บทที่ 1
บทนำ

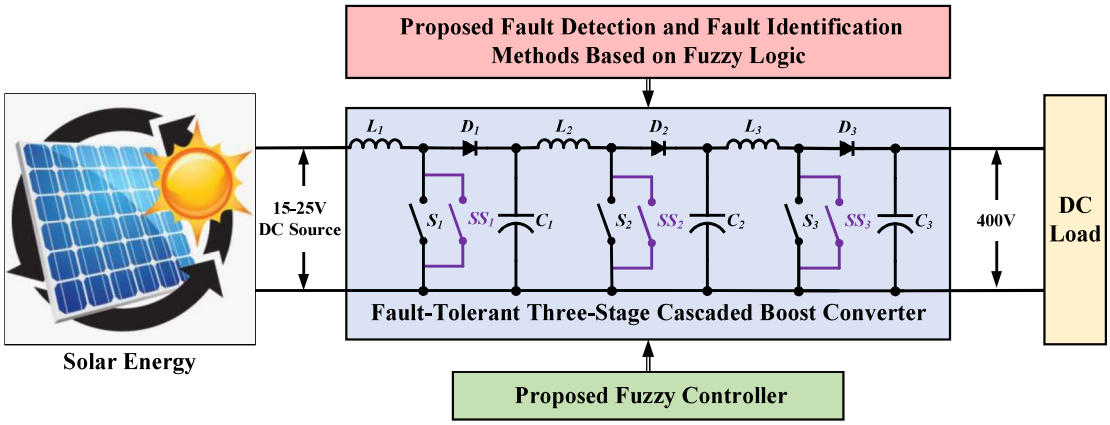
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากจำนวนประชากรโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและความต้องการใช้พลังงานในชีวิตประจำวันสูงขึ้น ทำให้ปัจจุบันเรายังคงพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกเป็นปริมาณมาก ส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน (Cellatoglu and Balasubramanian, 2010) โดยในปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกพยายามศึกษา และค้นหาพลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่า และมีประสิทธิภาพดีขึ้น รวมถึงลดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างพลังงานทดแทน (Renewable energy) ที่สำคัญ เช่น พลังงานลม (Wind energy) พลังงานน้ำ (Water energy) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal energy) พลังงานชีวภาพ (Biomass Energy) เป็นต้น อย่างไรก็ตามพลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ ให้ค่าแรงดันเอาต์พุตค่อนข้างต่ำและมีกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก อีกทั้งอาจมีระดับแรงดันไม่คงที่ เนื่องจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป การบังแสงบางส่วนบนแผงโซล่าเซลล์ (DJALAB et al.,2018) ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลง ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อระบบที่ใช้การเชื่อมต่อแบบอนุกรม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบแบบอนุกรมคือผลรวมของแรงดันไฟฟ้าจากแผงแต่ละแผง หากมีสิ่งใดมาบดบังแสง แม้เพียงแผงเดียว แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของทั้งระบบก็จะลดลง ทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบลดลงและยังทำให้อายุการใช้งานของแผงสั้นลงอีกด้วย การเชื่อมต่อแผงโซล่าเซลล์แบบขนานจึงเป็นวิธีหนึ่งในการลดผลกระทบจากการบังแสง แม้ว่าจะมีแสงบางส่วนถูกบดบัง แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของระบบแบบขนานยังคงที่ วิธีนี้ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ และง่ายต่อการติดตั้งและขยายระบบ แต่กระนั้นการนำแผงโซล่าเซลล์มาต่อแบบขนาน จะทำให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่ค่อนข้างต่ำ จึงจำเป็นต้องขยายแรงดันให้สูงขึ้นสำหรับโหลดที่ต้องการแรงดันสูง จึงมีการนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มาใช้ เพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์แบบดั้งเดิมยังมีข้อจำกัดในการเพิ่มระดับแรงดัน กล่าวคือวงจรต้องทำงานด้วยอัตราขยายที่สูงมากเพื่อให้ได้ระดับ

แรงดันเอาต์พุตที่สูงประมาณ 380V ที่ถูกนำไปใช้ในหลากหลายด้าน อาทิเช่น ระบบไมโครกริดกระแสตรง (Kalahasthi et al.,2022) อุตสาหกรรมขนส่ง (Gao et al.,2022) ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Chen et al.,2022) เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ให้มีอัตราการขยายแรงดันสูงและมีค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์ที่ไม่สูงมาก เนื่องจากอาจส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงขึ้นหากค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์สูง การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ที่เหมาะสมนั้นเป็นเรื่องท้าทาย เนื่องจากต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายประการ อาทิ สมรรถนะในการเพิ่มระดับแรงดัน จำนวน อุปกรณ์ที่ใช้ ความน่าเชื่อถือ เพื่อตอบสนองความต้องการเหล่านี้ งานวิจัย (Tofoli et al.,2022) ได้นำเสนอโครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ที่มีการเพิ่มแรงดันสูงรูปแบบใหม่ ซึ่งผสมผสานเทคนิคต่างๆ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและประสิทธิผล เช่น การเชื่อมต่อแบบหลายชั้น (Multi–stage cascaded connection) ตัวเก็บประจุที่ทำงานสลับกัน (Switched capacitor) ตัวคูณแรงดัน (Voltage multiplier) การเชื่อมต่อแบบแม่เหล็ก (Magnetic coupling) ตัวเหนี่ยวนำที่ทำงานสลับกัน (Switched inductor) และการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า (Voltage lift) เป็นต้น ทั้งนี้การนำวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์มาเรียงต่อกัน (Multi–stage cascaded boost converter) สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตให้สูงขึ้นตามต้องการได้ โดยค่าวัฏจักรหน้าที่ของสวิตช์แต่ละตัวไม่สูงมากนัก อีกทั้งยังเหมาะสำหรับระบบพลังงานทดแทน อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดทางด้านความน่าเชื่อถือ เนื่องจากวงจรมีองค์ประกอบต่าง ๆ มากขึ้น ส่งผลให้วงจรมีความซับซ้อน อีกทั้งแหล่งจ่ายที่เป็นพลังงานทดแทนจะขึ้นกับสภาพอากาศอาจส่งผลให้แหล่งจ่ายมีระดับแรงดันไม่คงที่ จำเป็นต้องอาศัยการควบคุมวงจรที่มีประสิทธิผล เพื่อสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้อย่างเหมาะสม รวมถึงการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องให้กับวงจรดังกล่าวให้สามารถทำงานต่อไปได้เมื่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรเกิดขึ้นที่สวิตช์กำลัง

รายงานวิทยานิพนธ์นี้จะพัฒนาการควบคุมฟัซซี จากนั้นจะสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น (Three–stage cascaded boost converter) ที่มีอัตราขยายแรงดันประมาณ 20 เท่า ดังรูปที่ 1.1 โดยแหล่งจ่ายอินพุตมีระดับแรงดันค่อนข้างต่ำประมาณ 15V ถึง 25V เพื่อให้ได้ระดับแรงดันเอาต์พุตสูงถึงประมาณ 400V โดยที่ค่าวัฏจักรหน้าที่สวิตช์ไม่สูงมากนัก โดยตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นจะทำให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นสามารถเพิ่มและรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามความต้องการได้ รวมถึงเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับวงจรเมื่อมีความผิดพร่องเกิดขึ้น โดยพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่มีความถูกต้องและรวดเร็ว วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้นประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายตัว ส่งผลให้การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มี

ความซับซ้อนมากขึ้น กระบวนการฟัซซีจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่จำเป็นสำหรับตัวควบคุมฟัซซี แต่จะอาศัยความรู้ และความเข้าใจพฤติกรรมการทำงานของวงจรจากผู้สังเกตการณ์ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี รวมถึงการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น โดยสามารถระบุตำแหน่งความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในแต่ละสวิตช์ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว เพื่อให้การกู้คืนการทำงานของวงจรจากความผิดพร่อง โดยนำกระบวนการฟัซซีมาใช้ในกระบวนการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่อง เพื่อให้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นสามารถทำงานต่อไปได้เมื่อมีความผิดพร่องเกิดขึ้นที่สวิตช์กำลังของวงจร รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพร่อง โดยอาศัยการควบคุมฟัซซี ประกอบด้วย แหล่งจ่ายอินพุตกระแสตรงที่มีแรงดันต่ำ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร โหลดกระแสตรงที่ต้องการแรงดันสูงประมาณ 400V โดยอาศัยตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น ร่วมกับวิธีการตรวจจับความผิดพร่อง และระบุตำแหน่งความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรที่มีความถูกต้องและรวดเร็วที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยกระบวนการฟัซซี



รูปที่ 1.1 โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพร่อง โดยอาศัยการควบคุมฟัซซี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่สามารถเพิ่มระดับแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้สูงประมาณ 20 เท่า เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าค่อนข้างต่ำ

1.2.2 เพื่อพัฒนาการควบคุมสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นให้สามารถเพิ่มระดับและรักษาแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตามต้องการได้

1.2.3 เพื่อพัฒนากลยุทธ์การตรวจจับความผิดพร่อง การระบุตำแหน่งความผิดพร่อง และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร สำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้น ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายตัวส่งผลให้การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีดั้งเดิมมีความซับซ้อน เนื่องจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรดังกล่าวซับซ้อนขึ้น ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีจึงน่าสนใจสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้น นอกจากนี้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้นอาศัยการทำงานของสวิตช์กำลังหลายตัว หากสวิตช์กำลังตัวใดตัวหนึ่งเกิดความผิดพร่อง อาจส่งผลต่อประสิทธิผลของวงจร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันหลายขั้นให้สามารถทำงานต่อไปได้ แม้มีความผิดพร่องเกิดขึ้น

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ในการสร้างชุดทดสอบสำหรับทดสอบการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้น จะอาศัยวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟส เป็นเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แทนระบบแสงอาทิตย์ที่มีแรงดันต่ำ

1.4.2 การทดสอบประสิทธิผลของวิธีการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น จะอาศัยผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์อาศัยโปรแกรม MATLAB SIMULINK

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 การควบคุมแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น พิจารณาเฉพาะโหมดการทำงานต่อเนื่อง (Continuous conduction mode: CCM) เท่านั้น

1.5.2 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นที่มีความคงทนต่อความผิดพร่องที่พัฒนาขึ้น มุ่งเน้นการพัฒนากลยุทธ์การควบคุมการทำงานของวงจร และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร ภายใต้สถานการณ์การทำงานต่าง ๆ ของวงจร

1.5.3 การประเมินประสิทธิผลการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร จะอาศัยการจำลองสถานการณ์ และการทดสอบชุดทดสอบ ภายใต้สถานการณ์การทำงานต่าง ๆ ของวงจร

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

1.6.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

1.6.3 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น โดยการตรวจจับความผิดพร่อง และการระบุตำแหน่งความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรจะอาศัยกระบวนการฟัซซี

1.6.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการสร้างชุดทดสอบ เพื่อทดสอบการทำงาน และเก็บรวบรวมผลการทดสอบ สำหรับระบบที่พัฒนาขึ้น

1.6.5 ได้บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ และ/หรือ นานาชาติ

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 8 บท และ 5 ภาคผนวก โดยที่ บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย และการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่มีในอดีต ประกอบด้วย ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์ในรูปแบบต่าง ๆ ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์รูปแบบต่าง ๆ และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

บทที่ 3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น ในบทนี้กล่าวถึงโครงสร้างของวงจร การออกแบบค่าพารามิเตอร์ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ภายในวงจร

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้นสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น เพื่อควบคุมค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรให้ได้ตามที่ต้องการ จากนั้นดำเนินการจำลองสถานการณ์ภายใต้สภาวะการทำงานต่าง ๆ เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 5 กล่าวถึงโครงสร้าง และการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นให้มีความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยเริ่มจากการพัฒนาพิธีตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรโดยอาศัยการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของวงจร การระบุตำแหน่งความผิดพร่อง และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร จากนั้นกล่าวถึงผลการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร เพื่อแสดงถึงประสิทธิผลของการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องให้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น

บทที่ 6 กล่าวถึงการสร้างชุดทดสอบสำหรับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น ซึ่งประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตกระแสตรง วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น วงจรตรวจวัดสัญญาณกระแสอินพุต วงจรตรวจวัดสัญญาณแรงดันเอาต์พุต และการควบคุมการทำงานของวงจรด้วยตัวควบคุมฟัซซีที่พัฒนาขึ้น และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจรด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ DSP รุ่น eZdsp^{TM}F28335

บทที่ 7 กล่าวถึงผลการทดสอบของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น เพื่อแสดงประสิทธิผลของตัวควบคุมฟัซซี การตรวจจับความผิดพร่อง การระบุตำแหน่งความผิดพร่องที่พัฒนาขึ้น และการสร้างความคงทนต่อความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดสอบวงจรกับผลการจำลองสถานการณ์ภายใต้สถานการณ์เดียวกัน

บทที่ 8 บทสรุป และข้อเสนอของวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวก ก. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ DSP รุ่น eZdsp^{TM}F28335

ภาคผนวก ข. โปรแกรมภาษาซีสำหรับควบคุมการทำงานชุดทดสอบ

ภาคผนวก ค. การจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้นแบบฮาร์ดแวร์ในลูปที่มีตัวควบคุม และการตรวจจับความผิดพร่องแบบสวิตช์เปิดวงจร

ภาคผนวก ง. การเปรียบเทียบผลจำลองสถานการณ์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบูสต์เรียงต่อกันสามขั้น เมื่อกระบวนการควบคุมฟัซซีมีการเปลี่ยนแปลง

ภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา ผลงานที่เกี่ยวข้อง และประวัติของผู้ทำวิจัย