฏิบัติงานต่าง ๆ ของระบบใหม่ทุกครั้ง ซึ่งเมื่อคำนึงถึงสถานการณ์ทำการบินจริงจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังทำให้การบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาเกิดความล่าช้าจนอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุทางการบินได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษามีเสถียรภาพตลอดระยะทางและระยะทำการบิน โดยการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวดังกล่าวเป็นการประยุกต์ใช้การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็กร่วมกับสมการอย่างง่ายของค่าอัตราขยายป้อนกลับ K_{FB} ที่แปรเปลี่ยนค่าได้ตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว หรือเรียกสมการดังกล่าวว่า สมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะอาศัยการหาสมการโพลีโนเมียลที่ได้มาจากการวิเคราะห์หาเส้นอเสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิสูจน์มาจากวิธีดีคิว เพื่อหาสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวดังกล่าว จากผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎี การจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB และการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคฮาร์ดแวร์ในลูบที่มีความสอดคล้องกันสามารถยืนยันได้ว่า วิธีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมสามารถทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดระยะทางและระยะทำการบิน รวมทั้งทำให้แอมพลิจูดของผลตอบสนองแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง (V_b) มีค่าอยู่ในช่วง 250 V ถึง 280 V ตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704 อีกด้วย อย่างไรก็ตาม ช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงในบางจุดปฏิบัติงานยังมีค่ามากกว่า 0.04 วินาที ไม่เป็นตามมาตรฐานที่ระบุไว้ ทั้งนี้เป็นเพราะการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมไม่ได้พิจารณามาตรฐาน MIL-STD-704F ในขณะทำการออกแบบสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่เรียกว่า อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวมาประยุกต์ใช้กับการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว

การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวเพื่อปรับปรุงช่วงเวลาเข้าที่ของผลตอบสนองแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704 จะอาศัยการประยุกต์ใช้การบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคลูปยกเล็กร่วมกับสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวซึ่งจะอยู่ในรูปของค่าอัตราขยายป้อนกลับที่แปรเปลี่ยนค่าได้ตามระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดเช่นเดียวกับการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 แต่จะแตกต่างกันในส่วนของสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวที่ได้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวในการออกแบบสมการ

สร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวผ่านการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ (a_0 และ a_1) ของสมการโพลิโนเมียลอันดับหนึ่งที่สามารถทำให้ผลการตอบสนองแรงดัน V_b มีสมรรถนะที่ดีมากยิ่งขึ้นและเป็นไปตามกรอบมาตรฐานที่กำหนดทุกประการ ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดระยะทางและระยะเวลาทำการบินโดยอัลกอริทึมการค้นหาดังกล่าวจะได้รับการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งได้แก่จำนวนค่าตอบเริ่มต้น จำนวนค่าตอบรอบข้าง ค่ารัศมีการค้นหา ค่าอัตราปรับลดรัศมี และจำนวนรอบการค้นหา อีกทั้งยังได้มีการกำหนดขอบเขตการค้นหาที่เหมาะสมเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาให้มากยิ่งขึ้น โดยในส่วนของผลการออกแบบสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวได้นำเสนอผลการเข้าสู่ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (W) จำนวน 5 ครั้ง สำหรับนำมาใช้ในการพิจารณาหาค่าสัมประสิทธิ์ a_0 และ a_1 ของสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวที่เหมาะสมที่สุดผ่านเงื่อนไขค่า W ที่น้อยที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ a_0 และ a_1 ที่ได้จากการค้นหาทั้ง 5 ครั้งมีค่าที่ใกล้เคียงกันหรือเป็นชุดข้อมูลที่เกาะกลุ่มกัน ดังนั้นจึงเป็นการรับประกันได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ a_0 และ a_1 ที่เลือกใช้เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง การวิเคราะห์ตัวประกอบการมีส่วนร่วม และการวิเคราะห์ระนาบเฟส รวมทั้งผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSytem™ บนโปรแกรม MATLAB และเทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ค่าสัมประสิทธิ์ a_0 และ a_1 ของสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวที่ได้รับการออกแบบด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวจะให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรง (V_b) ที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ที่ออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และสอดคล้องตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F อีกทั้งยังทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพทุก ๆ จุดปฏิบัติงาน ภายใต้ระดับกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัด นอกจากนี้การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวยังมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบในช่วง $\pm 10\%$ อีกด้วย โดยการดำเนินงานในลักษณะนี้ถือเป็นการวิจัยต่อยอดจากงานวิจัยในอดีตและในปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยใด ๆ ที่นำเสนอแนวทางดังกล่าวมาพัฒนาใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินและการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว ซึ่งจะได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 6

ในลำดับสุดท้ายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นเนื้อหาในบทที่ 7 ซึ่งได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบและผลการทดสอบของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน โดยจะเริ่มจากการอธิบายถึงความแตกต่างระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีพิกัดแรงสูงและชุดทดสอบที่สร้างขึ้นภายในห้องปฏิบัติการซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ทำหน้าที่ในการผลิตไฟฟ้ากระแสสลับในสถาปัตยกรรมจริงของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินจะถูกแทนที่ด้วยระบบผลิตไฟฟ้ากระแสสลับของชุดทดสอบที่ประกอบไปด้วยชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมมูลจากบริษัท CHROMA รุ่น 61704 ที่ทำงานร่วมกับโปรแกรม AC Source Soft Panel และวงจรกรองทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ส่วนที่ 2 โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวแบบอุดมคติซึ่งเป็นโหลดโดยส่วนใหญ่ของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีพิกัดแรงสูงและส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบโดยตรงจะถูกแทนที่

ด้วยโพลดวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุม และส่วนที่ 3 พิกัดกำลังไฟฟ้าและขนาดของแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงของระบบจากเดิมที่มีค่าเท่ากับ 45 kW และ 270 V จะถูกปรับลดลงให้มีค่าเท่ากับ 114.4 W และ 120 V ตามลำดับ โดยการกำหนดพิกัดของระบบดังกล่าวจะทำให้ค่าพารามิเตอร์ รวมทั้งมาตรฐาน MIL-STD-704F ที่ใช้ระบุคุณลักษณะเฉพาะของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินแตกต่างไปจากค่าพารามิเตอร์และมาตรฐานเดิมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีพิกัดแรงสูง ด้วยเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงได้นำเสนอมาตรฐาน MIL-STD-704F สำหรับการบ่งชี้สมรรถนะการทำงานของชุดทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินใหม่อีกครั้ง ในลำดับถัดมาได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการค้นหาลักษณะการปรับตัวซึ่งจะอธิบายเกี่ยวกับส่วนประกอบต่าง ๆ และหน้าที่ของแต่ละวงจร ได้แก่ ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรเรียงกระแสภาคหน้าแบบแอคทีฟและตัวควบคุม วงจรทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง และโพลต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าที่ศึกษา พร้อมทั้งนำเสนอการทดสอบสมรรถนะการควบคุมของชุดทดสอบตามมาตรฐาน MIL-STD-704F เพื่อแสดงให้เห็นว่า ชุดทดสอบที่ได้รับการสร้างขึ้นสามารถควบคุมแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างถูกต้องแม่นยำตามค่าสิ่งที่ได้รับการโปรแกรมไว้ โดยไม่ประสบปัญหาผลตอบสนองของแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงไม่เป็นไปตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ทั้งในส่วนของคุณค่าแรงดันไฟฟ้า ช่วงเวลาเข้า และการกระเพื่อมของแรงดัน ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปใช้ยืนยันผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีทั้งหมด หลังจากนั้นจึงได้ดำเนินการศึกษาและวิจัยด้านเสถียรภาพของชุดทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาทั้งการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพ การบรรเทาการขาดเสถียรภาพ การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม และการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการค้นหาลักษณะการปรับตัวของชุดทดสอบ พร้อมทั้งยืนยันข้อสรุปที่ได้จากผลการศึกษาวิจัยด้วยผลการทดสอบที่อาศัยการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อก SimPowerSystem™ บนโปรแกรม MATLAB และผลจากชุดทดสอบจริงภายในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 4 กรณี กรณีแรกเป็นการทดสอบสภาวะขาดเสถียรภาพของชุดทดสอบ เพื่อแสดงให้เห็นถึง ผลกระทบของโพลกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีต่อเสถียรภาพโดยรวมของชุดทดสอบ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ชุดทดสอบของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาไม่สามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดที่ตั้งไว้ เนื่องจากประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพก่อนถึงระดับกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัด กรณีที่สองคือ การทดสอบการบรรเทาการขาดเสถียรภาพด้วยเทคนิคคุยกเล็กของชุดทดสอบ เพื่อแสดงถึง สมรรถนะการชดเชยผลของโพลกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ดีของเทคนิคคุยกเล็ก จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ชุดทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินจากเดิมที่มีสภาวะการขาดเสถียรภาพจะกลับมาทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ ภายหลังกระบวนการบรรเทาการขาดเสถียรภาพทำงาน อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ค่าอัตราขยายป้อนกลับ K_{FB} ที่มีค่าคงที่ ในขณะที่ระดับกำลังไฟฟ้าของโพลกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังบน

เครื่องบินกลับมาขาดเสถียรภาพอีกครั้งได้ กรณีที่สามคือ การทดสอบการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เพื่อแสดงถึงสมรรถนะการยกเลิกหรือชดเชยผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวและข้อจำกัดของวิธีการดังกล่าว จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวที่อาศัยการออกแบบสมการการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมสามารถทำให้ชุดทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินจากที่เคยขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้งและสามารถทำงานต่อไปได้ในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูง ๆ จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ตั้งไว้ ถึงแม้ว่าโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องก็ตาม แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่สามารถทำให้สมรรถนะการควบคุมแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไปตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ได้ กรณีสุดท้ายเป็นการทดสอบการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกลไกการตรวจสอบเสถียรภาพ กลไกการตรวจสอบคุณลักษณะของแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรง และการประเมินสมรรถนะการควบคุมภายในอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว นอกจากจะทำให้ชุดทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ศึกษาทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดระยะทางและระยะเวลาทำการบิน โดยไม่ประสบปัญหาการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากระดับกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีค่าสูงขึ้น ยังสามารถทำให้ผลตอบสนองแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไปตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ทุกประการและมีสมรรถนะการควบคุมแรงดันที่ดีกว่าผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการแบบดั้งเดิม ดังนั้นจึงถือได้ว่า แนวคิดและวิธีการในการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินให้ประสิทธิผลที่ดี มีความน่าเชื่อถือสูง เหมาะอย่างยิ่งสำหรับนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมการบินจริง

8.2 สรุปจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

8.2.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหาแรงดันบัสไฟฟ้ากระแสตรงตก อันเนื่องมาจากพฤติกรรมการทำงานของตัวควบคุมแบบดรูปด้วยการประยุกต์ใช้ตัวชดเชยแรงดันร่วมกับตัวควบคุมแบบเวกเตอร์บนแกนตึกที่มีอยู่เดิมในระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามกขึ้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดียว

8.2.2 งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการวิเคราะห์หาตัวแปรสถานะที่มีความเกี่ยวข้องกับค่าเจาะจงเด่นของระบบเพื่อใช้สร้างระนาบเฟสสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามกขึ้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดี่ยวและบัสเดียว ด้วยการวิเคราะห์ระนาบเฟส

8.2.3 งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำวิธีการห้วงแบบแอกทีฟด้านแหล่งจ่ายที่อาศัยเทคนิคลูบยกเล็กมาใช้ในการบรรเทาการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่มีความทันสมัย

นั่นคือ ระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามามากขึ้นที่รวมตัวชุดเซยแรงดันเข้าไปในโครงสร้างของตัวควบคุมแบบเวกเตอร์บนแกนดีคิว

8.2.4 งานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวในการออกแบบสัมประสิทธิ์ของสมการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวเพื่อให้ผลตอบสนองแรงดันบัลไฟฟ้ากระแสตรงมีสมรรถนะการควบคุมที่เหมาะสมและมีคุณลักษณะสอดคล้องตามกรอบมาตรฐาน MIL-STD-704F ภายใต้เงื่อนไขการมีเสถียรภาพตลอดระยะทางและระยะเวลาทำการบิน

จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทั้ง 4 ข้อนี้ ถือได้ว่าเป็นงานวิจัยที่ต่อยอดจากในอดีตจนถึงปัจจุบัน และยังไม่มียานวิจัยใด ๆ ดำเนินการในลักษณะเช่นนี้กับระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบิน รวมถึงการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัว

8.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

8.3.1 ควรมีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้ามามากขึ้นที่มีระบบจำหน่ายแบบไฟฟ้ากระแสตรง แบบหลายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและบัลเดียว (multi-generators-single-bus) และระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินที่ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด (all electric aircraft) ด้วยวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากสถาปัตยกรรมของระบบไฟฟ้ากำลังบนเครื่องบินดังกล่าวมีแนวโน้มจะได้รับการต่อยอดพัฒนาและนำมาใช้งานจริงในอนาคต

8.3.2 ควรมีการสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวด้วยอัลกอริทึมการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัวสำหรับระบบอื่น ๆ อาทิเช่น ระบบโครงข่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก (DC micro-grid system) ระบบรางไฟฟ้า (railway system) รถยนต์ไฟฟ้า (electric vehicle) และเรือดำน้ำ (submarine) เป็นต้น เพื่อแสดงให้เห็นว่า แนวทางและองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความยืดหยุ่นสามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบไฟฟ้าอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน

8.3.3 ควรมีการนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์อื่น ๆ อาทิเช่น วิธีจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm : GA) วิธีการค้นหาแบบการเคลื่อนที่ของกลุ่ม (Particle Swarm Optimization : PSO) และวิธีการผสมเกสรดอกไม้ (flower pollination algorithm : FPA) มาประยุกต์ใช้กับงานด้านเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังโดยอาศัยขั้นตอนและวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เพื่อให้การศึกษาและวิจัยด้านเสถียรภาพเกิดความหลากหลายมากยิ่งขึ้น