

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในยุคที่เทคโนโลยีและนวัตกรรมทางวิศวกรรมไฟฟ้าได้พัฒนาขึ้นอย่างก้าวกระโดด วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีการควบคุม (controlled power electronics) โดยเฉพาะ วงจรแปลงผันกำลัง (power converter) ไม่ว่าจะเป็น วงจรแปลงผันเอซีเป็นดีซี ดีซีเป็นเอซี เอซีเป็นเอซี และดีซีเป็นดีซี ได้กลายมาเป็นหัวใจสำคัญของระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ เช่น ระบบไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า (electric vehicles : EVs) เครื่องบินพาณิชย์ (commercial aircrafts : CAs) และรถไฟไฟฟ้า (electric trains : ETs) เป็นต้น ซึ่งวงจรแปลงผันกำลังจะมีหน้าที่ในการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย ไม่ว่าจะเป็นแบตเตอรี่ (battery) หรือแหล่งจ่ายอื่น ๆ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อโหลดต่าง ๆ ภายในระบบ รวมถึงการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าในระบบที่ใช้สำหรับการขับเคลื่อน สำหรับควบคุมการเร่ง เบรก และรักษาความเร็วให้ได้ตามต้องการ (F. A. Khera, C. Gerada, S. Bozhko and P. W. Wheeler, 2022; A. Chub, G. Buticchi, V. Sidorov and D. Vinnikov, 2022; Y. Zhu, X. Yan, Z. Wang, T. Yang, S. Bozhko and P. Wheeler, 2022; C. M, 2023; R. Carmona, A. Stowhas-Villa, C. A. Rojas, H. Renaudineau and J. Marin, 2023; S. Sahoo, K. Selvam, H. Dhiman and K. Shah, 2023; B. Luckett and J. He, 2023; F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, R. A. Hakimov, I. I. Yamalov and R. R. Urazbakhtin, 2023; S. Deng, T. Lei, R. Li, H. Yu, X. Zhang and X. Zhang, 2024; K. P and S. Prakash, 2024; อภิชัย สุยะพันธ์, 2564) นอกจากนี้วงจรแปลงผันกำลังยังเป็นส่วนที่สำคัญต่อการผลิตและใช้พลังงานทดแทน (renewable energy) ไม่ว่าจะเป็นพลังงานแสงแดด พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น โดยพลังงานเหล่านี้กำลังได้รับความสนใจจากทุกมุมโลก เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกอันเป็นสาเหตุของการเกิดสภาวะโลกร้อน (K. Mohammad, M. Amir, M. F. Rashid, A. Rahman and M. Ahmad, 2022; A. Guercio and D. Curto, 2022; A. K. S. N., S. S. P. and R. Mahalakshmi, 2022; K. L. Lijin, S. Sheik Mohammed, P. P. Muhammed Shanir and L. K. Haw, 2022; S. R. Korada, R. Brinda and I. D. Soubache, 2023; K. Saravanan and A. Ramaswamy, 2023; L. K. P. Alquiza, K. H. A. Recto, P. J. M. Loresco and J. Villalobos, 2023; N. Ahmed, M. T. Imran, Q. R. Hasnaine and S. Mahmud, 2023; F. Alsokhiry, 2024; Anita, J. Meher and K. Roy, 2024) ตัวอย่างหนึ่ง ที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของวงจรแปลงผันกำลังในระบบผลิตและใช้พลังงานทดแทน คือ การผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม โดยกังหันลมนั้นจะผลิตไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ซึ่งจำเป็นต้องใช้ วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นจะ

ใช้วงจรแปลงผันแบบบัคเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าและ/หรือกระแสไฟฟ้าและ/หรือกำลังไฟฟ้าให้สอดคล้องต่อความต้องการของโหลดหรือแหล่งกักเก็บพลังงาน (N. Kumari, M. A. Kalam and V. Modi, 2022; A. Zentani, A. Almaktoof, M. T. E. Kahn and M. K. Elmezughi, 2022; X. Yuan, Y. Zhang and X. Peng, 2022; Y. Wang, Z. Fang, B. Zhang, Aisikaer, H. Lv and L. Song, 2023; I. -H. Chung, M. -J. Zhang and C. -P. Chu, 2024) จากระบบต่าง ๆ ที่ได้ยกตัวอย่างมานั้นส่วนใหญ่จะใช้วงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI Controller) ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวเป็นตัวควบคุมที่สามารถออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้ง่ายเนื่องจากมีวิธีการทั่วไปในการออกแบบ ยกตัวอย่างเช่น การออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบต่อเรียง (cascade PI controller) ที่มีลูปการควบคุมกระแสไฟฟ้าเป็นลูปภายในและมีลูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเป็นลูปภายนอก จะใช้การออกแบบโดยการหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดและเทียบสัมประสิทธิ์กับฟังก์ชันถ่ายโอนแบบมาตรฐานของระบบอันดับสอง ซึ่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ออกแบบได้สามารถลดความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (steady state error) และให้ผลตอบสนองของระบบที่แม่นยำ (J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K. Chaicharoenudomrung, 2021; J. Pakdeeto, A. Thanommuang, K. Chaicharoenudomrung, K. Areerak and K. Areerak, 2021; J. Pakdeeto, A. Thanommuang and K. Areerak, 2024; P. Santiprapan, K. Areerak and K. Areerak, 2024; รัฐพล โพธิ์สังข์, 2563; อลิสา ถนอมเมือง, 2565) แต่ตัวควบคุมพีไอมีข้อเสียคือ ในบางครั้งเมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ตัวควบคุมดังกล่าวอาจให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัต (dynamic response) ที่ไม่ดีนัก อีกทั้งยังไม่มีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนหรือความแปรปรวนของพารามิเตอร์ภายในระบบอีกด้วย (M. Ahmed, M. Kuisma, and P. Silventoinen, 2004; Marouane El Azzaoui, Hassane Mahmoudi, Chafik Ed-dahmani, and Karima Boudaraia, 2016; Udaya Bhasker Manthathi, K M Annu, and Srinivas Punna, 2019; Soumya Mohanty, Abhijeet Choudhury, Swagat Pati, Sanjeeb Kumar Kar, and Subhendu Khatua, 2021; S. Mohanty, A. Choudhury, S. Pati, S. K.Kar and S. Khatua, 2021; G. Ramesh and V. R. Babu, 2022; S. Kalson and S. R. Kar, 2022; K. Gaurav, D. Joshi and S. Upadhyaya, 2023) ซึ่งจากงานวิจัยตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาและพัฒนาาระบบควบคุมอย่างต่อเนื่อง พบว่าตัวควบคุมที่น่าสนใจ คือ ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (Sliding Mode Controller : SMC) เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ให้ผลการตอบสนองเชิงพลวัตที่รวดเร็วส่งผลทำให้ระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ไวและมีความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวที่ต่ำ นอกจากนี้ยังมีความคงทน (robustness) ที่ทำให้ยังคงสมรรถนะการควบคุมได้แม้จะมีสัญญาณภายนอกมารบกวนหรือพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง (M. Ahmed, M. Kuisma, and P. Silventoinen, 2004; El Azzaoui, M., Mahmoudi, H., Ed-dahmani, C., and Boudaraia, K. 2016; Manthathi, U. B., Annu, K. M., and Punna, S. 2019; P. Joshi and S. Seshagiri, 2020; Mohanty, S., Choudhury, A., Pati, S., Kar, S. K., and Khatua, S. 2021; I. -C. Mituletu, D. Anghel, L. Ardeljan and M. Magda, 2021; N. Setthawong, K. Areerak, P. Santiprapan, C. Panpean and K. Areerak, 2022; Lesniewski, P.; Jaskuła, M., 2023; อภิชัย สุยะพันธ์, สุรบดินทร์ แดงดอน, กองพันธ์ อารีรักษ์, 2567) อย่างไรก็ตามวงจรแปลงผันกำลังที่มีการควบคุม

ไม่ว่าจะใช้ตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมโมเมนต์การเลื่อน หรือตัวควบคุมแบบอื่น ๆ ล้วนมีพฤติกรรมเปรียบเสมือนโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัว (Constant Power Loads : CPLs) ที่มีลักษณะเป็นค่าความต้านทานติดลบ (negative impedance) ต่อระบบโดยรวม ซึ่งเมื่อนำโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวมาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านวงจรกรองแล้ว ค่าความต้านทานที่เป็นลบของโหลดดังกล่าวจะไปลดทอนค่าความหน่วงของวงจรกรอง จนกระทั่งทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดการขาดเสถียรภาพขึ้น โดยการขาดเสถียรภาพของระบบอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังหรือส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมได้ และนอกจากจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบแล้ว โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวยังส่งผลให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearities) อีกด้วย (He, B., Chen, W., Li, X., Shu, L., and Ruan, X., 2022; Sun, Y., Yan, S., Xu, G., Deng, G., and Su, M., 2022; Tu, H., Yu, H., and Lukic, S., 2023; Vafamand, N., Shafie-Khah, M., Aref, M. M., and Catalao, J. P. S., 2023; Narm, H. G., Eren, S., and Karimi-Ghartemani, M., 2023; Abdollahi, M., Adabi, J., and Mousavi, S. Y. M., 2024;) ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโมเมนต์การเลื่อน ซึ่งวงจรแปลงผันแบบบักดังกล่าวจะมีพฤติกรรมเป็นโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยตรง การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะเริ่มต้นจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นโดยอาศัยทฤษฎีบทค่าเจาะจง (eigenvalue theorem) เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย ให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง (Areerak K-N., Bozhko S.V., Asher G.M., Lillo L.D. and Thomas D.W.P., 2009; R. Matousek, I. Svare, P. Pivonka, P. Osmera, and M. Seda, 2009; T. Sopapirm, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2011; K. Chaijarunudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak, 2011; อภิชัย สุยะพันธ์, 2558; รัฐพล โพธิ์สังข์, 2563; อลิสา ถนอมเมือง, 2565) เพื่อคาดเดาปริมาณกำลังไฟฟ้าของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่จะส่งผลให้ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเกิดการขาดเสถียรภาพ จากนั้นจะดำเนินการสร้างเสถียรภาพโดยใช้วิธีการหวนแบบแอกทีฟทางด้านโหลดด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า (feedforward loop) เนื่องจากวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์แบบพาสซีฟเข้าไปภายในระบบไฟฟ้า จึงทำให้ไม่เกิดกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นในระบบ อีกทั้งยังสามารถชดเชยหรือกำจัดผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวได้โดยตรงอีกด้วย (Wu, M. and Lu, D.D.C. 2015; Phosung, R., Areerak, K-L., Sopapirm, T., & Areerak, K-N. 2022.) ซึ่งการสร้างเสถียรภาพด้วยวิธีการที่นำเสนอจะสามารถทำให้ระบบไฟฟ้าที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและสามารถทำงานต่อได้อย่างมีเสถียรภาพจนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ โดยการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเสถียรภาพในทางทฤษฎีของระบบทั้งหมดจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิสูจน์ได้จากวิธีการดีควและวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไปสำหรับการตรวจสอบและยืนยันผลของเสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware in the Loop : HIL) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdspTM F28335 และผลจากชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นการยืนยันว่าวิธีการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษา คำนวณ และสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.2.2 เพื่อศึกษาและพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง สามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบได้

1.2.3 เพื่อศึกษาและคำนวณองค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1.2.4 เพื่อศึกษาวิธีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปย้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดิซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1.2.5 เพื่อศึกษาและดำเนินการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับใช้ยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพของระบบ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1.3.2 การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะใช้วิธีคิดร่วมกับวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป

1.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วย SimPowerSystem™ บน SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

1.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพจะทำการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูปบนโปรแกรม MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdsp™ F28335 และผลจากชุดทดสอบจริงที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

1.3.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง และวิธีการดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูปย้อนไปหน้า (K_f) สำหรับการสร้างเสถียรภาพของระบบด้วยเช่นกัน

1.3.6 การสร้างเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักจะเป็นวิธีการสร้างเสถียรภาพทางด้านโหลดที่อาศัยตัวชดเชยลูปย้อนไปหน้า

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะการสร้างเสถียรภาพที่ไม่มีการปรับตัวของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1.4.2 การสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาจะดำเนินการทางด้านโหลดและพิจารณาภายใต้เงื่อนไขที่กำลังไฟฟ้าพิกัด 360 W เท่านั้น

1.4.3 การทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าในระบบจะพิจารณาในย่านโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง (continuous conduction mode: CCM) เท่านั้น

1.4.4 การทำให้เป็นเชิงเส้นจะอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์อันดับหนึ่งเท่านั้น

1.4.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจงเท่านั้น

1.4.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ในขณะที่การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพจะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป และผลจากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

1.5 สมมติฐานของการวิจัย

การสร้างเสถียรภาพที่อาศัยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบัคที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน สามารถทำให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและทำงานต่อได้จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ ซึ่งสามารถยืนยันผลของเสถียรภาพได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ การจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูปและการสร้างชุดทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ

1.6 จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน เพื่อให้ระบบที่ขาดเสถียรภาพกลับมามีเสถียรภาพและทำงานต่อได้จนถึงค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า ด้วยการอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พิสูจน์ขึ้นมาช่วยในการออกแบบค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้า (K_p) ซึ่งวิธีการที่นำเสนอยังไม่มีมีการประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา อีกทั้งงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้ยืนยันผลของเสถียรภาพด้วยชุดทดสอบจริงที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่าวิธีการสร้างเสถียรภาพที่นำเสนอสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับผลของโหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.7.2 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้อง สามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของระบบได้

1.7.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบบริดจ์ที่มีโหลดเป็นวงจรแปลงผันแบบบักที่มีการควบคุมแรงดันขาออกด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1.7.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูปป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังเอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

1.7.5 ได้ชุดทดสอบของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับใช้ยืนยันผลการสร้างเสถียรภาพของระบบ

1.8 การจัดรูปแบบรายงานวิจัยวิทยานิพนธ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย 8 บท โดยในแต่ละบทได้นำเสนอรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตงาน เบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย สมมติฐานการวิจัย จุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 นำเสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โหลดกำลังไฟฟ้าคงตัวที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง พร้อมทั้งการสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมเพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาทั้งในกรณีที่ไม่มี การควบคุม และในกรณีที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมโหมดการเลื่อนด้วยวิธีการผสมผสานกันระหว่างวิธีดีคิว และวิธีค่าเฉลี่ยปริภูมิสถานะทั่วไป พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่พิสูจน์ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ อีกทั้งการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับวงจรแปลงผันแบบบักก็ได้รับการนำเสนอไว้ในส่วนที่เหมาะสมของบทที่ 3 นี้ด้วยเช่นกัน

บทที่ 4 นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณา โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบเชิงเส้นด้วยทฤษฎีบทค่าเจาะจง พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในรูป

บทที่ 5 นำเสนอการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูป้อนไปหน้าสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง เอซีเป็นดีซีที่มีตัวควบคุมโหมดการเลื่อน พร้อมทั้งนำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องของการสร้างเสถียรภาพที่ได้ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ และการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์ในลูป โดยเนื้อหาของบทจะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูป้อนไปหน้า และการพิสูจน์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าเมื่อมีการสร้างเสถียรภาพด้วยตัวชดเชยลูป้อนไปหน้า พร้อมทั้งการออกแบบค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูป้อนไปหน้าด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ทฤษฎีบทค่าเจาะจงผ่านแบบจำลองที่ได้พิสูจน์ขึ้น เพื่อให้ได้ค่าอัตราขยายของตัวชดเชยลูป้อนไปหน้าที่น้อยและเพียงพอสำหรับการสร้างเสถียรภาพที่จุดการขาดเสถียรภาพ และที่จุดการขาดเสถียรภาพจนถึงค่ากำลังไฟฟ้าปกติของระบบซึ่งเป็นจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 6 นำเสนอการสร้างชุดทดสอบของระบบไฟฟ้ากำลังที่พิจารณาสำหรับใช้ยืนยันผลการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพ โดยเนื้อหาจะกล่าวถึงรายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ ของการสร้างชุดทดสอบ รวมถึงนำเสนอผลการทดสอบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนสำหรับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

บทที่ 7 นำเสนอผลการทดสอบการขาดเสถียรภาพและการสร้างเสถียรภาพจากชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือและแสดงให้เห็นว่า องค์ความรู้ และวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์สามารถนำไปใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

บทที่ 8 นำเสนอการสรุปผล สรุปจุดเด่นของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ภาคผนวกในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีทั้งหมด 5 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก. แสดงรายการบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา ภาคผนวก ข. แสดงรายละเอียดโปรแกรมการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการคำนวณมุมการเลื่อนเฟสระหว่างบัสแหล่งจ่ายและบัสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ภาคผนวก ค. แสดงรายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SINULINK บนโปรแกรม MATLAB ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ภาคผนวก ง. แสดงรายละเอียดโปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์แบบฮาร์ดแวร์คิโนลูปด้วยโปรแกรม MATLAB ร่วมกับบอร์ด DSP รุ่น eZdspTM F28335 และภาคผนวก จ. แสดงรายละเอียดโปรแกรมการสร้างเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาด้วยตัวชดเชยลูป้อนไปหน้าในบอร์ด DSP รุ่น eZdspTM F28335 สำหรับชุดทดสอบที่ได้สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ