

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยเริ่มต้นจากการสำรวจ ปรัชน์วรรณกรรมและงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของ วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง รวมทั้งการบรรเทาการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของ ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้ศึกษาและค้นคว้า ถือเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญ ในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนางานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างเสถียรภาพให้กับ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ด้วยตัวตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า เพื่อทำให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถทำงาน ได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าปกติของระบบ ซึ่งเป็นจุดเด่นและวัตถุประสงค์หลักของ งานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค้นคว้า และการสำรวจปรัชน์ วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ทั้งหมด ได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 2

การสำรวจปรัชน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 พบว่าวงจรอิเล็กทรอนิกส์- กำลังที่มีการควบคุมได้ถูกประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากวงจรดังกล่าว สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้า และ/หรือกระแสไฟฟ้า และ/หรือกำลังไฟฟ้าให้เป็นไปตามความต้องการ ของผู้ใช้งานได้ แต่อย่างไรก็ตามตัวควบคุมแต่ละแบบล้วนมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน การเลือก ใช้ตัวควบคุมให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงานของ ระบบ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับการควบคุมวงจร แปลงผันแบบบัก เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็ว ส่งผลทำให้ระบบ เข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ไวและมีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่ต่ำ นอกจากนี้ยังมีความคงทนที่ทำให้ ยังคงสมรรถนะการควบคุมได้แม้จะมีสัญญาณจากภายนอกมารบกวนหรือค่าพารามิเตอร์ของระบบ เกิดการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุม ไม่ว่าจะเป็นตัวควบคุมโหมด การเลื่อนหรือตัวควบคุมอื่น ๆ ล้วนมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่มีลักษณะ เป็นตัวต้านทานติดลบต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อนำโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ผ่านวงจรกรอง ค่าความต้านทานที่เป็นลบของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวจะไปลดทอนค่าความหน่วง ของวงจรกรองซึ่งปกติจะมีค่าเป็นบวก จึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าที่ วงจรกรองเกิดการสั่นไหวและเมื่อโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น หมายความว่าจะมีลักษณะ เป็นค่าความต้านทานที่ติดลบเพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่วงจรกรองเกิด

การสั้นไกวเพิ่มขึ้น จนกระทั่งไม่สามารถเข้าสู่จุดสมดุลได้ กล่าวคือ ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพโดยการขาดเสถียรภาพอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังหรือส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ นอกจากนี้แล้ว โหลดดังกล่าวยังส่งผลทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อคาดเดาปริมาณของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่จะส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพสำหรับหลักการทำงานของระบบที่จุดดังกล่าว โดยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้อาศัยใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์สวิตช์ภายในวงจรส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบจำลองที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนหากนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงนำเสนอการพิสูจน์หาแบบจำลองที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยอาศัยทฤษฎีการแปลงแกนตติวด้วยวิธีการแปลงของพาร์คมผสมผสานกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป โดยเริ่มต้นจากการพิสูจน์หาแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่ไม่มีตัวควบคุม พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ซึ่งพบว่า ผลตอบสนองของระบบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องและตรงกัน จึงสามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง สามารถพัฒนาเพื่อต่อยอดเป็นแบบจำลองของระบบในกรณีที่มิตัวควบคุมเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพได้ จากนั้นจึงดำเนินการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในกรณีที่มีการควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ได้แล้วจะพบว่าเป็นแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งไม่สามารถนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงได้ งานวิจัยวิทยานิพนธ์จึงใช้อนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งมาทำการประมาณความไม่เป็นเชิงเส้นในแบบจำลองให้เป็นเชิงเส้น โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในปริมาณเพียงเล็กน้อยรอบจุดปฏิบัติงานของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งทำให้แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กที่มีค่าขึ้นอยู่กับจุดปฏิบัติงานของระบบที่อยู่ในรูปของเมทริกซ์จาโคเบียน จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ พบว่า แบบจำลองดังกล่าวให้ผลตอบสนองเชิงพลวัตที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาที่พิสูจน์ขึ้นมีความถูกต้อง แม่นยำ และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพและสร้างเสถียรภาพให้กับระบบได้ โดยรายละเอียดการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและผลการตรวจสอบความถูกต้องได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 3

สำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณางานวิจัยวิทยานิพนธ์เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพเพื่อคาดเดาปริมาณของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลทำให้ระบบเกิดการขาดเสถียรภาพ โดยอาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงแล้วพิจารณาไปที่ค่าเจาะจงเด่นของระบบ เนื่องจากค่าเจาะจงดังกล่าวมีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบมากที่สุด และการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP

รุ่น eZdsp™ F28335 โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปและยืนยันได้ว่าระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพอันเนื่องมาจากผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว และจุดการขาดเสถียรภาพจะเกิดขึ้นก่อนค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพที่นำเสนอสามารถคาดเดาจุดการขาดเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องแม่นยำ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลกระทบต่อนิยามของระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรอง โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของวงจรกรองเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองถึงแม้ว่าจะทำให้กระแสฟลักซ์มีค่าลดลง แต่กลับส่งผลทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ลดลงด้วย ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองโดยมีการคำนึงถึงผลการกระทบต่อนิยามของระบบโดยรวมด้วย โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์เสถียรภาพและการตรวจสอบความถูกต้องได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 4

การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณามีวัตถุประสงค์เพื่อให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อได้จนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัด ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์เลือกใช้วิธีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวควบคุมแบบฟuzzy logic เนื่องจากเป็นวิธีการที่อาศัยการแก้ไขหรือตัดแปลงระบบควบคุมโดยไม่มีการเพิ่มอุปกรณ์พาสซีฟเข้าไปในระบบ ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อขนาด น้ำหนักและกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ การสร้างเสถียรภาพจะเริ่มต้นด้วยการนำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของตัวควบคุมแบบฟuzzy logic จากนั้นจะเป็นการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพ ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะถูกใช้เพื่อการออกแบบค่าอัตราขยาย K_f ที่อาศัยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง แล้วเลือกใช้ค่าอัตราขยาย K_f ที่น้อยและเพียงพอต่อการสร้างเสถียรภาพ ณ จุดการขาดเสถียรภาพและที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า โดยผลการยืนยันของการสร้างเสถียรภาพผ่านการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป มีความสอดคล้องและตรงกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีซึ่งแสดงให้เห็นว่าการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการที่นำเสนอสามารถกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว ซึ่งนอกจากจะทำให้ระบบไม่เกิดการขาดเสถียรภาพแล้ว ยังสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดการทำงานจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบได้อีกด้วย โดยรายละเอียดการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาได้รับการเสนอไว้ในบทที่ 5

การสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับใช้ในการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพ เพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับองค์ความรู้และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ระบบผลิตไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสสมดุล วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์และวงจรกรอง และวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งวงจรแปลงผันแบบบักจะได้รับการออกแบบให้สามารถทำงานได้จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้ยังได้มีการทดสอบระบบควบคุมของชุดทดสอบ โดยจากผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่า ชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการสามารถให้ผลการตอบสนองที่ถูกต้องและเป็นไปตามค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่กำหนดได้ไว้ ดังนั้นชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพและ

การสร้างเสถียรภาพได้ โดยรายละเอียดการสร้างชุดทดสอบสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา พร้อมทั้งการทดสอบระบบได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 6

การทดสอบเสถียรภาพของชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับการยืนยันผลการศึกษาวิจัยทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ที่ประกอบด้วย การวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพ ซึ่งทั้งผลจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ผลการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป และผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่มีความสอดคล้องและตรงกัน ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่า องค์ความรู้และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า สามารถทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดงานการทำงานภายใต้เงื่อนไขกำลังไฟฟ้าพิกัดของระบบ ซึ่งอาจต่อยอดพัฒนาและประยุกต์ใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในอนาคตได้ โดยรายละเอียดการทดสอบเสถียรภาพของชุดทดสอบได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 7

8.2 สรุปจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน เพื่อทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อไปจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า โดยได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นมาช่วยในการออกแบบค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า (K_f) ซึ่งวิธีการที่นำเสนอ ยังไม่มีการประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา อีกทั้งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ยืนยันผลของเสถียรภาพด้วยชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่า วิธีการสร้างเสถียรภาพที่นำเสนอสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

8.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1) ผลการสร้างเสถียรภาพที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป และผลจากการทดสอบจริงพบว่าค่าอัตราขยาย K_f ที่เพิ่มมากขึ้น แม้จะสามารถสร้างเสถียรภาพให้กับระบบได้ แต่สมรรถนะการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัสจะลดลง เนื่องจากการดัดแปลงตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ดังนั้นสำหรับงานในอนาคตควรนำเอาวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาช่วยในการออกแบบค่าอัตราขยาย K_f ที่นอกจากจะต้องสามารถเสถียรภาพให้กับระบบได้แล้ว ผลการตอบสนองของระบบภายหลังการสร้างเสถียรภาพจะต้องมีสมรรถนะที่ดีด้วย

2) ค่าอัตราขยาย K_f เท่ากับ 0.2 เป็นค่าที่น้อยและเพียงพอที่สามารถสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดของระบบได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าอัตราขยาย K_f ดังกล่าว บางครั้งอาจมีค่ามากเกินไปสำหรับกำลังไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบัสบางค่า ซึ่งค่าอัตราขยาย K_f ที่มากเกินไปนี้จะส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัสได้ หรือในกรณีค่า K_f ที่น้อยเกินไปไม่สามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่พิกัดได้

ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตควรใช้การสร้างเสถียรภาพเชิงปรับตัวเพื่อคำนวณหาค่า K_f ที่เหมาะสมและแปรเปลี่ยนไปตามค่าของกำลังไฟฟ้าขาออกของวงจรแปลงผันแบบบักได้ เพื่อให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าโดยไม่ส่งผลต่อสมรรถนะการควบคุมของวงจรแปลงผันแบบบัก

3) วิธีการสร้างเสถียรภาพที่นำเสนอด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้านั้นเป็นการดำเนินการทางด้านโหลด แม้จะสามารถสร้างเสถียรภาพให้กับระบบได้ แต่มีข้อเสียคืออาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการควบคุมของโหลด ซึ่งทำให้สมรรถนะโดยรวมของโหลดลดลง ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตควรให้ความสำคัญกับการออกแบบค่าอัตราขยาย K_f ที่ไม่เพียงแค่พิจารณาในแง่ของเสถียรภาพเท่านั้น แต่ยังคงคำนึงถึงความไวของตำแหน่งโพล (pole sensitivity) เพื่อให้ได้ค่าอัตราขยาย K_f ที่การควบคุมของโหลดจะต้องมีสมรรถนะที่ดีด้วย