

การศึกษา ออกแบบ และจำลองการทำงานตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล

พีรพล จันทร์หอม^{1*} และ ณัฏพงศ์ หัตถิ²

¹ หน่วยวิจัยระบบอัจฉริยะและการแปลงผันพลังงาน, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (ศูนย์นนทบุรี)

² ทีมวิจัยมอเตอร์และการแปลงผันพลังงาน, หน่วยวิจัยระบบอัจฉริยะ, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: peerapon.c@rmutsb.ac.th

วันที่รับบทความ: 3 ธันวาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 20 มีนาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 11 พฤษภาคม 2566

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 29 กรกฎาคม 2566

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหลักการทำงาน เทคนิคการควบคุม การออกแบบ และการจำลองการทำงานของตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล ซึ่งเป็นตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูงในปัจจุบัน ตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังชนิดนี้มีจุดเด่นคือ รูปแบบวงจรแบบโทเทมโพลซึ่งเป็นการแบ่งการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ความถี่สูงและไดโอดในวงจรบริดจ์ออกจากกัน จึงทำให้การไหลของกระแสสวิตซ์ซึ่งความถี่สูงและกระแสหลักมูลความถี่ต่ำแยกออกจากกัน ทำให้ความสูญเสียจากกระแสรีเวิร์สรีฟเฟกต์ของไดโอดลดลง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเน้นศึกษาหลักการทำงานและเทคนิคการควบคุมของตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังดังกล่าวเพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับจำลองการทำงาน สำหรับใช้ประโยชน์เป็นเครื่องมือในการออกแบบต้นแบบจริงรวมถึงจำลองการทำงานร่วมกับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังสมัยใหม่อื่นๆ และเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการทำงานเพื่อพิจารณารูปคลื่นแรงดันและกระแส พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพและการรบกวนฮาร์มอนิกส์ของตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลัง 3 แบบ ประกอบด้วย แบบบูสต์ แบบบริดจ์เลสส์ และแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล ซึ่งผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองและเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถทำงานได้เป็นอย่างดี โดยตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพลมีค่าประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด

คำสำคัญ: ตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลัง; บริดจ์เลสส์โทเทมโพล; แบบจำลองสวิตซ์; คอนเวอร์เตอร์

Study, Design, and Simulation of Bridgeless Totem-pole Power Factor Correction

Peerapon Chanhom^{1*} and Natchpong Hatti²

¹ Smart System and Smart Energy Conversion Research Unit, Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi (Nonthaburi Campus)

² Machines and Power Conversions Research Team, Intelligent System Research Group, Thailand's National Electronics and Computer Technology Center

* Corresponding author, E-mail: peerapon.c@rmutsb.ac.th

Received: 3 December 2022; Revised: 20 March 2023; Accepted: 11 May 2023

Online Published: 29 July 2023

Abstract: This research proposes a study on operating modes, control technique, design, and simulation of the bridgeless totem-pole power factor correction (PFC). This PFC has high efficiency and the advantage of the totem-pole circuit where two high-frequency switches for boosting and two diodes for conducting current at line frequency. This results in the loss of the diode's reverse recovery current has been reduced. As this advantage, this research will focus on the study of operating modes and control techniques of bridgeless totem-pole PFC, where this PFC has been modeled and simulated. This model will be adopted for prototype designs and used as one component in various modern power electronics systems simulations. To confirm the validity of the study, three types of PFCs including boost, bridgeless, and bridgeless totem-pole have been simulated for discussion of current and voltage waveform and comparing the efficiency and total harmonic distortion. The simulation results show the model and control technique presented in this research can be worked very well and the bridgeless totem-pole PFC has the highest efficiency.

Keywords: Power factor correction; Bridgeless totem-pole; Switching modeling; Converter

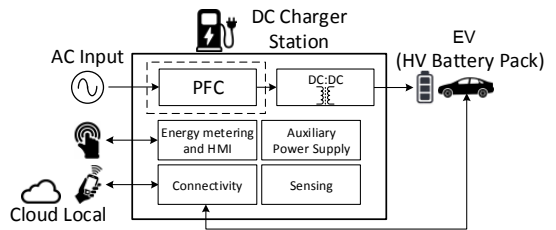


1. บทนำ

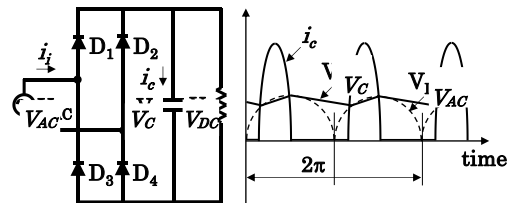
ตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลัง (Power Factor Correction (PFC)) เป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสมัยใหม่ เช่น แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current (DC) Power Supply) และ ชาร์จเจอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle (EV) Charger) ที่ทำหน้าที่อัดประจุแบตเตอรี่แพคแรงดันสูง (High Voltage (HV) Battery Pack) ดังแสดงในรูปที่ 1 [1, 2] เป็นต้น ตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังให้สูงขึ้น โดยควบคุมรูปคลื่นของกระแสอินพุตให้มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปคลื่นแรงดันกระแสสลับ (ที่มีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (Sine Wave)) วงจรแปลงต้นกระแสสลับ (Alternating Current (AC)) ไปเป็นแรงดันกระแสตรงที่ไม่มีตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลัง เช่น วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full-bridge Rectifier) จะใช้บริดจ์ไดโอดเรียงกระแสแสดงในรูปที่ 2 (ก) ทำให้รูปคลื่นกระแสสลับหลักมูล (i_i) มีความผิดเพี้ยน ส่งผลให้ค่าประกอบกำลังมีค่าต่ำ และกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนและเกิดความร้อนในตัวนำ [3, 4] โดยรูปคลื่นของกระแสสลับ i_i จะมีลักษณะดังรูปที่ 2 (ข) เนื่องจากกระแสสลับ i_i จะไหลเฉพาะช่วงเวลาที่แรงดันกระแสสลับ V_{AC} สูงกว่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุ V_C

ตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังแบบบูสต์ (Boost) ดังรูปที่ 3 (ก) เป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในช่วงแรกและได้รับความนิยมมาจนถึงปัจจุบัน ดังเห็นได้จากวงจรรวม (Integrated Circuit (IC)) ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย ต่อมาจึงพัฒนาเป็นแบบบริดจ์เลสส์ (Bridgeless) ดังรูปที่ 3 (ข) เพื่อเพิ่ม

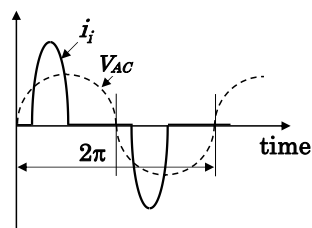
ประสิทธิภาพ (Efficiency) ให้สูงขึ้น โดยลดจำนวนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Device) ลงเพื่อลดความสูญเสีย [5] ปัจจุบัน เทคนิคดังกล่าวได้รับการพัฒนาเป็นแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล (Bridgeless Totem-Pole) โดยปรับปรุงโครงสร้างและเทคนิคการควบคุมแบบใหม่ ที่สามารถลดความสูญเสียในไดโอด (Diode) จากวงจรแบบบริดจ์เลสส์เดิมได้ ทำให้สามารถทำงานที่ความถี่สวิตซิ่งสูงขึ้น และมีการรบกวนฮาร์มอนิกส์ต่ำ รวมถึงทำให้วงจรมีขนาดเล็กลง [6, 7]



รูปที่ 1 วงจรตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังในอุปกรณ์ชาร์จเจอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า



(ก) วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น



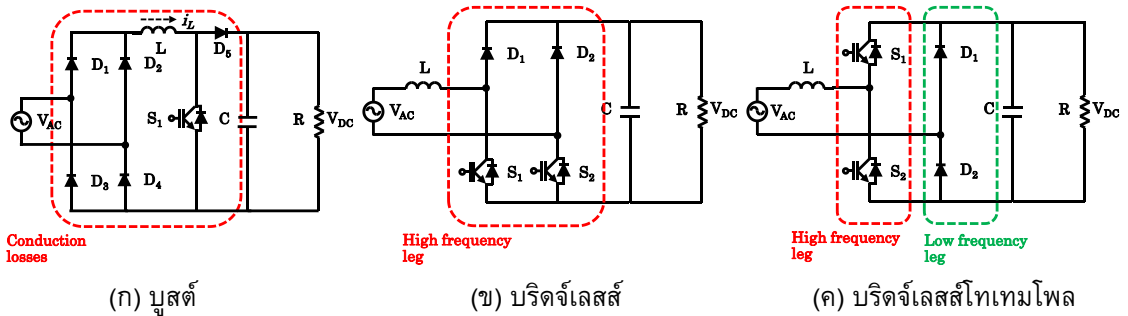
(ข) กระแสสลับหลักมูล

รูปที่ 2 รูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรเรียงกระแส



จากที่อธิบายข้างต้น สามารถสรุปโครงสร้างวงจรภาพรวมการทำงาน และกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการนำกระแสในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของวงจรตัวปรับปรุุงค่าประกอบกำลังแบบต่างๆ ได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อดีของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล ที่เหนือกว่าวงจรตัวปรับปรุุงค่าประกอบกำลังแบบอื่นๆ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งทำการศึกษาวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล โดยศึกษาหลักการทํางาน เทคนิคการควบคุม การออกแบบค่าพารามิเตอร์ การสร้างแบบจำลองและการจำลองการทำงาน เพื่อใช้เป็น

เครื่องมือในการออกแบบและพัฒนาต้นแบบจริง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนา การปรับปรุงเทคนิคการควบคุม รวมถึงการจำลองการทำงานร่วมกับระบบอื่นๆ เช่น สถานีอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น โดยงานวิจัยจะทำการสร้างแบบจำลองการทำงานของวงจรแบบสวิตซ์ซิงและเทคนิคการควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อพิจารณารูปคลื่นกระแส แรงดัน รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการทํางานของตัวปรับปรุุงค่าประกอบกำลัง 3 แบบ



รูปที่ 3 โครงสร้างวงจรตัวปรับปรุุงค่าประกอบกำลัง

ตารางที่ 1 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของวงจรตัวปรับปรุุงค่าประกอบกำลังแบบต่างๆ

แบบของวงจร	รอบทํางาน	สวิตซ์	ไดโอด	ความสูญเสียระหว่างการนำกระแส
บูลสต์	ครึ่งบวกและลบ	$S_1(\text{on})$	D_1, D_4	$2 \times V_F, V_{DS}(\text{on})$ (high frequency)
		$S_1(\text{off})$	D_1, D_4, D_5	$3 \times V_F$
บริดจ์เลสส์	ครึ่งบวก	$S_1(\text{on}), S_2(\text{off})$	$S_2(D)$	$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (high frequency)
		$S_1(\text{off}), S_2(\text{on})$	$D1$	$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (high frequency)
	ครึ่งลบ	$S_2(\text{on}), S_1(\text{off})$	$S_1(D)$	$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (high frequency)
		$S_2(\text{off}), S_1(\text{on})$	D_2	$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (high frequency)
บริดจ์เลสส์โทเทมโพล	ครึ่งรอบบวก	$S_2(\text{on}), S_1(\text{off})$	D_2	$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (low frequency)
		$S_2(\text{off}), S_1(\text{on})$	D_2	$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (low frequency)
		ครึ่งรอบลบ	$S_1(\text{on}), S_2(\text{off})$	D_1
$S_1(\text{off}), S_2(\text{on})$	D_1		$V_F, V_{DS}(\text{on})$ (low frequency)	



2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/การทดลอง

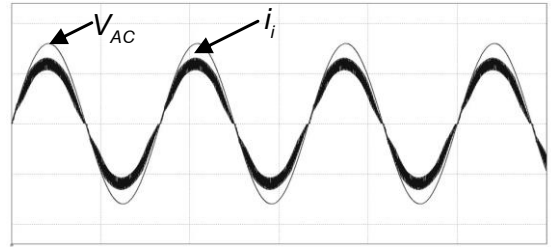
ในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์หลักการการทำงานของวงจรตัวรับปรุค่าประกอบกำลังแบบต่าง ๆ และวิธีการควบคุมกระแสของวงจร เพื่อทำการสร้างแบบจำลองโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 หลักการทำงานของวงจรแบบบัสต์

วงจรแบบบัสต์มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นกับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter) โดยวงจรเรียงกระแสจะเป็นตัวแปลงแรงดันกระแสสลับไปเป็นกระแสตรง ส่วนวงจรบัสต์จะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นกระแสตรงเพื่อรักษาระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตตามที่กำหนดไว้ ในส่วนของการควบคุมรูปคลื่นกระแสหลักมูล i_i วงจรบัสต์จะถูกควบคุมให้มีการทำงานในลักษณะซิงโครนัส (Synchronous) คือมีการควบคุมจังหวะการ เปิด-ปิด อุปกรณ์สวิตช์ S_1 ให้ตรงกับขนาด มุมเฟส และขั้วของแรงดันในช่วงครึ่งรอบบวก (Positive Half Cycle) และครึ่งรอบลบ (Negative Half Cycle) ของแรงดันกระแสสลับอินพุต จึงทำให้สามารถควบคุมมุมเฟสและรูปคลื่นของกระแสหลักมูล i_i ให้มีลักษณะใกล้เคียงกับแรงดันกระแสสลับ V_{AC} ดังแสดงในรูปที่ 4 ทำให้ค่าประกอบกำลังมีค่าสูง

2.2 หลักการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์

วงจรแบบบริดจ์เลสส์มีลักษณะดังรูปที่ 3 (ข) พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ดีกว่าวงจรแบบบัสต์ โดยลดจำนวนอุปกรณ์ลง ทำให้สามารถลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการนำกระแส (Conduction Loss) ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในวงจรลงได้วงจรแบบ



รูปที่ 4 กระแส i_i และแรงดันกระแสสลับอินพุต V_{AC}

บริดจ์เลสส์มีลักษณะคล้ายกับวงจรบัสต์คอนเวอร์เตอร์ 2 วงจรขนานกัน วงจรแรกจะทำงานในช่วงครึ่งรอบบวก โดยในช่วงนี้ S_1 จะถูกควบคุมจังหวะ เปิด-ปิด เพื่อ อัด-คาย พลังงานให้ตัวเหนี่ยวนำ L ส่วน S_2 จะหยุดทำงาน (Off-switch) และไดโอด D_1 จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับจากด้านเอาต์พุต สำหรับการ ทำงานในช่วงครึ่งรอบลบ ตัว S_2 ถูกควบคุมจังหวะ เปิด-ปิด ส่วน S_1 จะหยุดทำงาน และไดโอด D_2 จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับจากเอาต์พุต

2.3 หลักการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล

วงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพลแสดงในรูป 3 (ค) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับวงจรตัวรับปรุค่าประกอบกำลังแบบอื่นๆ ที่กล่าวมา วงจรตัวรับปรุค่าประกอบกำลังนี้มีลักษณะการทำงานที่โดดเด่นคือ การไหลของกระแสซึ่งความถี่สูงและกระแสหลักมูล (ที่ความถี่ไลน์ของแรงดันกระแสสลับอินพุต) จะแยกออกจากกัน เนื่องจาก S_1 และ S_2 ต่อร่วมกันแบบโทเทมโพล ประกอบกับเทคนิคการควบคุมแบบใหม่ ทำให้สามารถควบคุมกระแสสวิตซ์ซึ่งให้ไหลผ่านสวิตซ์ S_1 และ S_2 ส่วนกระแสหลักมูลนั้นจะไหลผ่านไดโอด D_1 และ D_2 ซึ่งการไหลของกระแสลักษณะนี้มีข้อดีคือ สามารถเพิ่มความถี่



ของอุปกรณ์สวิตช์ได้สูงขึ้น ลดความสูญเสียในไดโอดลง และสามารถลดจำนวนอุปกรณ์สวิตช์ในวงจรลงได้

หลักการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โท-เทมโพล ประกอบด้วย 4 โหมดการทำงาน (Operation mode) ดังแสดงในรูปที่ 5 โดย 4 โหมดการทำงานนี้จะแบ่งออกเป็นการทำงานในช่วงครึ่งรอบบวกและครึ่งรอบลบ ตามการเปลี่ยนแปลงขั้วของแรงดันกระแสสลับอินพุต V_{AC}

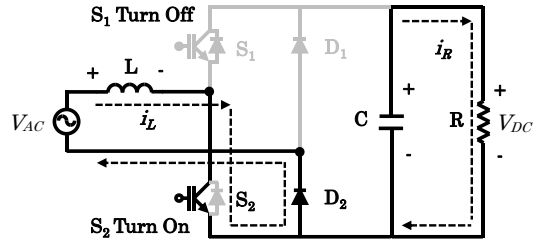
ในช่วงครึ่งรอบบวก เริ่มต้น S_2 จะถูกควบคุมให้เปิดสวิตช์เพื่อทำการอัดพลังงานให้กับตัวเหนี่ยวนำ L และ S_1 จะหยุดทำงาน ส่วนไดโอด D_1 จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้กระแส i_R ไหลย้อนกลับจากเอาต์พุตดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) จากนั้น S_2 จะถูกควบคุมให้เปิดสวิตช์ (ในขณะที่ S_1 ยังหยุดทำงาน) พลังงานไฟฟ้าที่อัดอยู่ใน L จะคายไปยังเอาต์พุตเพื่อทำหน้าที่ขยายแรงดันและรักษาระดับแรงดันกระแสตรง V_{DC} ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข)

สำหรับการทำงานในช่วงครึ่งรอบลบ S_1 จะถูกควบคุมให้เปิดสวิตช์เพื่อทำการอัดพลังงานให้กับตัวเหนี่ยวนำ L และ S_2 จะหยุดทำงาน ส่วนไดโอด D_2 จะป้องกันไม่ให้กระแสไหลย้อนกลับจากเอาต์พุตดังแสดงในรูปที่ 5 (ค) จากนั้น S_1 จะถูกควบคุมให้เปิดสวิตช์ (ในขณะที่ S_2 ยังหยุดทำงาน) พลังงานไฟฟ้าที่อัดอยู่ใน L จะคายไปยังเอาต์พุตเพื่อทำหน้าที่ขยายแรงดันและรักษาระดับแรงดันกระแสตรง V_{DC} ดังแสดงในรูปที่ 5 (ง)

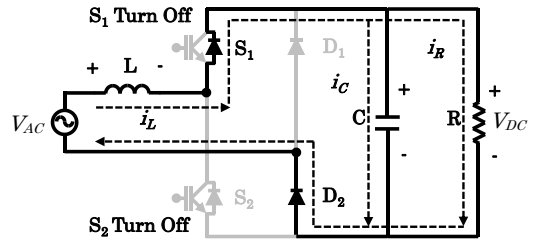
2.4 เทคนิคการควบคุมวงจรแบบบริดจ์เลสส์โท-เทมโพล

ตัวควบคุมของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โท-เทมโพล แสดงในรูปที่ 6 เป็นตัวควบคุมแบบวงปิด (Closed-Loop) ที่มีการป้อนกลับของสัญญาณควบคุม (Feedback Control) โดยควบคุมแบบพีไอ (Proportional

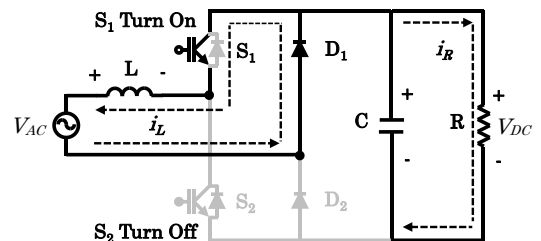
Integral (PI)) ซึ่งเป็นเทคนิคที่เป็นที่นิยมใช้ในงานควบคุมทางวิศวกรรม เนื่องจากประยุกต์ใช้งานได้ง่าย และมีเสถียรภาพสูง [7]



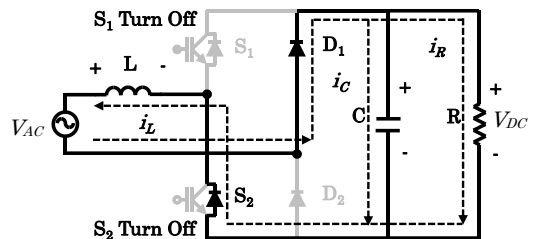
(ก) โหมดอัด (ครึ่งรอบบวก)



(ข) โหมดคาย (ครึ่งรอบบวก)

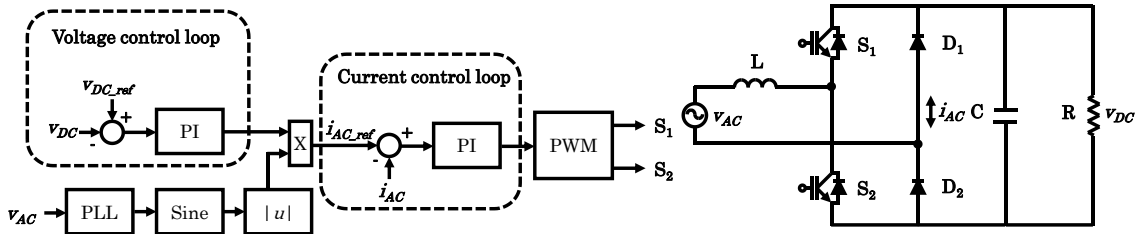


(ค) โหมดอัด (ครึ่งรอบลบ)



(ง) โหมดคาย (ครึ่งรอบลบ)

รูปที่ 5 โหมดการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โท-เทมโพล



รูปที่ 6 ตัวควบคุมแบบพีไอของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพลที่นำเสนอนในงานวิจัย

รูปที่ 6 แสดงตัวควบคุมประกอบด้วยวงจควบคุมแรงดัน (Voltage Control Loop) และวงควบคุมกระแส (Current Control Loop) เพื่อควบคุมขนาดของแรงดันกระแสตรงเอาต์พุตและขนาดของกระแสสลับหลักมูลให้เป็นไปตามที่กำหนด โดยวงควบคุมแรงดันจะอยู่วงนอกและสร้างสัญญาณกระแสสลับอ้างอิง i_{AC_ref} ให้กับวงควบคุมกระแสที่อยู่วงใน และสำหรับสัญญาณที่ใช้ควบคุม S_1 และ S_2 นั้นจะได้จากสัญญาณเอาต์พุตจากวงควบคุมกระแสที่ผ่านการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse-width Modulation (PWM))

ในส่วนของการควบคุมกระแสสลับให้มีรูปคลื่นใกล้เคียงกับแรงดันกระแสสลับอินพุตนั้น ตัวควบคุม

จะปรับสัญญาณกระแสสลับอ้างอิงโดยนำเอารูปคลื่นของแรงดันกระแสสลับอินพุต v_{AC} เข้ามาพิจารณาด้วย

3. ผลการทดลอง

ในส่วนนี้เป็นการจำลองการทำงานวงจรตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้แบบจำลองแบบสวิตซ์ซึ่งและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังทั้ง 3 แบบตามที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้ โดยวงจรตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังทั้ง 3 แบบจะมีพิกัดทางไฟฟ้าและพารามิเตอร์ของอุปกรณ์รายละเอียดสรุปตามตารางที่ 2 ซึ่งทั้ง 3 แบบที่นำมาเปรียบเทียบจะกำหนดให้มีพิกัดทางไฟฟ้าเท่ากันเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 2 พิกัดทางไฟฟ้าและพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

	พิกัดและพารามิเตอร์ของอุปกรณ์	ค่าปกติ	หน่วย
V_{AC}	แรงดันอินพุต (กระแสสลับ)	150-260	โวลต์ (Vrms)
V_{DC}	แรงดันเอาต์พุต (กระแสตรง)	385	โวลต์ (V)
f_{LINE}	ความถี่แรงดันอินพุต	50	เฮิร์ตซ์ (Hz)
f_{SW}	ความถี่สวิตซ์ซิ่ง	65	กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)
P_{OUT}	กำลังเอาต์พุต	4500	วัตต์ (W)
C_{DC}	ขนาดตัวเก็บประจุเอาต์พุต	2	มิลลิฟารัด (mF)
L	ขนาดตัวเหนี่ยวนำ	34	ไมโครเฮนรี่ (uH)



3.1 พิกัดวงจรตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลัง ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

ตารางที่ 2 แสดงพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ของวงจรตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังที่ใช้ในการจำลองการทำงาน โดยกำหนดให้ความถี่สวิตซ์เท่ากับ 65 กิโล-เฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ทำให้ขนาดของตัวเหนี่ยวนำไม่ใหญ่จนเกินไป และกำหนดกระแสรีปเปิ้ลมีค่าไม่เกิน 15% ในส่วนของขนาดตัวเก็บประจุเอาต์พุต C_{DC} และตัวเหนี่ยวนำ L สามารถคำนวณได้ตาม [7] ในการจำลองการทำงาน ตัวควบคุมจะต้องสามารถรักษาระดับแรงดันกระแสตรงเอาต์พุต V_{DC} ได้ตามที่กำหนด ซึ่งแรงดันกระแสสลับอินพุต V_{AC} จะมีค่าต่ำสุด-สูงสุดอยู่ในช่วงไม่เกิน 150-260 โวลต์ (อาร์เอ็มเอส)

3.2 แบบจำลองสวิตซ์ของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพลที่ใช้ในงานวิจัย

แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยพัฒนาขึ้นตามที่ได้อธิบายในหลักการทำงานและเทคนิคการควบคุมวงจรตัวปรับปรุงค่าประกอบกำลังในส่วนที่ 2 โดยใช้บล็อกของ MATLAB & Simulink ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองการทำงานที่ได้รับความนิยมในทางวิศวกรรม [8, 9] เพื่อสร้างแบบจำลองแบบสวิตซ์ซึ่งสามารถจำลองการทำงานที่สามารถพิจารณาความสูญเสียที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรได้

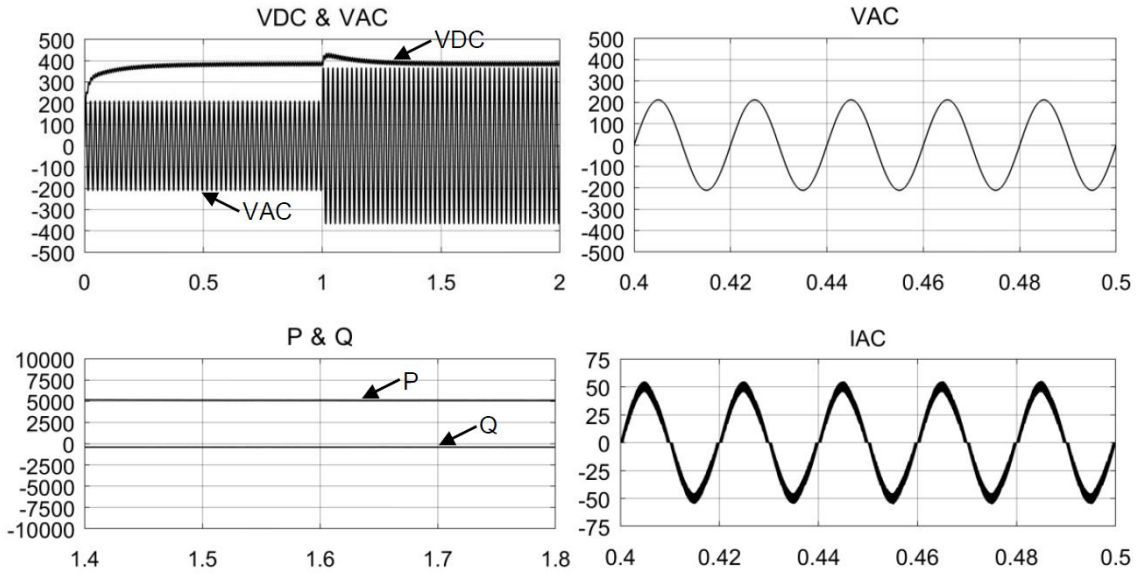
3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน

ผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 7 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรแบบอินเวอร์ตีฟิวส์ โดยตัวควบคุมสามารถรักษาระดับแรงดันกระแสตรงเอาต์พุต V_{DC} ได้ตามพิกัดที่กำหนด แม้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันกระแสสลับเอาต์พุต V_{AC} และสามารถควบคุมรูปคลื่นของกระแสหลักมูล i_L ให้ใกล้เคียงกับรูปคลื่นของแรงดันกระแสสลับเอาต์พุต V_{AC} จึงทำให้ค่าประกอบกำลังมีค่าสูง ดังเห็นได้จากสัดส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง P และกำลังไฟฟ้าเสมือน Q ซึ่งกำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ข้อดีของวงจรแบบอินเวอร์ตีฟิวส์คือ มีกระแสรีปเปิ้ล (ripple current) ที่ต่ำ เนื่องจากวงจรมีการทำงานแบบอินเวอร์ตีฟิวส์ทำให้กระแสรีปเปิ้ลระหว่างเฟสที่ 1 i_{L1} และเฟสที่ 2 i_{L2} เกิดการหักล้างกันภายในวงจร และทำให้สามารถลดขนาดของตัวเหนี่ยวนำลงได้

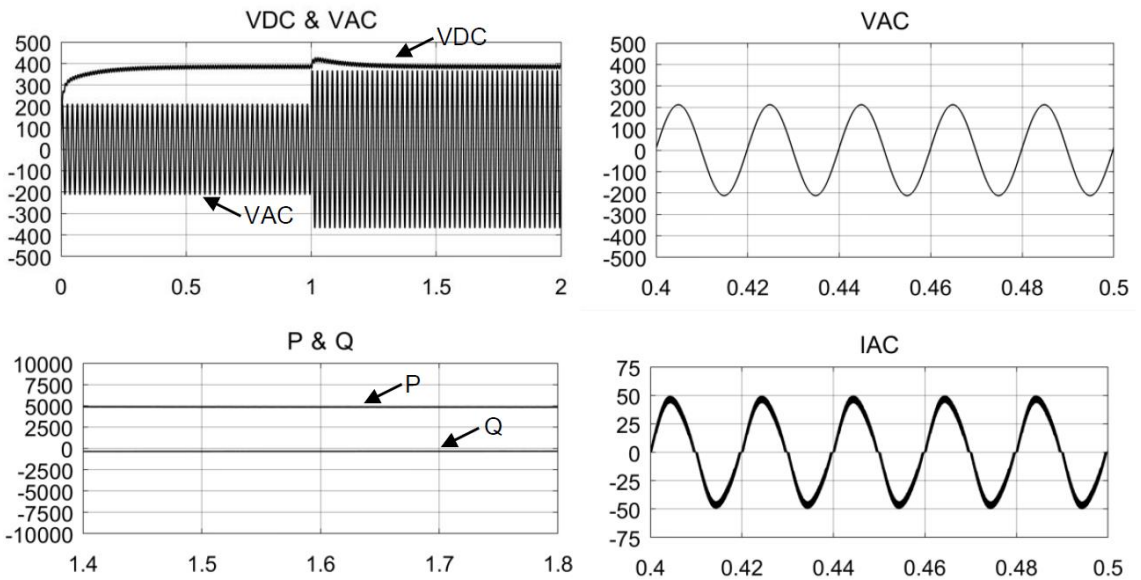
รูปที่ 8 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสของวงจรแบบบริดจ์เลสส์ การรักษาระดับแรงดันกระแสตรงเอาต์พุต V_{DC} การควบคุมรูปคลื่นกระแส i_L ระดับกระแสรีปเปิ้ล และกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต เป็นไปตามพิกัดที่กำหนด ข้อดีของวงจรที่เห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับวงจรแบบอินเวอร์ตีฟิวส์คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการลดจำนวนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำลง ทำให้สามารถลดความสูญเสียที่เกิดระหว่างการนำกระแสของอุปกรณ์ในวงจรลงได้ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงานและการรบกวนกระแสฮาร์มอนิกส์

วงจร	ประสิทธิภาพสูงสุด	การรบกวนฮาร์มอนิกส์รวมสูงสุด
อินเวอร์ตีฟิวส์	88%	14%
บริดจ์เลสส์	92%	11%
บริดจ์เลสส์โทเทมโพล	95%	11%



รูปที่ 7 ภาพรวมการทำงานของวงจรแบบอินเตอร์รีฟลูสดี



รูปที่ 8 ภาพรวมการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์

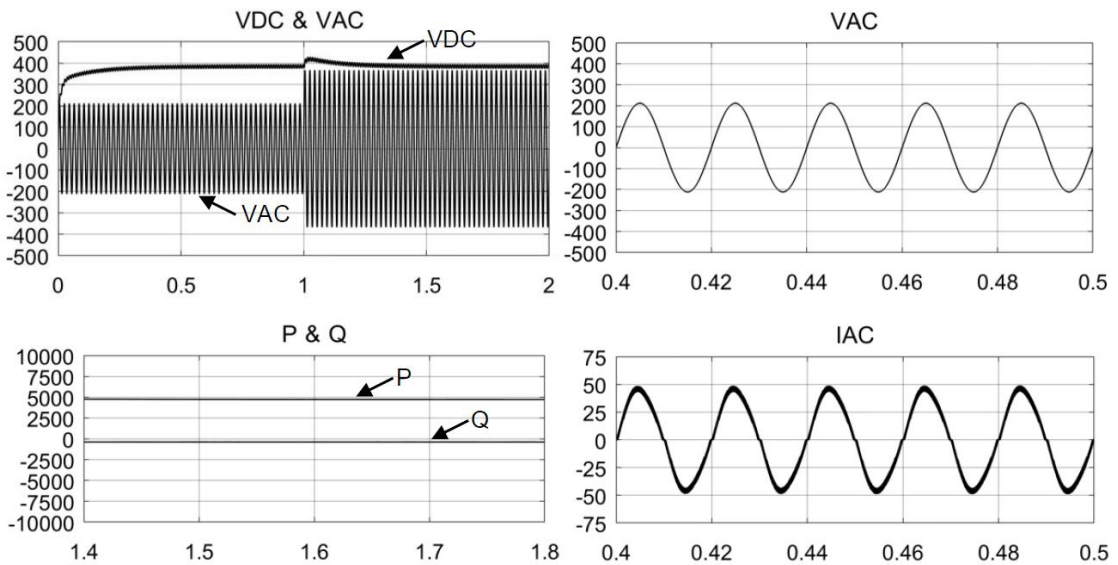


สำหรับผลการจำลองการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล จะคล้ายกับวงจรแบบบริดจ์เลสส์ ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งการทำงานเป็นไปตามพิกัดที่กำหนดเช่นเดียวกัน แต่มีข้อแตกต่างกันในเรื่องของรูปคลื่นของกระแสที่ไหลผ่าน S_1 , S_2 , D_1 และ D_2 ทั้งนี้เนื่องจากการที่ S_1 และ S_2 ต่อรวมกันแบบโทเทมโพล ทำให้เส้นทางการไหลของกระแสสวิตซ์ซึ่งความถี่สูงและกระแสหลักมูล (ความถี่ไลน์ของแรงดันกระแสสลับ V_{AC}) แยกออกจากกันดังแสดงในรูปที่ 10 โดยกระแสสวิตซ์ซึ่งจะไหลผ่านสวิตซ์ S_1 และ S_2 ส่วนกระแสหลักมูล i_L จะไหลผ่านไดโอด D_1 และ D_2 ซึ่งการไหลลักษณะนี้จะทำให้ความสูญเสียจากกระแสรีเวิร์สรีคัพเวอรี (Reverse Recovery) ที่ไหลผ่านไดโอดลดลงได้ โดยเมื่อเทียบกับ

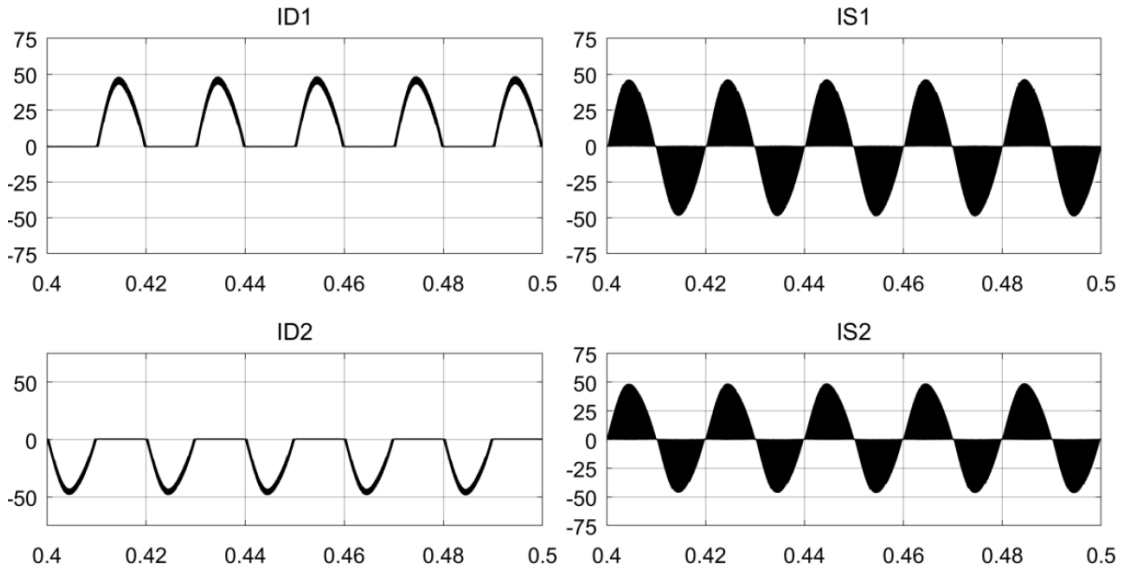
วงจรแบบบริดจ์เลสส์ กระแสที่ไหลผ่าน S_1 , S_2 , D_1 และ D_2 ดังแสดงในรูปที่ 11 จะเห็นว่า กระแสที่ไหลผ่านไดโอดจะมีส่วนที่เป็นสวิตซ์ซึ่ง จึงเกิดความสูญเสียจากกระแสรีเวิร์สรีคัพเวอรี ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรแบบบริดจ์เลสส์น้อยกว่าวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล ดังสรุปในตารางที่ 3 โดยค่าประสิทธิภาพจะคำนวณจากสมการ (1)

$$\text{ประสิทธิภาพ(\%)} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าจริงกระแสตรง (} P_{DC} \text{)} / \text{กำลังไฟฟ้าจริงกระแสสลับ (} P_{AC} \text{)}}{1} \times 100 \text{ \%} \quad (1)$$

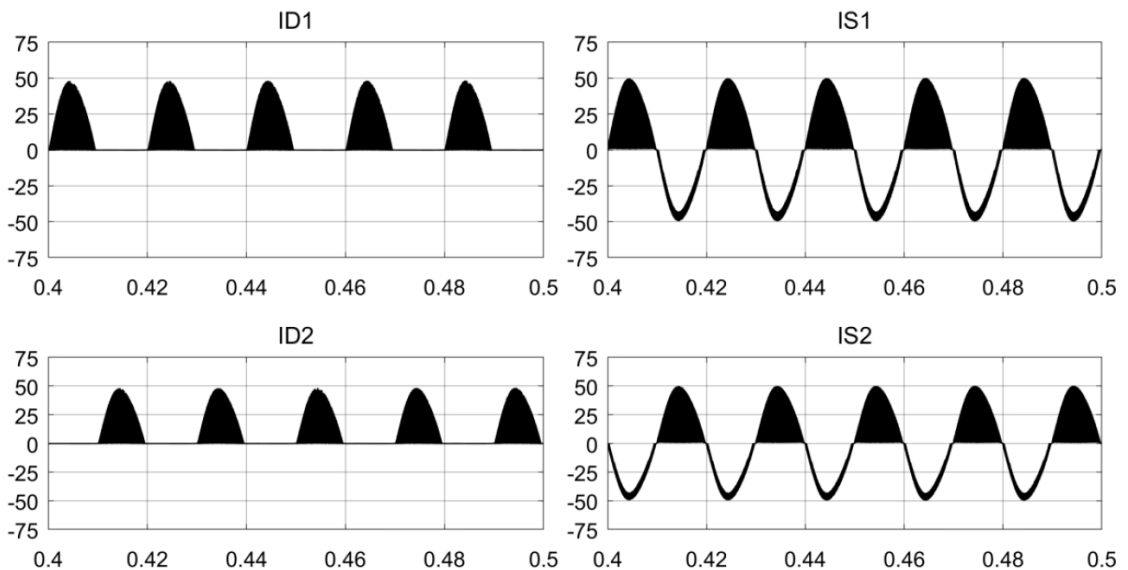
ซึ่งจะวัดขณะวงจรทำงานที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ส่วนการรบกวนฮาร์มอนิกส์จะใช้บัสล็อกวัตต์สัญญาณการรบกวนฮาร์มอนิกภายในโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 9 ภาพรวมการทำงานของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล



รูปที่ 10 กระแสที่ไหลผ่าน D_1 , D_2 , S_1 และ S_2 ของวงจรแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล



รูปที่ 11 กระแสที่ไหลผ่าน D_1 , D_2 , S_1 และ S_2 ของวงจรแบบบริดจ์เลสส์



4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยได้ศึกษาหลักการทํางาน เทคนิคการควบคุม การออกแบบ และจําลองการทํางานของตัวปรับปรุ่ค่าประกอบกําลังแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล ซึ่งมีประสิทธิภาพการทํางานสูงสุดเมื่อเทียบกับประเภทอื่น ๆ เนื่องจากตัวปรับปรุ่ค่าประกอบกําลังชนิดนี้ มีจํานวนอุปกรณ์น้อย และมีโครงสร้างวงจรและวิธีการควบคุมที่ทําให้กรไหลของกระแสวิตซ์ซึ่งความถี่สูงและกระแสหลักมูลความถี่ต่ำแยกออกจากกัน ทําให้ความสูญเสียจากกระแสรีเวิร์สรีคัพเวอร์ของไดโอดลดลง ซึ่งเป็นความสูญเสียหลักของอุปกรณ์ประเภทนี้ ดังเห็นได้จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจําลองการทํางานของตัวปรับปรุ่ค่าประกอบกําลัง 3 แบบประกอบด้วย แบบบัสต์ แบบบริดจ์เลสส์ และแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพล ซึ่งผลการจําลองการทํางานแสดงให้เห็นว่า ตัวปรับปรุ่ค่าประกอบกําลังแบบบริดจ์เลสส์โทเทมโพลมีค่าประสิทธิภาพการทํางานสูงที่สุด ซึ่งแบบจําลองและเทคนิคการควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถทํางานได้เป็นอย่างดี โดยแบบจําลองและเทคนิคการควบคุมในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบและพัฒนาต้นแบบจริง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนาการปรับปรุ่เทคนิคการควบคุม รวมถึงการใช้เป็นส่วนหนึ่งในการจําลองการทํางานร่วมกับระบบอิเล็กทรอนิกส์กําลังสมัยใหม่ เช่น แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และซาร์จเจอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. S. Sayed and A.M. Massoud, Review on state-of-the-art unidirectional non-isolated power factor correction converters for short-/long-distance Electric Vehicles, IEEE Access, 2022, 10(1), 11308-11340.
- [2] S. Inamdar, A. Thosar and S. Mante, Literature review of 3.3kW on board charger topologies, The 3rd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA 2019), Proceeding, 2019, 276-281.
- [3] Z. Chen, B. Liu, Y. Yang, P. Davari and H. Wang, Bridgeless PFC topology simplification and design for performance benchmarking, IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5), 5398-5414.
- [4] Application Note, Power Factor Correction (PFC) Circuits, 2019.
- [5] User Guide, TDTTP4000W065AN_0V1: 4kW Analog Bridge-less Totem-pole PFC Evaluation Board, 2021.
- [6] SLUA479B, Application Report, UCC28070 300-W Interleaved PFC Pre-Regulator Design Review, 2008.
- [7] SLUSBQ5D, UCC28180 Programmable Frequency, Continuous Conduction Mode (CCM), Boost Power Factor Correction (PFC) Controller, 2016.



- [8] W.H. Liao, S.C. Wang and Y.H. Liu, Generalized simulation model for a switched-mode power supply design course using MATLAB/SIMULINK, IEEE Transactions on Education, 2012, 55(1), 36-47.
- [9] J.H. Su, J.J. Chen and D.S. Wu, Learning feedback controller design of switching converters via MATLAB/SIMULINK, IEEE Transactions on Education, 2002, 45(4), 307-315.