บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาการตัวควบคุม การตรวจจับความผิดพร่อง การระบุตำแหน่งความผิดพร่อง และสร้างความคงทนต่อความผิดพร่อง สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น ทั้งนี้จะอาศัยกระบวนการทางฟัซซีในการควบคุม และการตรวจจับความผิดพร่อง โดยเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการสำรวจค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง โดยจากการศึกษาค้นคว้าสามารถแบ่งงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องได้ 3 หัวข้อ ได้แก่ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูง ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้น และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

เพื่อศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ พบว่ามีงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 โดยเป็นการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่มีอัตราขยายแรงดันสูงในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในอดีต

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูง

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2010	D. Cao, and F. Zheng Peng	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าหลายระดับ โดยอาศัยเทคนิคกึ่งเรโซแนนท์ ซึ่งกระบวนการจะมีตัวเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ร่วมกับตัวเก็บประจุภายในวงจร	ทราบถึงการพัฒนาโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลายระดับ โดยอาศัยตัวเหนี่ยวนำเป็นตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ เพื่อแก้ปัญหาการสวิตช์แบบกระแสศูนย์ ลดการพุ่งเกินของกระแส และแรงดัน อีกทั้งยังไม่เพิ่มต้นทุนค่าใช้จ่าย
2012	J.S. Anu Rahavi, T. Kanagapriya, and R. Seyezhai	บทความนี้นำเสนอวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์อินเทอร์ลีฟ (Interleaved boost converter) ที่มีแหล่งพลังงานทดแทนเป็นแหล่งจ่าย	ทราบถึงโครงสร้างวงจร และการออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบอินเทอร์ลีฟสำหรับทบระดับแรงดันที่มีคุณสมบัติของกระเพื่อมของกระแสอินพุตที่ต่ำ
2014	Ye, Y. Eric Cheng, and K. Wai	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบทบระดับแรงดันกำลังสองแบบใหม่เปรียบเทียบกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบทบระดับแรงดันกำลังสองดั้งเดิม	ทราบถึงโครงสร้าง และการออกแบบ ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบทบระดับแรงดันกำลังสองแบบใหม่ อีกทั้งการวิเคราะห์ความเค้นของแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่มีขนาดน้อยกว่า เมื่อเทียบกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบทบระดับแรงดันกำลังสองดั้งเดิม

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูง (ต่อ)

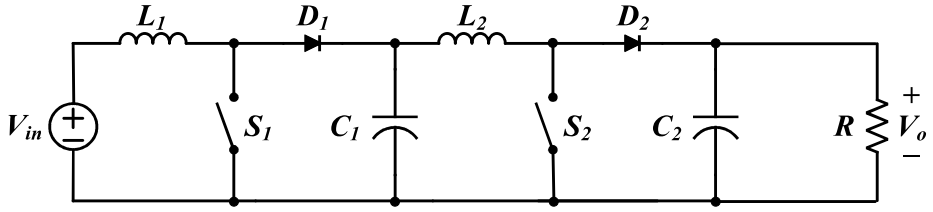
ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2014	M. G. Kashani, M. Mobarrez, and S. Bhattacharya	บทความนี้เสนอการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างการต่ออนุกรม และการต่อขนานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าบูสต์ที่เรียงต่อกับแผงโซล่าเซลล์ โดยอาศัย Variable interleaving technique	ทราบถึงโครงสร้างของการต่ออนุกรมของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าบูสต์ที่เรียงต่อกับแผงโซล่าเซลล์ ที่ให้แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์ภายในวงจรที่ต่ำกว่าการต่อแบบขนาน อีกทั้งยังลดการกระเพื่อมของแรงดัน
2015	F. L. Tofoli, D. de C. Pereira, W. Josias de Paula, and D. de S. Oliveira Júnior	งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม อีกทั้งยังนำเสนอวิธีการต่าง ๆ ในการปรับปรุงประสิทธิภาพและอัตราส่วนการแปลงไฟฟ้า พร้อมทั้งเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธี โดยพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จำนวนอุปกรณ์ที่ใช้และประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าแบบคงที่ นอกจากนี้ยังยกตัวอย่างการใช้งานจริงของวงจรแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเหล่านี้	ทราบถึงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ที่ไม่ต้องแยกโดด เจาะลึกถึงข้อจำกัดของวงจรแบบเดิม และนำเสนอเทคนิคใหม่ในการดึงประสิทธิภาพสูงสุด ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและแปลงกำลังไฟฟ้าได้คุ้มค่ากว่าเดิม ยิ่งไปกว่านั้นยังกล่าวถึงการใช้งานจริงในระบบพลังงานต่าง ๆ เช่น พลังงานทดแทน รถยนต์ไฟฟ้า ระบบสำรองไฟ เป็นต้น อีกทั้งยังจัดอันดับ และเปรียบเทียบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมอุปกรณ์ จำนวนอุปกรณ์ และประสิทธิภาพการแปลงกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2016	M. Forouzesh, Y. P. Siwakoti, S. A. Gorji, F. Blaabjerg, and B. Lehman	บทความนี้นำเสนอการทบทวนที่ครอบคลุมของโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ในแบบต่าง ๆ รวมทั้งเทคนิคการเพิ่มอัตราขยายแรงดัน การเพิ่มประสิทธิภาพของวงจร และเปรียบเทียบคุณสมบัติเด่นของวงจรรูปแบบต่าง ๆ	ทราบถึงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ในแบบต่าง ๆ อีกทั้งยังทราบถึงคุณสมบัติเด่นของแต่ละวงจรในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ระดับพลังงาน ต้นทุน ความน่าเชื่อถือ ประสิทธิภาพ ความหนาแน่นของพลังงาน น้ำหนัก บูรณาการ และความซับซ้อน
2019	R. Kiguchi, and Y. Nishida	บทความนี้นำเสนอโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้น รวมถึงนำเสนอการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียของการนำกระแสไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ภายในวงจร (Conduction loss) ระหว่างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้นกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม	ทราบถึงโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าสูญเสียของการนำกระแสไฟฟ้ากับแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุขั้นที่ 1 และทราบถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียของการนำกระแสไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้นมีขนาดน้อยกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม
2021	A. Balal and F. Shahabi	บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบรูปแบบโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ทั้งสามแบบ ได้แก่ แบบทบระดับแรงดันกำลังสอง, แบบทบระดับแรงดันกำลังสองที่มีตัวตัวเหนี่ยวนำสองตัว และแบบเรียงต่อกันสองขั้น ในด้านการเพิ่มอัตราการขยายแรงดันและประสิทธิผล	ทราบถึงโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์แบบบูสต์ทั้งสามแบบ เพื่อวิเคราะห์เพื่อให้เห็นภาพรวมในการทำงานและความเหมาะสมของวงจรเหล่านี้สำหรับการใช้งานที่มีการเพิ่มแรงดันสูงในระบบไมโครกริด และทราบถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละโครงสร้าง

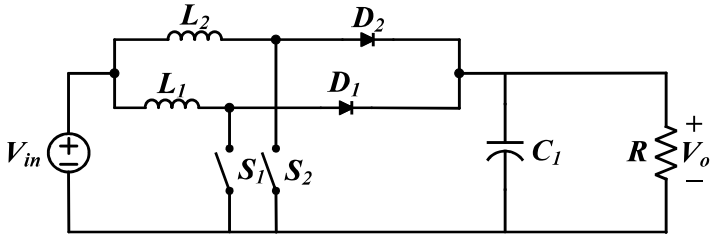
จากการปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูงดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าจากในอดีตมีการพัฒนาโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ เริ่มต้นจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม และนำไปสู่การพัฒนาเทคนิคการเพิ่มอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าหลากหลายรูปแบบ ซึ่งมีรายละเอียดโครงสร้างวงจรแสดงดังต่อไปนี้

1) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้น (Multi–stage cascaded boost converter) เป็นวงจรที่มีการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมมาเรียงต่อกันเป็นขั้น ๆ เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า โดยวงจรมีความเค้นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้นแรกค่อนข้างต่ำ อีกทั้งสามารถลดพลังงานสูญเสียจากการทำงานของสวิตช์ ซึ่งมีโครงสร้างวงจรดังรูปที่ 2.1 (Rahavi et al., 2012)



รูปที่ 2.1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้น

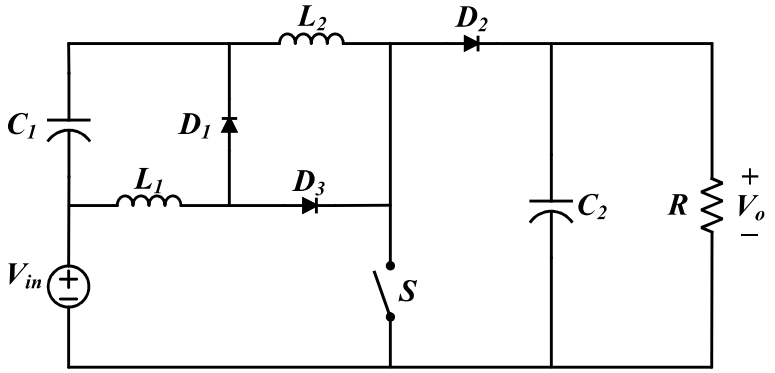
2) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์อินเทอร์ลีฟ (Interleaved boost converter) เป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมมาเชื่อมต่อกันแบบขนาน โดยใช้แหล่งจ่าย ตัวเก็บประจุ และโหลดตัวต้านทาน ร่วมกัน ซึ่งการทำงานของสวิตช์จะมีเฟสที่ต่างกัน เช่น วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์อินเทอร์ลีฟสองเฟส สวิตช์ตัวที่ 1 มีการเฟสต่างกัน 180 องศา กับสวิตช์ตัวที่ 2 เพื่อช่วยลดค่าการกระเพื่อมของกระแสอินพุต และแรงดันเอาต์พุต ซึ่งมีโครงสร้างวงจรดังรูปที่ 2.2 (Rahavi et al., 2012)



รูปที่ 2.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์อินเทอร์ลีฟสองเฟส

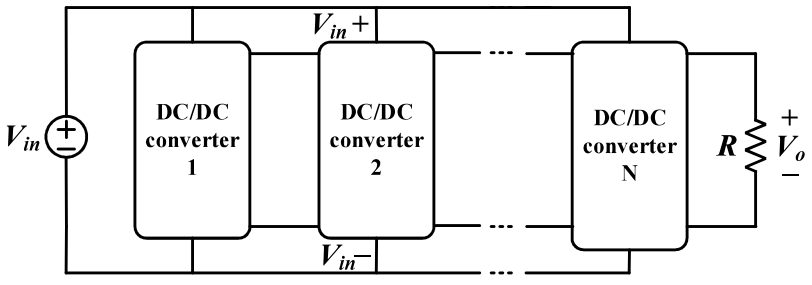
3) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบทบระดับแรงดันกำลังสอง (Quadratic boost converter) เป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิมมาเพิ่มอุปกรณ์ ซึ่งประกอบด้วยไดโอด 3 ตัว ตัว

เหนี่ยวนำ 2 ตัว และตัวเก็บประจุ 1 ตัว ดังโครงสร้างรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถเพิ่มอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าได้มากขึ้น และลดความเค้นของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของวงจรให้ดียิ่งขึ้น (Ye and Eric Cheng, 2014)



รูปที่ 2.3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบทบระดับแรงดันกำลังสอง

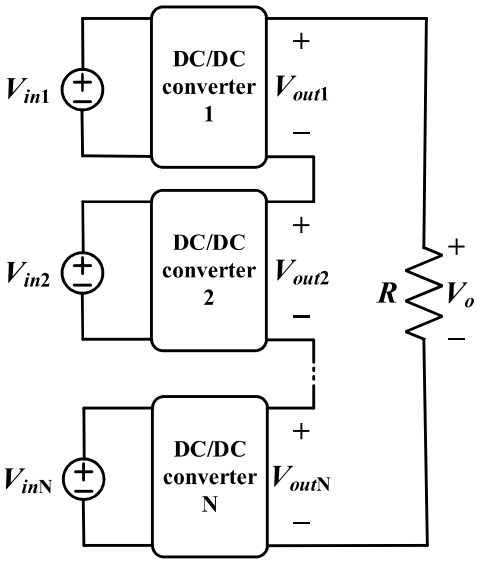
4) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลายระดับที่มีแหล่งจ่ายเดียว (Multilevel modular switched–capacitor circuit with single DC source) เป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มาเรียงต่อขนานกัน โดยใช้แหล่งจ่ายเดียวเท่านั้น ซึ่งจะมีการควบคุมแรงดันที่ขั้วของวงจรย่อยให้มีระดับแรงดันที่เท่ากัน เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแสไฟฟ้า อีกทั้งยังมีตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนท์ เพื่อแก้ปัญหาการสวิตช์แบบกระแสศูนย์ ช่วยลดการพุ่งเกินของกระแสและแรงดัน โดยมีโครงสร้างวงจรดังรูปที่ 2.4 (Cao and Peng, 2010)



รูปที่ 2.4 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลายระดับที่มีแหล่งจ่ายเดียว

5) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลายระดับที่มีหลายแหล่งจ่าย (Multilevel modular switched–capacitor circuit with multiple DC sources) เป็นการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันแบบอนุกรม โดยที่ในแต่ละวงจรมีแรงดันอินพุตแยก เพื่อเพิ่มอัตราขยายแรงดัน

เอาต์พุตจากการต่ออนุกรมของแต่ละวงจรย่อย อย่างไรก็ตามการต่อนี้มีข้อจำกัด หากวงจรย่อยใดวงจรหนึ่งหยุดการทำงานจะส่งผลให้วงจรที่เหลือ ทำงานหนัก หรืออาจไม่สามารถทำงานได้ ซึ่งวงจรดังกล่าวมีโครงสร้างวงจรดังรูปที่ 2.5 (Kashani et al., 2014)



รูปที่ 2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบหลายระดับที่มีหลายแหล่งจ่าย

จากงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้นมีอัตราขยายแรงดันที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม และแบบทบระดับแรงดันกำลังสอง (Balal and Shahabi, 2021) จึงเหมาะสำหรับใช้งานในระบบที่ต้องการอัตราขยายแรงดันที่สูง เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์และระบบเซลล์เชื้อเพลิง ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาการสูญเสียพลังงานที่ค่าความต้านทานสมมูลแบบอนุกรมในระบบกำลังต่ำ (Choudhury and Nayak, 2016) วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้นการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม งานวิจัย (Choudhury and Nayak, 2015) ได้เปรียบเทียบอัตราความเค้นของแรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ พบว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์แบบเรียงต่อกันสองขั้นมีความเค้นของแรงดันที่สวิตช์น้อยกว่าวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์แบบทบระดับแรงดันกำลังสอง

อย่างไรก็ตามการทำงาของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรียงต่อกันหลายขั้นภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ ของวงจร เช่น การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน (Zhang et al., 2017) ความไม่แน่นแนของพารามิเตอร์ การผันแปรของแหล่งจ่ายพลังงานทดแทน (Shoja–Majidabad and Hajizadeh, 2020) ความเค้นของแรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ เสถียรภาพของระบบเนื่องจากการทำงานของ

วงจรย่อยแต่ละขั้นในสภาวะชั่วครู่ (Yang et al., 2009) จำเป็นต้องมีการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมเพื่อให้วงจรสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างมีประสิทธิผลและมีความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร

รายงานวิทยานิพนธ์นี้จะพัฒนาการควบคุมฟัซซี และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น โดยเนื้อหาในส่วนของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น จะมีการนำเสนอในบทที่ 3 ต่อไป

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้น

จากการปริทัศน์วรรณกรรม และเพื่อศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ในรูปแบบต่าง ๆ มีรายละเอียดแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 โดยจะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมในรูปแบบต่าง ๆ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้นดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้น

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2013	R. Haroun, A. El Aroudi, A. Cid–Pastor, and L. Martínez–Salamero	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (Sliding mode controller) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้น เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุต	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยอาศัยเทคนิคการเปรียบเทียบแบบฮิสเทอเรซิส โดยการพิจารณากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 และแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุตัวที่ 2 เป็นอินพุตของตัวควบคุม

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้น (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2015	R Haroun, A. El Aroudi, A. Cid–Pastor, G. Garcia, C. Olalla, and L. Martínez–Salamero	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power point tracking: MPPT) ของแหลงจ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ ร่วมกับตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (Sliding mode controller) กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้น เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตภายใต้การเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายที่มีความแปรผันตามสภาพแวดล้อม	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อน โดยพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้น ความสัมพันธ์ของกราฟเส้นโค้งคุณลักษณะกระแส และแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงสมการการเลื่อน เพื่อให้ได้โหมดการทำงานต่าง ๆ ของสวิตช์สำหรับการควบคุมการทำงานของวงจร
2018	S. Khwan–on, and S. Diewsurin	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอ (PI controller) ร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักกระแส (Current weight technique) เพื่อใช้สำหรับสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น ในการควบคุมแรงดันเอาต์พุตภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดันต่ำ และโหลดตัวต้านทาน	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่ประกอบด้วยลูปแรงดัน และลูปกระแส กระแสอ้างอิงได้จากเอาต์พุตของลูปแรงดัน หลังจากนั้นถูกแบ่งออกเป็นกระแสอ้างอิงสองค่าด้วยเทคนิคการถ่วงน้ำหนัก และเข้าสู่ลูปกระแสจะได้ค่าวัฏจักรหน้าที่สำหรับสวิตช์กำลัง โดยสวิตช์สองตัวแรกจะถูกควบคุมด้วยเอาต์พุตของลูปกระแสที่หนึ่ง ส่วนสวิตช์ตัวที่สามถูกควบคุมด้วยเอาต์พุตของลูปกระแสที่สอง

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้น (ต่อ)

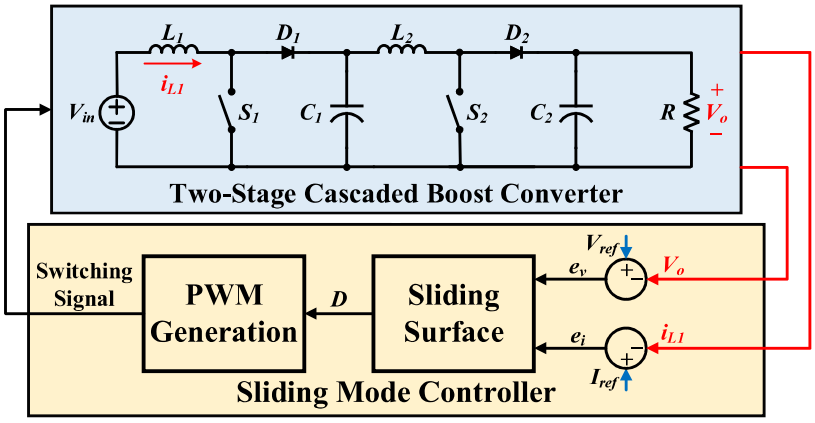
ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2019	M. Moe Lwin	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy controller) โดยใช้แบบจำลองฟัซซีรูปแบบ Takagi–Sugeno สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้น เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุต	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี โดยที่กระบวนการของตัวควบคุมประกอบด้วยสองอินพุตคือผลต่างของแรงดัน และอัตราการเปลี่ยนแปลงผลต่างของแรงดัน ส่วนเอาต์พุตเป็นค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์สำหรับสวิตช์ทั้งสองตัว
2020	S. Shoja–Majidabad, and A. Hajizadeh	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมรวมศูนย์แบบโครงข่ายปรับตัว โดยพิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้น เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดัน และโหลดตัวต้านทาน	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมรวมศูนย์แบบโครงข่ายปรับตัวได้ที่ประกอบด้วยลูปแรงดันที่ได้เอาต์พุตเป็นกระแสอ้างอิง และลูปกระแสที่ได้เอาต์พุตเป็นค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ โดยที่สวิตช์สองตัวนั้นจะใช้ตัวควบคุมแยกกันเพื่อควบคุมแรงดันและกระแสในแต่ละขั้น อีกทั้งทราบการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยใช้ฟังก์ชันเลียปูนอฟ
2020	B M. Alharbi, M. A. Alhomim, and R. A. McCann	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน (Robust controller) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้น เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดัน และโหลดตัวต้านทาน	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน โดยอาศัยเทคนิคเอชอนันต์ (H–infinity technique) ซึ่งพิจารณาจากอสมการเชิงเส้นเมทริกซ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้น

ตารางที่ 2.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้น (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2020	N. Kunjittipong, K. Kongkanjana, and S. Khwan–on	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy controller) สำหรับวงจรทบระดับแรงดันที่มีอัตราขยายแรงดันสูง เพื่อแรงดันเอาต์พุต อีกทั้งยังการเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอ (PI controller) ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแหล่งจ่ายแรงดัน แรงดันอ้างอิง และโหลดตัวต้านทาน	ทราบถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีที่มีสองอินพุต ประกอบด้วยผลต่างของแรงดันเอาต์พุต และกระแสอ้างอิงที่เกิดจากปริพันธ์ของผลต่างของแรงดันเอาต์พุต และได้เอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีเป็นผลต่างของค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ในขั้นถัดไป

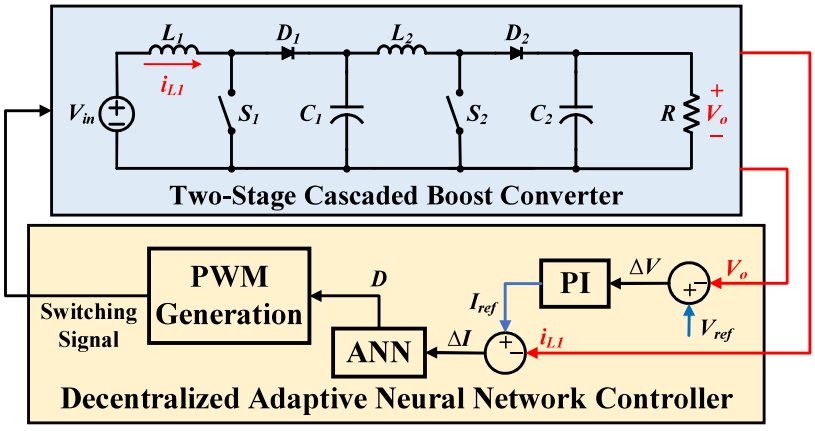
จากปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้น จะเห็นได้ว่าในอดีตได้มีการพัฒนาวิธีการ และแนวทางการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรหลากหลายวิธี โดยส่วนใหญ่จะอาศัยการตรวจวัดค่าแรงดันเอาต์พุต และการตรวจวัดค่ากระแสอินพุต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้นให้สามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามความต้องการ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของแหล่งจ่ายแรงดัน แรงดันเอาต์พุตอ้างอิง และโหลดตัวต้านทาน ซึ่งมีรายละเอียดแสดงได้ดังนี้

1) ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (Sliding mode controller) การควบคุมนี้มีแหล่งจ่ายแรงดันเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการควบคุมโหมดการเลื่อนนี้ทำงานร่วมกับวิธีการตามรอยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power point tracking: MPPT) โดยในการออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนจะพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ของกราฟพื้นผิวการเลื่อน (Sliding surface) ในโหมดการทำงานต่าง ๆ ของสวิตช์สำหรับการควบคุมการทำงานของวงจร ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างวงจรดังรูปที่ 2.6 (Haroun et al., 2013)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างตัวควบคุมโหมดการเลื่อน

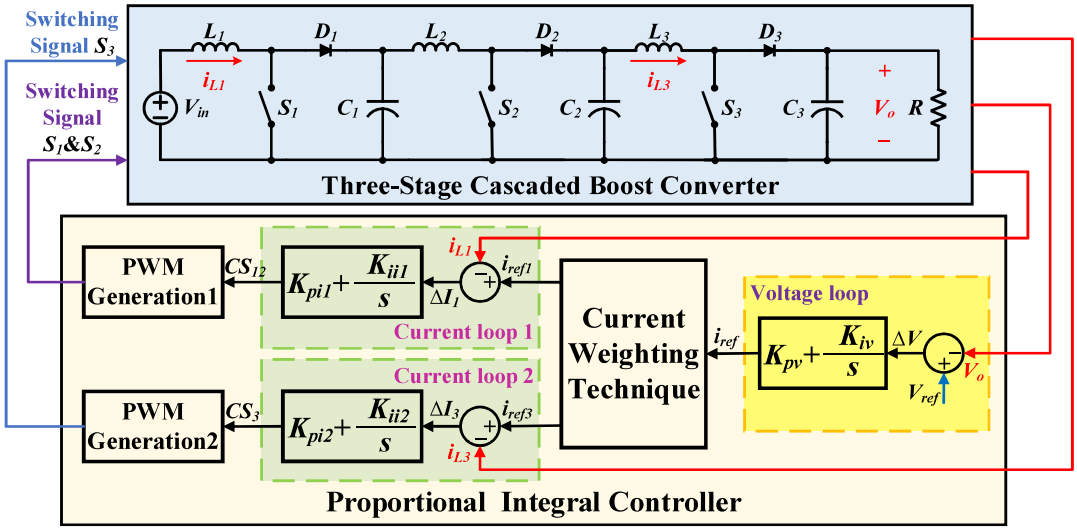
2) ตัวควบคุมรวมศูนย์แบบโครงข่ายปรับตัวได้ (Decentralized adaptive neural network controller) ในการออกแบบตัวควบคุมรวมศูนย์แบบโครงข่ายปรับตัวได้จะพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้น เพื่อใช้ออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ หลังจากนั้นเอาต์พุตที่ได้จากการควบคุมพีไอจะเข้าสู่กระบวนการรวมศูนย์แบบโครงข่ายปรับตัวได้ เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 (Shoja–Majidabad and Hajizadeh, 2020)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างตัวควบคุมรวมศูนย์แบบโครงข่ายปรับตัวได้

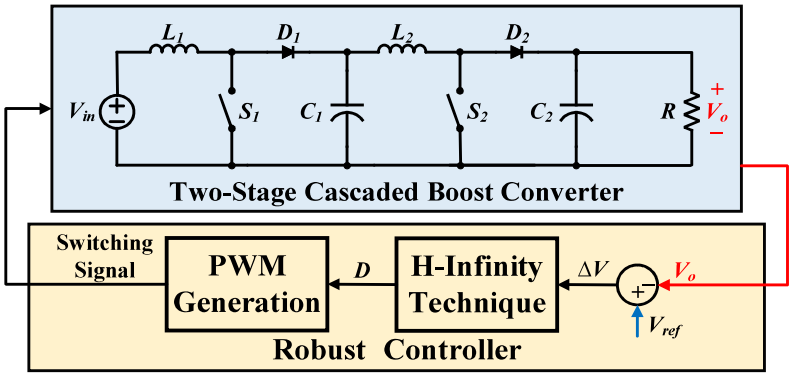
3) ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) การควบคุมนี้เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างการควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control) และการควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control) เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าตามต้องการ ซึ่งกระบวนการเริ่มจากการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของระบบมา

เปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง จะได้ผลต่างของแรงดันเข้าสู่ส่วนของลูปแรงดันของตัวควบคุมพีไอ และได้เอาต์พุตเป็นกระแสอ้างอิง หลังจากนั้นกระแสอ้างอิงถูกแบ่งออกเป็นกระแสอ้างอิงสองค่า โดยอาศัยเทคนิคการถ่วงน้ำหนัก เพื่อปรับคูณค่ากระแสอ้างอิงให้เหมาะกับพิกัดกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 และ 3 ในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น หลังจากนั้นกระแสอ้างอิงทั้งสองจะเข้าสู่ลูปกระแสเพื่อได้สองสัญญาณการควบคุมเป็นเอาต์พุต ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณการควบคุมสวิตช์สองตัวแรก (CS_{12}) ที่ถูกควบคุมด้วยลูปกระแสที่ 1 และสัญญาณการควบคุมสวิตช์ตัวที่ 3 (CS_3) ที่ถูกควบคุมด้วยลูปกระแสที่ 2 ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.8 (Khwan–on and Diewsurin, 2018) วิธีการควบคุมพีไอนี้จะใช้ตัวตรวจจับกระแสสำหรับวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวแรก และตัวสุดท้ายเท่านั้น



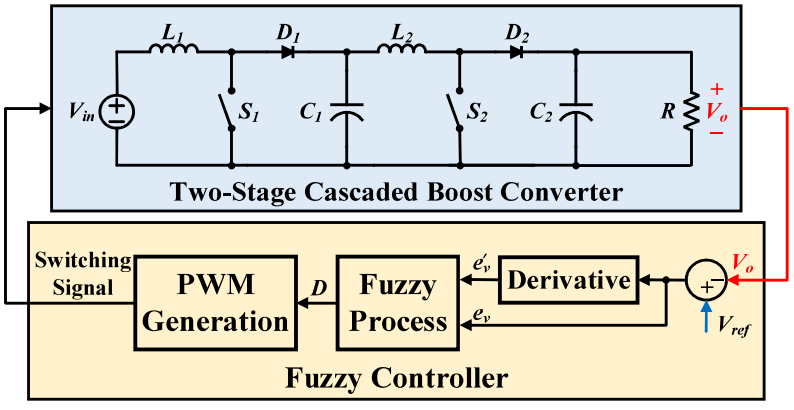
รูปที่ 2.8 โครงสร้างตัวควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนัก

4) ตัวควบคุมแบบคงทน (Robust controller) การออกแบบตัวควบคุมนี้จะอาศัยเทคนิคเอชอนันต์ (H–infinity technique) โดยอ้างอิงจากอสมการเชิงเส้นเมทริกซ์ (Linear matrix inequality) ที่พิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้น เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ทั้งสองให้เหมาะสมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างวงจรดังรูปที่ 2.9 (Alharbi et al., 2020)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างตัวควบคุมแบบคงทน

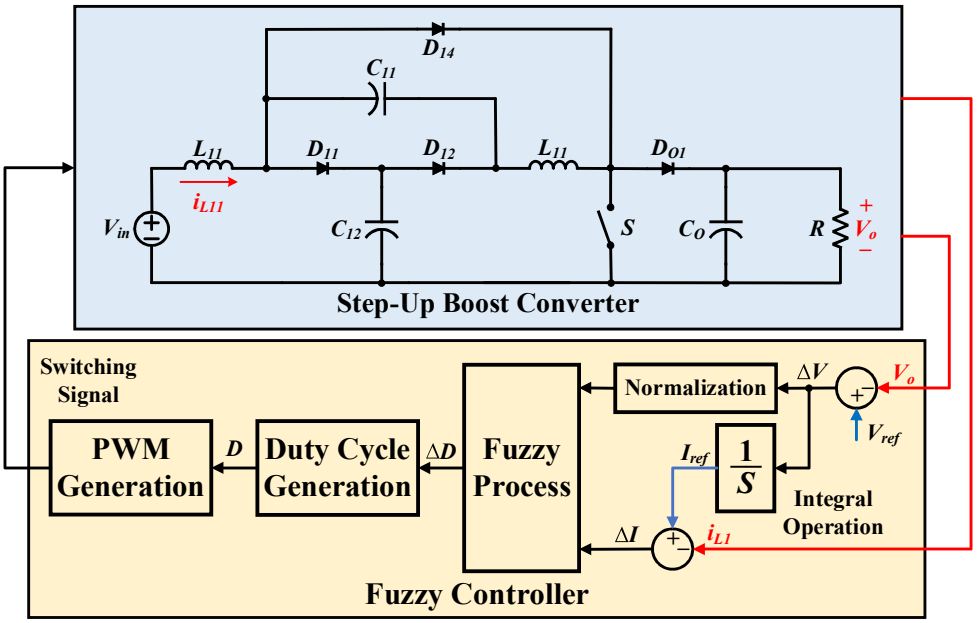
5) ตัวควบคุมคลุมเครือหรือฟัซซี (Fuzzy controller) เป็นหนึ่งในตัวควบคุมแบบปัญญาประดิษฐ์ โดยอาศัยประสบการณ์ ความรู้ และความเข้าใจของผู้สังเกตการณ์ในการออกแบบตัวควบคุม โดยไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร ซึ่งจะมีความคลุมเครือในความหมายของปริมาณเมื่อพิจารณาในเชิงปริมาณตัวเลข แต่จะอาศัยกระบวนการฟัซซี (Fuzzy process) ประกอบด้วย การฟัซซิไฟ (Fuzzification) การอนุมานฟัซซี (Fuzzy inference) และการดีฟัซซิไฟ (Defuzzification) ตัวควบคุมฟัซซีจะดำเนินการตามกลวิธีที่กำหนดโดยฐานกฎ (Rule base) เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตที่เหมาะสมและสอดคล้องตามที่ผู้สังเกตการณ์กำหนดไว้ ตัวควบคุมแบบคลุมเครือหรือฟัซซีสามารถนำมาใช้ควบคุมการทำงานของระบบที่มีความซับซ้อน เพื่อลดความซับซ้อนในการหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.10 (Lwin, 2019)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้น

อย่างไรก็ตามตัวควบคุมฟัซซีแสดงดังรูปที่ 2.10 อาศัยการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตเพียงค่าเดียวในการควบคุมการทำงานของวงจร จึงให้ประสิทธิผลในการควบคุมที่น้อยกว่าตัวควบคุมฟัซซีที่อาศัยทั้งค่ากระแสอินพุตร่วมกับแรงดันเอาต์พุตเพื่อเป็นค่าอินพุตให้กับตัวควบคุม เนื่องจากผลตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตที่ช้ากว่ากระแสอินพุต เมื่อมีเปลี่ยนจุดการทำงานของวงจร

6) ตัวควบคุมฟัซซีสำหรับสำหรับวงจรทบระดับแรงดันที่มีอัตราขยายแรงดันสูง โดยกระบวนการควบคุมเริ่มจากการวัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรมาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิง จะได้ผลต่างของแรงดันเข้าสู่ส่วนกระบวนการปริพันธ์ (Integral operation) และได้เอาต์พุตเป็นกระแสอ้างอิง หลังจากนั้นกระแสอ้างอิงถูกลบด้วยค่ากระแสอินพุตเพื่อให้ได้ผลต่างของกระแส ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการฟัซซีได้ดำเนินการปรับค่าสเกล หรือเรียกว่าการนอร์มัลไลซ์ (Normalization) เพื่อปรับขนาดค่าความผิดพลาดของแรงดัน ให้อยู่ภายในขอบเขตการทำงานที่การควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างครอบคลุมและเหมาะสม เอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีเป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ของวงจร ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.11 (Kunjittipong et al., 2020)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรทบระดับแรงดันที่มีอัตราขยายแรงดันสูง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบเรียงต่อกันสามขั้นมีความซับซ้อน รวมถึงสภาวะการทำงานต่าง ๆ ของวงจรที่ทำให้การทำงานของวงจรไม่เสถียร เช่น การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน ความไม่แน่นแนของพารามิเตอร์ การผันแปรของแหล่งจ่ายพลังงาน ความเค้นของแรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์

เสถียรภาพของระบบเนื่องจากการทำงานของวงจรย่อยแต่ละขั้นในสภาวะชั่วครู่ ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้วงจรสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างคงที่และมีประสิทธิผล แม้ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร การควบคุมการทำงานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น ได้แก่ งานวิจัย (Khwan–on and Diewsurin, 2018) ได้พัฒนาตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่ประกอบด้วยลูปแรงดันภายนอกหนึ่งลูป ลูปกระแสภายในสองลูป โดยสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้อย่างน่าพอใจภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงาน ทั้งนี้การออกแบบตัวควบคุมพีไอสำหรับลูปแรงดัน และลูปกระแสจะอาศัยการประมาณค่าที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม นอกจากนี้เพื่อให้ได้กระแสอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับลูปกระแสทั้งสองลูป จำเป็นต้องอาศัยวิธีการถ่วงน้ำหนักกระแส ซึ่งต้องปรับจูนค่าอย่างเหมาะสมเพื่อทำให้วงจรสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างเหมาะสม การออกแบบตัวควบคุมพีไออีกวิธีหนึ่งสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้นในงานวิจัย (El Aroudi et al., 2016) ได้พัฒนาตัวควบคุมพีไอสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองขั้นตัวที่สามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้อย่างมีประสิทธิผล อีกทั้งยังสามารถลดปัญหาการขาดเสถียรภาพของระบบเนื่องจากการทำงานของวงจรย่อยแต่ละขั้นในสภาวะชั่วครู่ อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวควบคุมนี้ต้องการกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุในแต่ละขั้น ทำให้ต้องใช้ตัวตรวจวัดกระแสและตัวตรวจวัดแรงดันเพิ่มขึ้น งานวิจัย (Karamanakos et al., 2013) นำเสนอการควบคุมแบบทำนาย (Model predictive control) ซึ่งได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถจัดการกับความไม่แน่นอน ทำให้วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างเหมาะสม แต่มีข้อจำกัดด้านการประมวลผลที่สูงขึ้น ตัวควบคุมโหมดการเลื่อน (Sliding mode controller) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสองในงานวิจัย (Haroun et al., 2013) และ (Haroun et al., 2014) พบว่าตัวควบคุมโหมดการเลื่อนที่ใช้กับวงจร สามารถทำงานได้แม้ในสภาวะที่มีการรบกวนและความไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามหากออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนโดยใช้การประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรจะทำให้ประสิทธิผลของตัวควบคุมลดลง ดังนั้นเพื่อออกแบบตัวควบคุมโหมดการเลื่อนให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จึงจำเป็นต้องเข้าใจขอบเขตของความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีตัวควบคุมเทคนิคอื่น ๆ สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ ได้แก่ การสังเคราะห์แบบไมโคร (μ–synthesis) (Ounis and Goléa, 2015) การควบคุมสังเกตการแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear observation control) (Cimini et al., 2017) การควบคุมแบบปรับตัว (Adaptive control) (Johnson et al., 2021) และการควบคุมแบบคงทน (Robust control)

(Alharbi et al., 2020) and (Gkizas, 2021) ซึ่งตัวควบคุมเหล่านี้สามารถควบคุมการทำงานของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจรของ ระดับแรงดันของแหล่งจ่ายอินพุต และการเปลี่ยนแปลงโหลด อย่างไรก็ตามตัวควบคุมเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้อง โดยประสิทธิผลของตัวควบคุมจะลดลงหากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบเกิดจากการประมาณค่าหรือไม่ถูกต้อง ทั้งนี้หากวงจรที่พิจารณามีความซับซ้อนมากจะส่งผลให้การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความซับซ้อนมากตามไปด้วย

การควบคุมคลุมเครือหรือฟัซซี (Fuzzy controller) ช่วยลดข้อจำกัดด้านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่อาศัยความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของวงจรเป็นอย่างดี โดยดำเนินการในรูปแบบของกฎการควบคุมที่มนุษย์สามารถเข้าใจได้ การใช้ตัวควบคุมฟัซซีที่ออกแบบอย่างเหมาะสมจะสามารถควบคุมการทำงานของวงจรได้อย่างมีประสิทธิผลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร ดังนั้นตัวควบคุมฟัซซีจึงเหมาะสำหรับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้น ซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนซับซ้อน การพัฒนาตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นจะแสดงรายละเอียดในบทต่อไป

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความผิดพร่อง

ลำดับต่อมาเป็นการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความผิดพร่อง ซึ่งมีรายละเอียดแสดงได้ดังตารางที่ 2.3 โดยจะกล่าวถึงการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ รวมถึง การตรวจจับความผิดพร่องและการระบุตำแหน่งความผิดพร่อง ซึ่งข้อมูลจากการปริทัศน์วรรณกรรมในหัวข้อนี้ เป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความผิดพร่อง และการตรวจจับความผิดพร่อง

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2015	E. Jamshidpour, P. Poure, and S. Saadate	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร (Open–circuit fault) และความผิดพร่องแบบลัดวงจร (Short–circuit fault) สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม โดยอาศัยอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรม (Field programmable gate array)	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง ซึ่งพิจารณาจากความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในช่วงการทำงานของสวิตช์ปิด–เปิด (ON–OFF) วิธีการตรวจจับจะใช้เทคนิคสเตทแมชชีน (State machine) เพื่อบอกสถานะการทำงานของวงจรแบบเป็นวัฏจักร เมื่อความชันกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไม่ตรงตามช่วงการทำงานของสวิตช์ จะแสดงสถานะความผิดพร่องที่เกิดขึ้น
2017	L. Li, S. X. Ding, J. Qiu, Y. Yang, and D. Xu	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพร่องอิงจากผู้สังเกตการณ์ โดยใช้แบบจำลองฟัซซีลอจิกรูปแบบ Takagi–Sugeno สำหรับระบบทั่วไปที่ไม่เป็นเชิงเส้น กรณีศึกษาจะพิจารณาเครื่องทำความร้อนถังกวนอย่างต่อเนื่อง (Continuous stirred tank heater: CSTH) โดยอาศัย Residual generator ที่พิจารณาจากสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบ	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง ในกระบวนการทำงานของเครื่องทำความร้อนถังกวนเมื่อความผิดพร่อง โดยใช้แบบจำลองฟัซซีรูปแบบ Takagi–Sugeno เพื่อออกแบบค่าฟังก์ชันสมาชิก (Membership function) ที่เกิดจากการสังเกตการณ์ ระดับของน้ำ และอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งจะอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างค่าเกณฑ์ (Threshold) และฟังก์ชันการประเมิน (Evaluation function) เพื่อแสดงสถานะความผิดพร่อง

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความผิดพร่อง และการตรวจจับความผิดพร่อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2017	M. Lester F. Padilla, S. Jenson C. Lao, R. G. Baldovino, A. A. Bandala, and E. B. Dadios	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องภายในระบบอากาศยานไร้คนขับ หรือยูเอวี (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) โดยอาศัยแบบจำลองฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic model)	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพร่องโดยใช้แบบจำลองฟัซซี ซึ่งอาศัยค่าเปอร์เซ็นต์แบตเตอรี่ และระดับความสามารถในการบินเป็นฟังก์ชันสมาชิกอินพุต ส่วนฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตเป็นระดับความสามารถในการทำภารกิจเอาต์พุตจะเป็นคำสั่งการดำเนินการต่อและยกเลิกการทำภารกิจ
2018	S. Siouane, S. Jovanović, and P. Poure	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทบระดับแรงดัน และลดระดับแรงดันที่เรียงต่อกัน เมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้นที่ทรานซิสเตอร์ ทั้งแบบเปิดวงจรและแบบลัดวงจร	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง โดยพิจารณาจากความชันกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องสำหรับวงจร หากสวิตช์ใดสวิตช์หนึ่งเกิดความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร จะสั่งให้สวิตช์เสริมเดี่ยวร่วมกับไดโอดสองตัวทำงานแทน
2018	E. Jamshidpour, P Poure, and S. Saadate	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพร่องทั้งแบบเปิดวงจร และแบบลัดวงจร ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงที่นำมาต่อเรียงกันสองขั้น ภายใต้การควบคุมแบบซิงโครนัส (Synchronous control)	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง โดยพิจารณาจากรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และรูปแบบสัญญาณการทำงานของสวิตช์ โดยเมื่อสวิตช์มีสถานะนำกระแส (ON) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้น และเมื่อสวิตช์มีสถานะหยุดนำกระแส (OFF) กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะลดลง

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความผิดพร่อง และการตรวจจับความผิดพร่อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2018	S. Khwan–on, and S. Diewsurin	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่สวิตช์ทั้งสามตัว ภายในวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น ภายใต้การควบคุมพีไอร่วมกับเทคนิคการถ่วงน้ำหนักของกระแส ที่ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันตามแรงดันที่ต้องการ	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยใช้การสร้างเงื่อนไขเหตุการณ์ (If–Else condition) จากการสังเกตการณ์การทำงานของวงจรโดยพิจารณาจากค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำตัวที่ 1 และ 3
2019	T. Kim, H. Lee, and S. Kwak	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร และการควบคุมแบบชดเชย (Compensated control) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบสองทิศทาง ซึ่งสามารถนำไปใช้กับแหล่งจ่ายได้หลายชนิด รวมถึงระบบจัดเก็บพลังงาน	ทราบถึงวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง โดยอาศัยดัชนีการตรวจจับความผิดพร่อง (Fault detection index) ที่ได้จากกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเพื่อเปรียบเทียบหาความผิดพร่องที่เกิดขึ้น อีกทั้งการเปลี่ยนตำแหน่งไดโอด เมื่อเกิดความผิดพร่องจะอาศัยวิธีการควบคุมสวิตช์แบบผสมผสานการสวิตช์ (Mixed switching strategy) เพื่อสร้างความคงทนต่อความผิดพร่อง เพื่อให้วงจรกลับมาทำงานได้ภายใต้สภาวะความผิดพร่อง

ตารางที่ 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าที่มีความคงทนต่อความผิดพร่อง และการตรวจจับความผิดพร่อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย	ประโยชน์ที่ได้รับ
2020	S. Kumar, and B. Singh Rajpurohit	บทความนี้อธิบายเกี่ยวกับวิธีการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ ภายใต้การควบคุมแบบโปรแกรมเมเบิลลอจิก (Programmable logic control)	ทราบถึงวิธีการออกแบบการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องสำหรับวงจร โดยใช้สวิตช์สองตัวขนานกันเพื่อลดค่ากระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ โดยมีการสั่งการทำงานของสวิตช์ผ่านตัวควบคุม หากสวิตช์ตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดพร่อง ตัวควบคุมจะสั่งให้อีกสวิตช์ทำงานแทนเพื่อควบคุมแรงดันตามแรงดันอ้างอิง

ส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์อาจเกิดการผิดพร่องได้ ส่วนประกอบที่มีโอกาสเกิดความผิดพร่องมากที่สุดคือสวิตช์กำลัง โดย 21% ของความผิดพร่องของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าทั้งหมดเป็นความผิดพร่องที่สวิตช์กำลัง (Brunson et all., 2014) ทั้งนี้ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นที่สวิตช์กำลัง ได้แก่ สวิตช์เปิดวงจร (Open–circuit fault : OCF) และสวิตช์ลัดวงจร (Short–circuit fault : SCF) โดยได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในสวิตช์กำลังมากมาย โดยส่วนใหญ่จะอาศัยการตรวจวัดค่ากระแสและการตรวจวัดค่าแรงดันของวงจรในสภาวะการทำงานปกติและสังเกตความผิดปกติเมื่อเกิดความผิดพร่อง และนำความผิดปกติดังกล่าวมาสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดพร่อง

ตัวอย่างผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยอาศัยกระแสอินพุตแสดงดังต่อไปนี้ งานวิจัย (Jamshidpour et all., 2015) นำเสนอการตรวจจับความผิดพร่องที่รวดเร็ว โดยใช้เทคนิคสเตทแมชชีน (State machine) ซึ่งอาศัยสัญญาณรูปทรงในอุดมคติของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เปรียบเทียบกับสัญญาณจากกระแสที่ไหลผ่านกระแสอินพุตที่ใช้ในตัวควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ในระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ อีกทั้งงานวิจัย (Shahbazi et all., 2012) ได้นำเสนอการตรวจจับความผิดพร่องสองระบบที่ทำงานร่วมกันสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ โดยใช้ความชันของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ เพื่อ

เปรียบเทียบกับความชันในอุดมคติในช่วงการทำงานของสวิตช์ ระบบย่อยการตรวจจับความผิดพร่องสองระบบที่ทำงานแบบขนานกันแบบไฮบริดในอุปกรณ์ลอจิกแบบโปรแกรมได้ (Field programmable gate array: FPGA) และวิธีการทำนาย (Predictive strategy) ได้รับการพัฒนาเพื่อการตรวจจับความผิดพร่องในงานวิจัย (Aravind Balaji et all., 2023) จะอาศัยความแปรผันของขนาดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ หากกระแสเกินระดับเกณฑ์ที่กำหนดจะแสดงสถานะความผิดพร่องที่เกิดขึ้น

นอกจากนี้กระบวนการตรวจจับความผิดพร่องที่อาศัยแรงดันไฟฟ้าของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ได้นำเสนอในงานวิจัยดังต่อไปนี้ งานวิจัย (Jagtap and More., 2020) นำเสนอการตรวจจับความผิดพร่องโดยใช้แรงดันตกคร่อมสวิตช์ โดยการตรวจจับจะอาศัยกระบวนการเปรียบเทียบระหว่างระดับแรงดันตกคร่อมสวิตช์กับสัญญาณการสวิตช์จากตัวควบคุม ส่วนงานวิจัย (Abouobaida et all., 2023) ได้นำเสนอการตรวจจับความผิดพร่องสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ โดยอาศัยฟังก์ชันของแรงดันเอาต์พุตที่ถูกประมาณจากสัญญาณการสวิตช์ จากนั้นจะเปรียบเทียบกับความชันของแรงดันที่ถูกวัดจากวงจร

กระบวนการตรวจจับความผิดพร่องที่กล่าวมาข้างต้นใช้ตัวตรวจวัดค่ากระแสหรือแรงดันเพียงหนึ่งตัวสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ดั้งเดิม อย่างไรก็ตามการใช้ตัวตรวจวัดค่ากระแสหรือแรงดันหนึ่งตัวอาจไม่เพียงพอสำหรับการตรวจจับความผิดพร่องของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น โดยงานวิจัย (Siouane et all., 2018) ได้นำเสนอการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าบัคบูสต์ที่มีระบบกักเก็บพลังงานภายใต้ตัวควบคุมแบบซิงโครนัส เทคนิคการตรวจจับความผิดพร่องจะใช้ตัวตรวจวัดกระแสเพิ่มขึ้นหนึ่งตัวเพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ส่วนงานวิจัย (Ali et all., 2018) ได้นำเสนอการตรวจจับความผิดพร่องโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในคอมพิวเตอร์ขนานกับการทำงานของวงจรจริง อย่างไรก็ตาม ความซับซ้อนของวงจรที่มากขึ้นส่งผลต่อการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงไม่เหมาะสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพร่องที่มีความรวดเร็วและถูกต้อง เพื่อสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องให้กับวงจรอย่างทันท่วงที ก่อนที่จะเกิดความเสียหายกับวงจร รวมทั้งการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับวงจรมากขึ้น เทคนิคฟัซซีลอจิกไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร งานวิจัย (Padilla et all., 2017) ได้นำเสนอได้นำเสนอการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องสำหรับยานพาหนะทางอากาศขนาดเล็ก (Micro aerial vehicles) โดยใช้ฟัซซีลอจิกตัดสินใจอย่างอิสระว่าจะดำเนินภารกิจที่ได้รับมอบหมายต่อ หรือยุติภารกิจนั้น งานวิจัย (Li et

all., 2016) ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดพร่องในระบบที่ซับซ้อน โดยใช้หลักการของผู้สังเกตการณ์ (Observer) ซึ่งเป็นเหมือนตัวแทนที่คอยเฝ้าสังเกตพฤติกรรมของระบบจริง เมื่อเกิดความผิดพร่อง ผู้สังเกตการณ์จะสามารถตรวจจับได้ทันที การวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองฟัซซีของทาคาจิ-สุกิโนะ (Takagi–Sugeno) มาใช้ในการสร้างผู้สังเกตการณ์ เพื่อให้สามารถจับพฤติกรรมที่ไม่แน่นอนของระบบได้อย่างถูกต้อง ผลการทดลองจากการจำลองระบบเครื่องทำความร้อนแสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้มีประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดพร่อง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตได้จริง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นเป็นวงจรที่มีความน่าเชื่อถือต่ำ เนื่องจากในวงจรประกอบด้วยสวิตช์กำลังสามตัว การตรวจจับความผิดพร่องของสวิตช์กำลังภายในวงจรอย่างรวดเร็วและถูกต้องจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีสมรรถนะที่ดี งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพร่องโดยใช้เทคนิคฟัซซีลอจิก ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับระบบที่ซับซ้อน เนื่องจากเทคนิคฟัซซีลอจิกไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจร ยิ่งไปกว่านั้นการตรวจจับความผิดพร่องที่พัฒนาขึ้นไม่จำเป็นต้องใช้ตัวตรวจวัดค่ากระแสและแรงดันเพิ่มเติม วิธีการนี้จะช่วยให้สามารถตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรของสวิตช์กำลังได้ทันที และระบุได้อย่างชัดเจนว่าสวิตช์ตัวใดเกิดความผิดพร่อง รวมถึงการสร้างคงทนต่อความผิดพร่องจึงเป็นจุดมุ่งหมายของการศึกษานี้

2.5 สรุป

ในบทที่ 2 กล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มีอัตราขยายแรงดันสูง การควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้น วิธีการตรวจจับความผิดพร่อง และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่อง ซึ่งผลงานวิจัยในอดีตที่ได้รวบรวมไว้ในบทนี้เป็นข้อมูลสำคัญในการศึกษาเพื่อนำมาพัฒนางานวิจัยในอนาคต โดยจะมุ่งเน้นที่การควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการภายใต้การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของวงจร ทั้งยังมีการพัฒนาการตรวจจับความผิดพร่อง และสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น เพื่อให้วงจรทำงานได้อย่างมีสมรรถนะที่ดีและมีความน่าเชื่อถือทั้งในสภาวะการทำงานปกติและสภาวะการทำงานเมื่อมีความผิดพร่องเกิดขึ้น