

การออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยฟัซซีสำหรับควบคุมการทำงานการขนานมอดูลแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง

Design for Fuzzy Gain Scheduling of PI Controller to Control a Paralleling Operation of a Modular AC/DC Converter

ยุทธนา กันทะพะเยา^{1*} เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์¹ และวิบูลย์ ชื่นแซก²

Received: August, 2015; Accepted: March, 2016

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบควบคุมการขนานมอดูลแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง ให้ทำงานตามความต้องการกำลังงานไฟฟ้าของโหลด ด้วยเหตุที่การทำงาน ณ พิกัดโหลดน้อยจะทำให้รูปคลื่นกระแสด้านอินพุตมีความผิดเพี้ยนมาก ซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าผลรวมความผิดเพี้ยนกระแสด้านอินพุตสูง ระบบที่นำเสนอประกอบด้วย มอดูลการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแบบชุก 2 มอดูล และบัลลัสกระแสโหลด จะทำหน้าที่ควบคุมการปลดหรือต่อมอดูลในระบบและการแบ่งกระแสของแต่ละมอดูล การชดเชยค่าความผิดพลาดแรงดันเอาต์พุตใช้ตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยฟัซซี ผลการทดสอบการทำงานพบว่าระบบที่นำเสนอ จำนวนมอดูลแปลงผันสามารถทำงานได้ตามกำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการ ส่งผลให้การทำงานทุกสภาวะมีค่าคุณภาพทางไฟฟ้าอยู่ภายใต้การควบคุมตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2

คำสำคัญ : มอดูลแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง; ตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยฟัซซี; การแบ่งกระแส

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาวิทยาลัเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ นนทบุรี

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร

* Corresponding Author E - mail Address: yutthana_k44@hotmail.com

Abstract

This paper presents a control system of a paralleling AC/DC converter module. This system is operated with a required load power. Because of the system, it is operated at the light load resulting in a higher input current distortion. Thus, the total harmonics distortion of the input current is a high. The proposed system consists of a two-module CUK AC/DC converter and a load current bus. The load current bus is used to control the converter module in connecting/disconnecting the system and the current sharing of each module. A fuzzy gain scheduling of PI controller is used to compensate the output voltage error. The experimental results of the proposed system were achieved as the follows: the converter was operated, followed by a required load power. The system was operated under control of IEC61000-3-2 limit.

Keywords: Modular AC/DC Converter; Fuzzy Gain Scheduling of PI Controller; Current Sharing

บทนำ

การขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง มีเป้าหมายหลักคือ เพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของระบบ หรือง่ายต่อการเพิ่มมอดูลการแปลงผันกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบ [1] ด้วยคุณลักษณะของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงนอกจากต้องคงค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตลอดย่านการจ่ายโหลดแต่ละพิกัดแล้ว ด้านอินพุตต้องมีค่าคุณภาพทางไฟฟ้าภายใต้มาตรฐาน เช่น IEC 61000-3-2 กล่าวคือ กระแสด้านอินพุตต้องมีรูปคลื่นใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ เพื่อลดทอนผลรวมฮาร์มอนิกส์ความผิดเพี้ยนของกระแส และต้องควบคุมให้กระแสมีเฟสตรงกับแรงดันด้านอินพุต รวมถึงผลกระทบต่อการทำงานที่พิกัดโหลดน้อย ๆ ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสด้านอินพุตจะมาก [2] ดังนั้นในอดีตที่ผ่านมาจึงมีงานวิจัยที่ได้นำเสนอการแก้ปัญหาดังกล่าว เช่น ขั้นตอนวิธีการควบคุมในสภาวะโหลดน้อยสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ [3] อีกวิธีการหนึ่ง คือ การออกแบบวงจรเพิ่มเข้าไปในวงจรแปลงผันแบบพื้นฐาน เช่น วงจรบูสต์ [4] หรือออกแบบระบบควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผัน [5], [6] เป้าประสงค์เพื่อให้การทำงานของวงจรแปลงผันอยู่ภายใต้มาตรฐาน ในกรณีที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีการขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้าหากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าบางช่วงเวลาต้องจ่ายโหลดน้อยนั้น จะมีผลกระทบต่อค่าคุณภาพทางไฟฟ้าด้านอินพุต นั่นก็คือผลรวมค่าฮาร์มอนิกส์ของกระแสด้านอินพุต ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมจึงมีความสำคัญ แต่กระนั้นผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอการแก้ปัญหาดังกล่าวไว้ตอนต้นมีข้อจำกัดบางประการ เช่น การออกแบบระบบควบคุมค่อนข้างซับซ้อนรวมถึงหากเพิ่มวงจรเข้าไปในวงจรแบบดั้งเดิม จะเป็นผลทำให้การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมค่อนข้างยุ่งยาก

ในการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดของแรงดันด้านเอาต์พุตหรือการควบคุมกระแสด้านอินพุตให้มีเฟสตรงกับแรงดันด้านอินพุต โดยทั่ว ๆ ไปจะใช้ตัวควบคุมแบบดั้งเดิม คือ ตัวควบคุมแบบพีไอ หรือตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าหากนำ

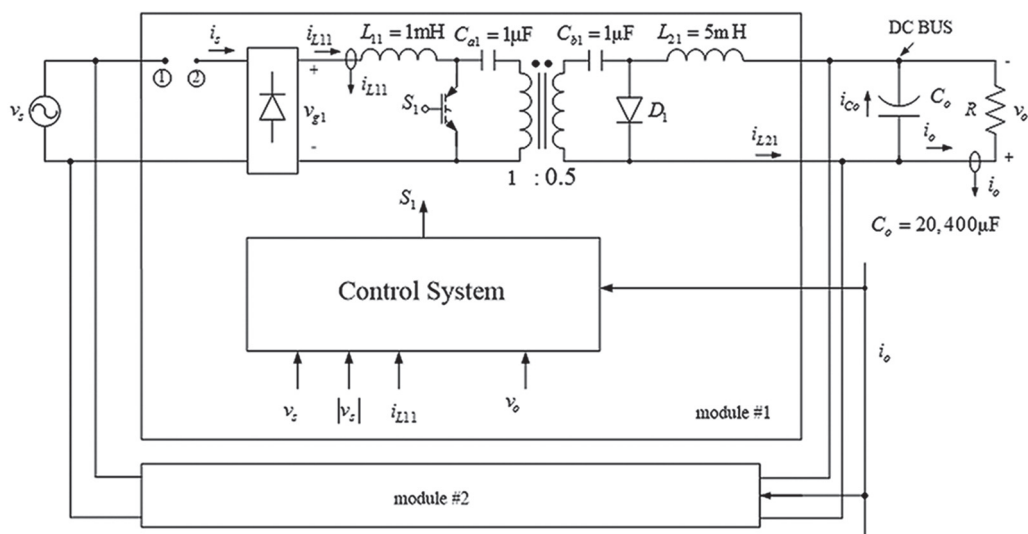
ตัวควบคุมทั้งสองแบบมาทำหน้าที่ชดเชยค่าความผิดพลาดของระบบนั้น ประเด็นหลักคือต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของตัวควบคุม ซึ่งจะเหมาะกับระบบควบคุมแบบเชิงเส้น แต่กรณีนั้นในทางเป็นจริงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่ไม่เชิงเส้น [7] ยิ่งกว่านั้นเมื่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีมอดูลการแปลงผันต่อขนานกันเพื่อเพิ่มพิกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้า รวมถึงมีมอดูลสำรองไว้ในระบบทำหน้าที่ปลดหรือต่อมอดูลเข้าไปในระบบให้ทำงานตามเงื่อนไขของโหลด ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าหากต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความยุ่งยากและซับซ้อน ในอดีตจึงได้นำตัวควบคุมแบบพีซีมาออกแบบควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงเพื่อแบ่งแรงดันของแต่ละเซลล์ของแบตเตอรี่ให้สมดุลกันผลการทดสอบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอ พบว่าตัวควบคุมแบบพีซีสามารถควบคุมแรงดันให้สมดุลกันได้เร็วกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ [8] สำหรับการควบคุมแบบพีซีที่ควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง [9] ผลการจำลองพบว่าสามารถลดค่าความผิดพลาดด้านอินพุตได้ [10] ใช้พีซีปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง ผลการจำลองการตอบสนองของวงจรโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใดพบว่าระบบให้ผลการตอบสนองโดยใช้เวลาเข้าที่เร็ว

สำหรับระบบการขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้าให้ทำงานตามความต้องการของโหลด ในบทความนี้ได้นำตัวชดเชยค่าความผิดพลาดแรงดันเอาต์พุตของระบบการขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้า ด้วยตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกนด้วยพีซี [11] ซึ่งการทำงานของระบบดังกล่าวเป็นการควบคุมการทำงานของระบบการขนานมอดูลแปลงผันโดยใช้ข้อมูลจากบัสการสื่อสารระหว่างตัวควบคุมแต่ละมอดูลทำหน้าที่ให้ข้อมูลตัวควบคุมแต่ละตัวเพื่อช่วยกันจ่ายกำลังไฟฟ้า [12] จะใช้บัลลิสต์ที่โหลดทำหน้าที่ปรับเกนของตัวควบคุมของแต่ละมอดูลเพื่อควบคุมการขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้า ในบทความนี้จึงนำตัวควบคุมที่นำเสนอไว้มาควบคุมระบบการขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้ากรณีที่ออกแบบให้มอดูลที่ต่ออยู่ในระบบจ่ายกำลังงานไฟฟ้าได้ตามความต้องการของโหลดโดยมีมอดูลสำรองไว้กรณีที่โหลดต้องการกำลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กล่าวคือ มีมอดูลถูกปลดหรือต่อเข้าไปในระบบตามความต้องการของโหลด ดังนั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจึงมีความยุ่งยากและซับซ้อนสำหรับการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาออกแบบตัวควบคุม โดยตัวควบคุมที่นำมาใช้ไม่จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ยิ่งกว่านั้นแต่ละมอดูลมีตัวควบคุมของตัวเองจึงทำให้มีความยืดหยุ่นต่อการออกแบบระบบควบคุมการทำงาน รวมถึงมีลักษณะเป็นมอดูลตามลักษณะทางกายภาพของการขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้า วิธีการเชื่อมต่อสัญญาณการควบคุมของแต่ละมอดูลใช้บัลลิสต์ที่โหลดควบคุมการทำงานขนานมอดูลการแปลงผันกำลังไฟฟ้า ซึ่งขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอนี้ไม่ยุ่งยากและซับซ้อน

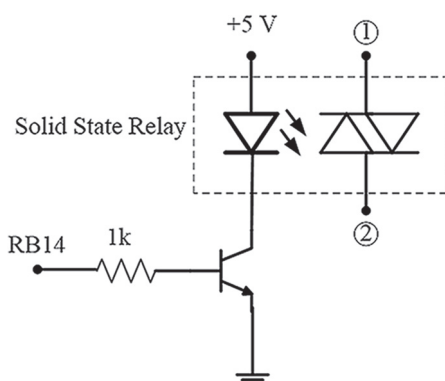
การขนานมอดูลแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง

ในบทความนี้ได้นำเสนอการขนานมอดูลแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบซุก จากรูปที่ 1 (ก) ได้แสดงวงจรกำลังที่ต่อขนานกันทางด้านอินพุตส่วนด้านเอาต์พุตต่อขนานกันที่บัสไฟฟ้ากระแสตรง (DC BUS) เพื่อช่วยกันจ่ายภาระโหลดที่เพิ่มขึ้น ส่วนระบบควบคุมนั้นในรูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตลอดย่านการทำงานของโหลดใช้การควบคุมแบบดิจิตอล

เป้าประสงค์เพื่อความยืดหยุ่นต่อการออกแบบระบบควบคุม ส่วนลูบควบคุมกระแสใช้การควบคุมแบบง่ายนั่นคือ ใช้หลักการควบคุมแบบฮีสเทอรีซิสสำหรับควบคุมกระแสด้านอินพุตให้มีรูปคลื่นใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ผลลัพธ์ที่ได้รับ คือ สามารถลดทอนผลรวมค่าความผิดเพี้ยนของกระแสด้านอินพุต และควบคุมกระแสให้มีเฟสตรงกับแรงดันด้านอินพุต ส่วนรูปที่ 1 (ข) ได้แสดงรายละเอียดของสวิทช์การปลดต่อวงจรสำหรับการต่อขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้า



(ก) ระบบการขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้า



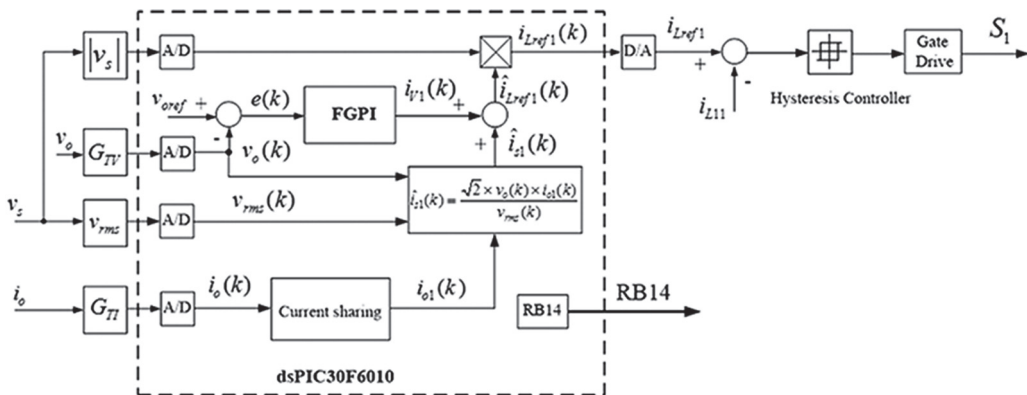
(ข) สวิทช์ทำหน้าที่ปลดหรือต่อมอดูลในระบบ

รูปที่ 1 การขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้า

การออกแบบระบบควบคุมการขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 2 สำหรับการควบคุมในลูบควบคุมแรงดันใช้การควบคุมแบบดิจิตอลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ dsPIC30F6010 มอดูลที่ใช้ในระบบควบคุมประกอบด้วย มอดูลการแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (A/D) ทำหน้าที่รับสัญญาณจากภายนอกเข้ามาประมวลผลใช้เวลาการชักตัวอย่างทุก ๆ

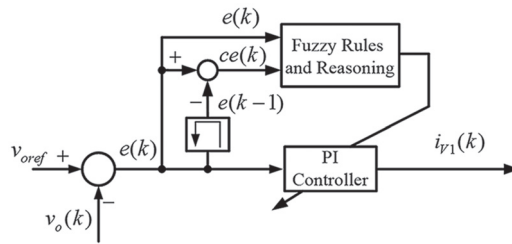
$250\mu s$ ประกอบด้วย แรงดันอินพุตขนาดหนึ่งหน่วย ($|v_s|$) ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันอินพุต (v_{rms}) แรงดันเอาต์พุต (v_o) และกระแสโหลด (i_o) ส่วนพอร์ต์ RB14 ทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมการปลดหรือต่อมอดูลการแปลงผันกำลังไฟฟ้าในระบบแสดงดังรูปที่ 1 (ข) โดยใช้โซลิตสเตรียลย์ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์การปลดหรือต่อของแต่ละมอดูล นอกจากนั้นการส่งคำสั่งกระแสอ้างอิง ($i_{Lref1(k)}$) สำหรับใช้ควบคุมกระแสด้านอินพุตให้มีเฟสตรงกับแรงดันด้านอินพุตที่เป็นสัญญาณดิจิทัลจะถูกแปลงด้วยมอดูลการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (D/A) ขนาด 12 บิต ตามลำดับ



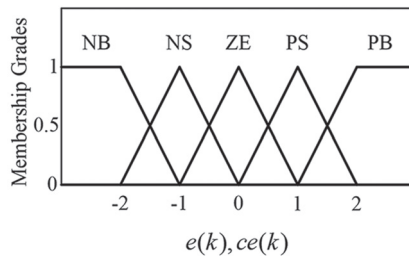
รูปที่ 2 ระบบควบคุมวงจรแปลงผันของแต่ละมอดูล

สัญญาณเชื่อมต่อกันระหว่างตัวควบคุมของแต่ละมอดูลในงานวิจัยนี้ใช้กระแสโหลด (i_o) ทำหน้าที่แบ่งกระแส ขณะที่ในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทำงาน 2 มอดูล และสัญญาณดังกล่าวจะทำหน้าที่ปลดหรือต่อมอดูลออกจากระบบตามเงื่อนไขการจ่ายโหลด โดยในส่วนของบล็อก Current Sharing นั้น จะทำหน้าที่กำหนดเงื่อนไขการจ่ายโหลดคือ หากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องจ่ายโหลดไม่เกิน 60% ตามพิกัดของแต่ละมอดูลที่อยู่ในระบบค่ากระแสโหลดสำหรับการแบ่งกระแสของแต่ละมอดูล คือ $i_{o1}(k) = i_o(k)$ แต่ถ้ากระแสโหลดเกิน 60% ค่ากระแสของแต่ละมอดูล คือ $i_{o1}(k) = 0.5 \times i_o(k)$ แล้วนำเงื่อนไขนี้ส่งสัญญาณผ่านพอร์ต์ RB14 ให้มอดูลที่สำรองไว้ต่อเข้ามาช่วยกันจ่ายโหลด เมื่อพิจารณาอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเอาต์พุตจะเห็นได้ว่าในอุปกรณ์ควบคุมแรงดันสัญญาณที่ได้รับ จะเป็นคำสั่งการควบคุมในอุปกรณ์หรือเป็นกระแสอ้างอิงนั่นเอง โดยสัญญาณดังกล่าวก่อนที่จะคูณกับสัญญาณไซน์ที่มีขนาดหนึ่งหน่วยจะเห็นได้ว่าประกอบด้วยสัญญาณที่ได้แก้ไขค่าความผิดพลาดด้วยตัวควบคุมพีโอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยฟัซซี่ ($i_{v1}(k)$) บวกกับค่ายอดของกระแสด้านอินพุตของแต่ละมอดูล ($i_{s1}(k)$) แสดงดังสมการที่ (1) อ้างอิงค่ายอดของกระแสด้านอินพุตแต่ละมอดูลที่เพิ่มเข้ามา นอกจากทำให้ผลการตอบสนองของระบบเร็วยังทำหน้าที่แบ่งกระแสของแต่ละมอดูลด้วย จากนั้นกระแสอ้างอิง ($i_{Lref1(k)}$) จะถูกคูณด้วยขนาดสัญญาณไซน์หนึ่งหน่วยเพื่อเป็นคำสั่งในอุปกรณ์ควบคุมกระแส

$$\hat{i}_{Lref1(k)} = i_{v1(k)} + \hat{i}_{s1(k)} \quad (1)$$



รูปที่ 3 ตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยฟัซซี



รูปที่ 4 ฟังก์ชันการอธิบายอินพุตของฟัซซี

จากตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดคัตราขยายด้วยฟัซซี (FGPI) ที่ถูกนำมาทำหน้าที่ชดเชยค่าความผิดพลาดแรงดันเอาต์พุตแสดงในรูปที่ 2 [11] - [12] และรูปที่ 3 สามารถอธิบายขั้นตอนวิธีการดังต่อไปนี้ การสร้างกฎฟัซซี ประกอบด้วย 2 อินพุต คือ ค่าความผิดพลาด ($e(k)$) และการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุต ($ce(k)$) แสดงดังสมการที่ (2) และ (3) ส่วนฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตฟัซซีทั้งสองมีย่านอินพุตแสดงดังรูปที่ 4 สำหรับกฎการสร้างฟัซซี ที่ใช้ควบคุมการขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้า จะใช้กฎจำนวน 25 กฎ เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใด การปลดหรือต่อมอดูลเข้าไปในระบบ และการคุมค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ตลอดย่านการทำงานของโหลด โดยพิจารณาจากช่วงเวลาเข้าที่ของระบบ การพุ่งเกินและพุ่งต่ำของแรงดันเอาต์พุต ในกรณีมีการรบกวนเข้ามาในระบบ

$$e(k) = v_{ref} - v_{of}(k) \quad (2)$$

$$ce(k) = e(k) - e(k-1) \quad (3)$$

การกำหนดค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบพีไอในแต่ละกรณี ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ของ NB คือ ค่าลบมาก NS คือ ค่าลบน้อย ZE คือ ค่าศูนย์ PS คือ ค่าบวกน้อย และ PB คือ ค่าบวกมาก รูปที่ 5 ถูกนำมาใช้สำหรับพิจารณาหาฟังก์ชันภาวะสมาชิกอินพุตของฟัซซี [11] - [12] การกำหนดคัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอ โดยสมมติให้ค่า K_p อยู่ในช่วง $[K_{p(min)}, K_{p(max)}]$ เช่นเดียวกับ K_i ก็อยู่ในช่วง $[K_{i(min)}, K_{i(max)}]$ สำหรับการกำหนดค่าเกณฑ์ใช้หลักการอ้างอิงจากการออกแบบระบบควบคุมบนโดเมนความถี่ แสดงเงื่อนไขดังสมการที่ (4) และ (5) เพื่อความสะดวกค่า K'_p และ K'_i ปกติจะกำหนดให้อยู่ในย่านระหว่าง 0 และ 1 สัมพันธ์กับฟังก์ชันสมาชิก (μ_i) แสดงดังรูปที่ 5 เป้าประสงค์เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา

$$K'_p = (K_p - K_{p(\min)}) / (K_{p(\max)} - K_{p(\min)}) \quad (4)$$

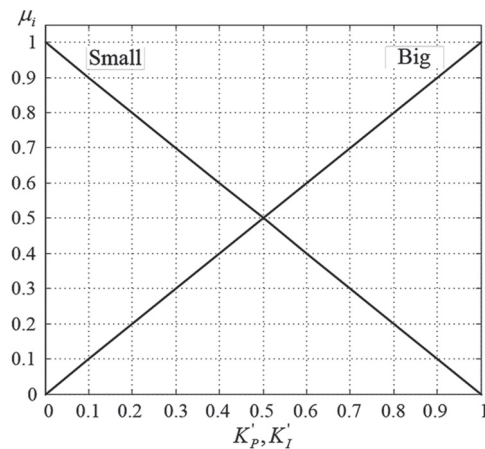
$$K'_I = (K_I - K_{I(\min)}) / (K_{I(\max)} - K_{I(\min)}) \quad (5)$$

อ้างอิงสมการที่ (4) และ (5) การพิจารณาค่า K'_p และ K'_I จะพิจารณาได้จากฟัซซีเซต IF-THEN Rules ดังนี้

$$\text{If } e(k) \text{ is } A_i \text{ and } ce(k) \text{ is } B_i, \text{ then } K'_p \text{ is } C_i \text{ and } K'_I \text{ is } D_i \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

เมื่อ A_i และ B_i คือ เซตฟัซซีของข้อมูลอินพุต ส่วน C_i และ D_i คือ เอาต์พุต ซึ่งมีค่าเป็น Big (B) หรือ Small (S) พิจารณาได้จากฟังก์ชันภาวะสมาชิกในรูปที่ 5 จะพบว่าค่า K'_p และ K'_I ที่มีค่า Big (B) จะมีค่าเท่ากับ μ_i ส่วน K'_p และ K'_I ที่มีค่า small (S) จะมีค่าเท่ากับ $1 - \mu_i$ ดังนั้นการกำหนดค่าเกณฑ์ฟัซซีจะพิจารณาจากผลการตอบสนองของระบบ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อวงจรแปลงผันเริ่มทำงานสัญญาณควบคุมการทำงานต้องการค่า K'_p มาก (B) เพื่อให้เวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็ว แต่ค่า K'_I ต้องน้อย (S) เพื่อป้องกันการฟุ้งเกิน ในทางกลับกันเมื่อแรงดันเอาต์พุตของวงจรแปลงผันเข้าสู่แรงดันอ้างอิงสัญญาณควบคุม K'_I ต้องการค่ามาก (B) เพื่อขจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว แต่ค่า K'_p ต้องมีค่าน้อยเพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันเอาต์พุต จากเงื่อนไขที่พิจารณาจึงสรุปได้ในตารางที่ 1 และ 2



รูปที่ 5 ฟังก์ชันภาวะสมาชิกอินพุตของฟัซซี

ตารางที่ 1 กฎฟัซซีของ K'_p

$ce(k)$ $e(k)$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	B	B	B	B	B
NS	S	B	B	B	S
ZE	S	S	S	S	S
PS	S	B	B	B	S
PB	B	B	B	B	B

ตารางที่ 2 กฎฟัซซีของ K'_I

$ce(k)$ $e(k)$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	S	S	S	S	S
NS	S	B	B	B	S
ZE	B	B	B	B	B
PS	S	B	B	B	S
PB	S	S	S	S	S

ต่อไปการทำให้ไม่เป็นฟัซซี (Defuzzification) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

$$\sum_{i=1}^m \mu_i = 1 \quad (7)$$

เมื่อ

$$\mu_i = \mu_e[e(k)]\mu_{ce}[ce(k)] \quad (8)$$

จากนั้นจะได้ว่าการกำหนดค่าเกณฑ์แบบฟัซซีสำหรับตัวควบคุมแบบพีไอจะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$K'_p = \sum_{i=1}^m \mu_i K'_{p,i} \quad (9)$$

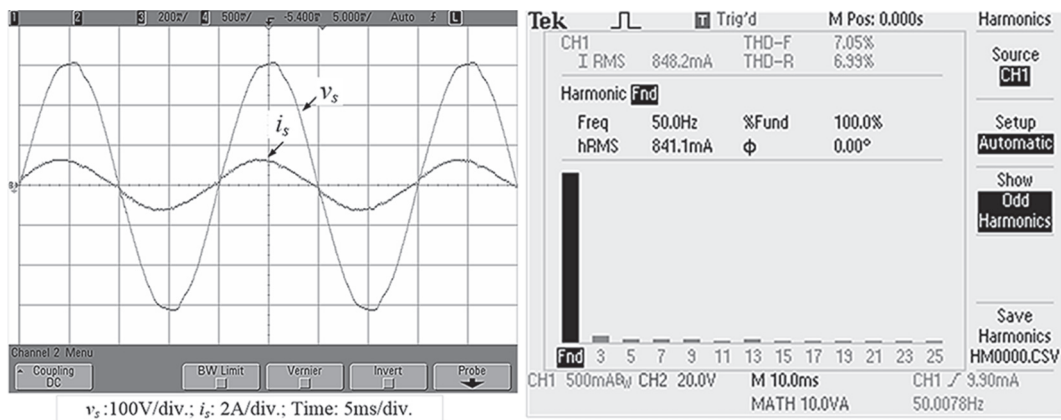
$$K'_I = \sum_{i=1}^m \mu_i K'_{I,i} \quad (10)$$

อ้างอิงค่า K'_p และ K'_I ที่หาได้จากสมการที่ (9) และ (10) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ ตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ฟัซซี่ ดังนั้นจากสมการที่ (4) และ (5) สามารถหาค่า K_p และ K_I ได้ดังสมการที่ (11) และ (12) ตามลำดับ

$$K_p = (K_{P(\max)} - K_{P(\min)})K'_p + K_{P(\min)} \quad (11)$$

$$K_I = (K_{I(\max)} - K_{I(\min)})K'_I + K_{I(\min)} \quad (12)$$

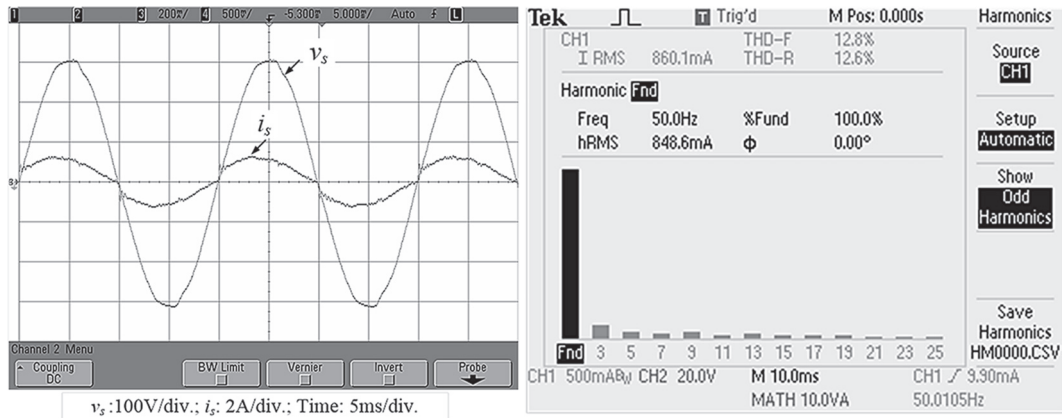
สำหรับวิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ฟัซซี่ ที่ได้นำมาใช้ในบทความนี้มีขั้นตอนดังนี้ เริ่มจากคำนวณหาค่าความผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลง ค่าความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุตจากสมการที่ (2) และ (3) จากนั้นคำนวณหาฟังก์ชันภาวะสมาชิก อินพุตฟัซซี่ แล้วนำฟังก์ชันภาวะสมาชิกค่าความผิดพลาดคูณกับการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด ตามสมการที่ (8) ซึ่งเป็นวิธีพิจารณาการเข้าสู่กฎฟัซซี่ เมื่อได้ฟังก์ชันภาวะสมาชิกแล้ว ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้อง กับการกำหนดค่าอัตราขยาย K'_p และ K'_I สามารถหาค่าได้จากรูปที่ 5 จะพบว่าค่า K'_p และ K'_I ที่มีค่า Big (B) จะมีค่าเท่ากับ μ_i ส่วน K'_p และ K'_I ที่มีค่า small (S) จะมีค่าเท่ากับ $1-\mu_i$ จากฟังก์ชันภาวะสมาชิกที่แสดงในรูปที่ 5 วิธีการทำให้ไม่เป็นฟัซซี่ได้ดังสมการที่ (7) ถึง (10) สุดท้ายสามารถ คำนวณหาค่าอัตราขยายของค่า K_p และ K_I ได้จากสมการที่ (11) และ (12) ตามลำดับ



(ก) แรงดันและกระแสทางด้านอินพุต

(ข) อันดับฮาร์โมนิกส์

รูปที่ 6 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทำงาน 1 มอดูลเพื่อจ่ายโหลด 150 W



(ก) แรงดันและกระแสทางด้านอินพุต

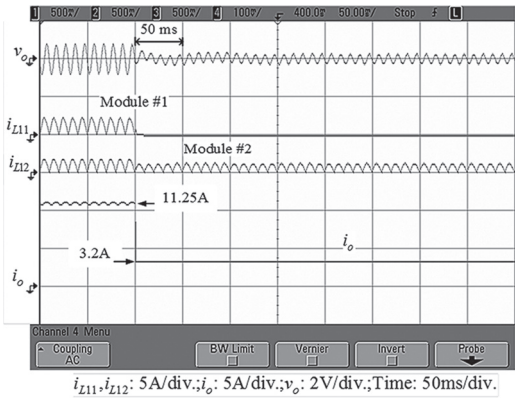
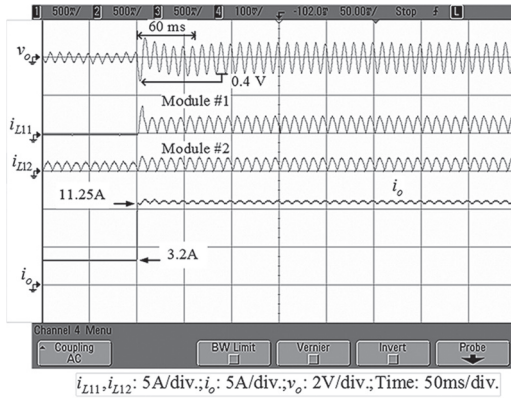
(ข) อันดับฮาร์โมนิกส์

รูปที่ 7 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทำงาน 2 มอดูลเพื่อจ่ายโหลด 150 W

ผลการทดสอบการออกแบบระบบควบคุมที่นำเสนอ

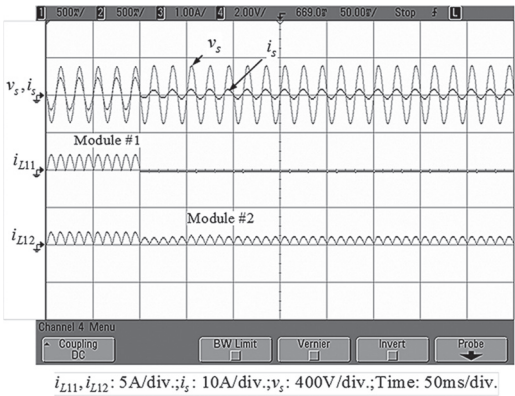
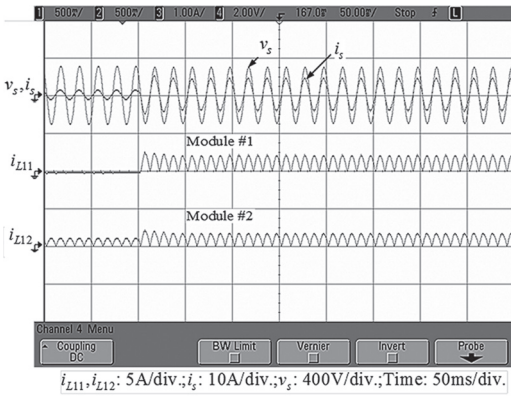
การทดสอบระบบต้นแบบเพื่อยืนยันแนวคิดที่นำเสนอประกอบด้วย มอดูลการแปลงผัน 2 มอดูล ขนาดมอดูลละ 250 W แรงดันอินพุต 220 V ความถี่ 50 Hz แรงดันเอาต์พุต -48 V รายละเอียด ดังรูปที่ 1 ระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 2 มีผลการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้ ขณะที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า มีมอดูลการแปลงผันกำลังไฟฟ้าทำงาน 1 มอดูล ขณะที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดขนาด 150 W รูปที่ 6 (ก) ได้แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านอินพุต จากรูปคลื่นกระแสจะเห็นว่า มีรูปคลื่น ไกล่เคียงรูปคลื่นไซน์และมีเฟสตรงกับแรงดันอินพุต และผลรวมความผิดเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์ก็ มีค่าต่ำ พิจารณาได้จากรูปที่ 6 (ข) เมื่อเทียบผลการทดสอบดังรูปที่ 7 (ก) ซึ่งในระบบสั่งให้มอดูลการแปลงผัน กำลังไฟฟ้าทำงาน 2 มอดูล จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นกระแสด้านอินพุตมีความผิดเพี้ยน ส่วนการวิเคราะห์ผลรวม ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับแสดงดังรูปที่ 7 (ข) จะเห็นได้ว่ามีค่าอันดับฮาร์โมนิกส์มากกว่า ในระบบที่ทำงาน 1 มอดูล โดยเฉพาะฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 5 7 9 และ 13 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบระบบขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้าเมื่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องจ่าย โหลดน้อยกว่า 60% (3.2 A) ของพิกัดแต่ละมอดูล จะเห็นได้ว่าที่ภาวะเงื่อนไข การจ่ายโหลดที่ไม่เกิน ภาระของแต่ละมอดูลนั้น ค่าคุณภาพทางไฟฟ้าด้านอินพุตจะมีค่าผลรวมความผิดเพี้ยนของกระแส ด้านอินพุตน้อยกว่ากรณีที่เป็นระบบทำงานด้วยมอดูลการแปลงผันกำลังไฟฟ้า 2 มอดูล ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอระบบควบคุมที่สามารถปลดหรือต่อมอดูลการแปลงผันกำลังไฟฟ้าในระบบให้เหมาะสม กับความต้องการของโหลด โดยมีการชดเชยค่าความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุตด้วยตัวควบคุม ไฟแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยพีซี เพื่อยืนยันการออกแบบระบบควบคุมที่นำเสนอ จึงกำหนดให้มอดูลที่ 1 ทำหน้าที่เป็นมอดูลสำรองไว้ในระบบสำหรับจ่ายโหลดกรณีที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องการจ่ายโหลด มากกว่า 60% ของมอดูลที่ต่ออยู่ในระบบนั้นคือมอดูลที่ 2 ทำหน้าที่เป็นตัวหลักสำหรับจ่ายโหลด มีผลการทดสอบดังต่อไปนี้



(ก) ขณะต่อมอดูลที่ 1 เข้าไปช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า
รูปที่ 8 การทดสอบการต่อและปลดมอดูลออกจากระบบ

(ข) ขณะปลดมอดูลที่ 1 ออกจากระบบ



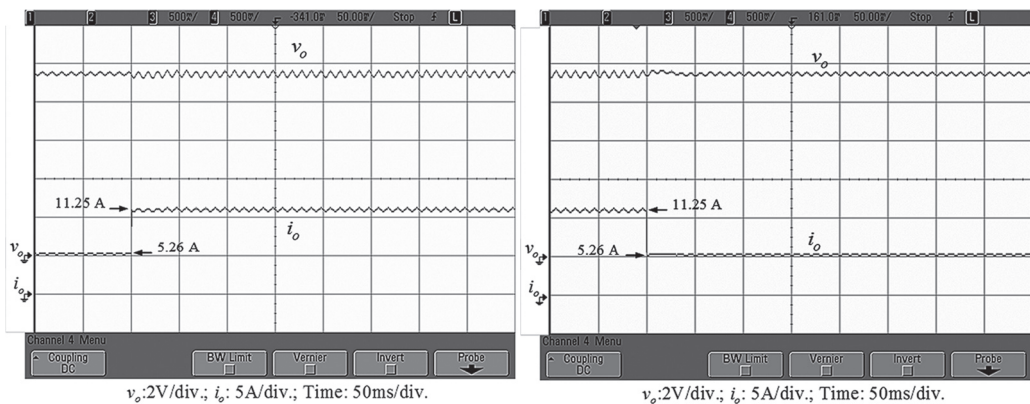
(ก) ขณะต่อมอดูลที่ 1 เข้าไปช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า
รูปที่ 9 ผลการตอบสนองด้านอินพุตของระบบ

(ข) ขณะปลดมอดูลที่ 1 ออกจากระบบ

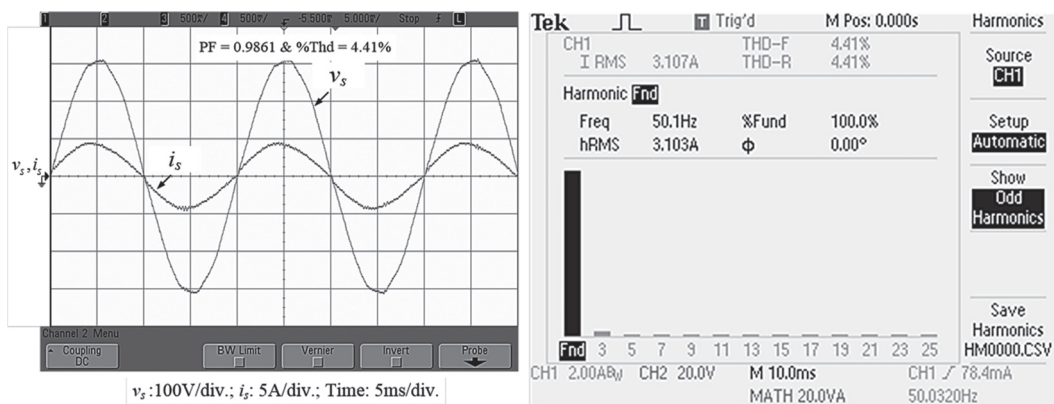
รูปที่ 8 (ก) เป็นผลการทดสอบการต่อมอดูลที่ 1 เข้าไปช่วยจ่ายโหลดที่เพิ่มขึ้น 60% ส่วนรูปที่ 8 (ข) แสดงการปลดมอดูลที่ 1 ออกจากระบบเพราะว่าแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจ่ายโหลดน้อยกว่า 60% โดยรูปที่ 8 แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำด้านอินพุตของแต่ละมอดูล (i_{L11}, i_{L12}) แรงดันเอาต์พุต (v_o) โดยตั้งโหมด Coupling AC และกระแสที่โหลด (i_o) โดยวัดกลับขั้วสัญญาณจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ขณะที่ต่อหรือปลดมอดูลที่ 1 ออกจากระบบนั้น แรงดันเอาต์พุตมีแรงดันการฟุ้งเกินและฟุ้งต่ำน้อยมาก โดยระบบควบคุมสามารถควบคุมให้ระบบทำงานเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วพิจารณาจากเวลาเข้าที่ ซึ่งน้อยกว่า 60 ms สำหรับการแบ่งกระแสของแต่ละมอดูลมีขนาดใกล้เคียงกัน ส่วนรูปที่ 9 ผลการทดสอบ การปลดหรือต่อมอดูลออกจากระบบโดยพิจารณาด้านอินพุตของระบบ ได้แสดงรูปคลื่นแรงดันและ กระแสด้านอินพุต (v_s, i_s) จะเห็นได้ว่าขณะที่ระบบทำงานภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว นั้น รูปคลื่นกระแสอินพุต มีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ทำให้ผลรวมค่าความผิดเพี้ยนของกระแสด้านอินพุตมีค่าน้อยและมีเฟสตรงกับ แรงดันอินพุต ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามี่ค่าใกล้เคียงหนึ่ง จึงสรุปได้ว่าระบบควบคุมสามารถควบคุม

ให้มอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้าปลดหรือต่อมอดูลเข้าไปในระบบอย่างทันทีทันใดบนเงื่อนไขตามความต้องการของโหลดโดยไม่มีผลกระทบต่อกรจ่ายโหลดรวมถึงค่าคุณภาพทางไฟฟ้าด้านอินพุต

สำหรับการทดสอบกรณีที่ระบบมีมอดูลการแปลงผัน 2 มอดูล เพื่อยืนยันการออกแบบระบบควบคุมที่นำเสนอในรูปที่ 10 โดยวัดกลับชั่วสัญญาณเป็นผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใดจาก 5.26 A ไป 11.25 A ดังรูปที่ 10 (ก) และจาก 11.25 A ไป 5.26 A ดังรูปที่ 10 (ข) จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ขณะที่มีการเปลี่ยนโหลดอย่างทันทีทันใด แรงดันเอาต์พุตมีการฟุ้งเกินเพียงเล็กน้อยและระบบสามารถทำหน้าที่จ่ายโหลดได้อย่างต่อเนื่อง ส่วนการทำงานในสภาวะคงตัว เมื่อระบบทำงานที่โหลดประมาณ 500 W รูปที่ 11 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตจะเห็นได้ว่ากระแสด้านอินพุตมีเฟสตรงกับแรงดันอินพุต และมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์ จากผลการทดสอบระบบมีค่าตัวประกอบกำลัง 0.9861 และผลรวมฮาร์โมนิกส์ค่าความผิดเพี้ยนกระแสทางด้านอินพุตเท่ากับ 4.41%



(ก) โหลดเปลี่ยนแปลงจาก 5.26 A ไปที่ 11.25 A (ข) โหลดเปลี่ยนแปลงจาก 11.25 A ไปที่ 5.26 A รูปที่ 10 ผลการตอบสนองด้านเอาต์พุตของระบบ



(ก) แรงดันและกระแสด้านอินพุต รูปที่ 11 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทำงานที่โหลดเต็มพิกัด

(ข) อันดับฮาร์โมนิกส์

สรุป

การออกแบบตัวชดเชยค่าความผิดพลาดของระบบการขนานมอดูลการแปลงผันกำลังไฟฟ้าให้ทำงานตามความต้องการของโหลด อ้างอิงผลการทดสอบการทำงานของระบบพบว่า ระบบควบคุมสามารถควบคุมการขนานมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้าให้ทำงานได้ตามเงื่อนไขการจ่ายโหลด ผลลัพธ์ที่ได้รับพบว่าสามารถควบคุมการปลดหรือต่อมอดูลแปลงผันกำลังไฟฟ้าในระบบได้อย่างทันทีทันใดตามความต้องการของโหลด เมื่อพิจารณาแรงดันเอาต์พุตมีการพุ่งเกินและพุ่งต่ำน้อย สำหรับในระบบที่มีมอดูลทำงาน 2 มอดูล การแบ่งกระแสของแต่ละมอดูลมีขนาดใกล้เคียงกัน พิจารณาได้จากกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำด้านอินพุตของแต่ละมอดูล (i_{L11}, i_{L12}) ขณะทำงานในสภาวะคงตัวสามารถคงค่าแรงดันเอาต์พุตคงที่ รูปคลื่นกระแสด้านอินพุตมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ผลรวมค่าฮาร์มอนิกส์ที่พิกัดโหลดมีเพียง 4.41% และมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9861

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์พลังงานวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนการทำวิจัย

References

- [1] Cuidong Xu and K.W.E. Cheng. (2011). A Survey of Distributed Power System AC versus DC Distributec Power System. 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). pp. 1-12
- [2] Sangsun Kim and Prasad N. Enjeti. (2004). A Parallel-Connected Single Phase Power Factor Correction Approach With Improved Efficiency. IEEE Transaction on Power Electronics. Vol. 19. No. 1. pp. 87-93
- [3] Wei-Shung Wang and Ying-Yu Tzou. (2011). Light Load Efficiency Improvement for AC/DC Boost PFC Converters by Digital Multi-Mode Control Method. IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS). pp. 1025-1030
- [4] Heng-Yi Li, Hung-Chi Chen and Lon-Kou Chang. (2009). Analysis and Design of a Single-Stage Parallel AC-to-DC Converter. IEEE Transaction on Power Electronics. Vol. 24. No. 12. pp. 2989-3002
- [5] G. Chu, C.K. Tse and S.C. Wong. (2009). Line-Frequency Instability of PFC Power Supplies. IEEE Transaction on Power Electronics. Vol. 24. No. 2. pp. 469-482

- [6] Yi-Hung Liao, Hung-Chi Chen, Hsiu-Che Cheng, Yu-Lung Ke and Yi-Ta Li. (2014). A Novel Control Strategy of Circulating Currents in Paralleled Single-Phase Boost Converters with Different Power Sharing for Microgrid Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 50. No. 2. pp. 1304-1312
- [7] Mattavelli, P., Rossetto, L., Spiazzi, G. and Tenti, P. (1997). General-Purpose Fuzzy Controller for DC-DC Converters Paolo Mattavelli. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol. 12. No. 1. pp. 79-86
- [8] Xiudong Cui, Weixiang Shen and Jinchuan Zheng. (2014). An Improved Battery Pack Equalizer Based on a DC/DC Converter with Fuzzy Logic Controller. *Proceedings of the 6th International Conference on Modelling, Identification & Control (ICMIC)*. Swinburne University of Technology, Australia. pp. 27-32
- [9] P. Shobana, N. Geetha and J. Gnanavadeivel. (2012). Enhancement of Power Quality of AC-DC Boost Converter with HCC and FLC-A Comparative Study. *International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET)*. pp. 254-258
- [10] Weidong Xiao and W.G. Dunford. (2004). Fuzzy Logic Auto-Tuning Applied on DC-DC Converter. *The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. pp. 2661-2666
- [11] Kanthapayao, Y., Kamnarn, U. and Chunkag, V. (2011). Redundant Operation of a Parallel AC to DC Converter via a Serial Communication Bus. *Journal of Power Electronics*. Vol. 11. No. 4. pp. 533-541
- [12] Kanthapayao, Y. and Chunkag, V. (2014). Current-Sharing Bus and Fuzzy Gain Scheduling of Proportional-Integral Controller to Control a Parallel-Connected AC/DC Converter. *IET Power Electron.* Vol. 7. Issue 10. pp. 2525-2532