

การออกแบบระบบควบคุมสำหรับควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็น กระแสตรงที่มีผลการตอบสนองเร็ว

Design of the Control System to Control AC/DC Converter with a Fast Transient Response

ยุทธนา กันทะพะเยา^{1*} เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์¹ และ วิบูลย์ ชื่นแขก²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์วิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จังหวัดนนทบุรี 11000

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมสำหรับควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง โดยขั้นตอนวิธีการออกแบบระบบควบคุมที่นำเสนอ ในรูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตใช้ตัวควบคุมพีโอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วย ฟัชซี ส่วนในรูปควบคุมกระแสใช้วิธีการควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส ซึ่งทั้งหมดนี้จะอธิบายรายละเอียดไว้ในบทความนี้ การ ประเมินผลระบบควบคุมที่นำเสนอใช้ควบคุมการทำงานวงจรแยกโดดของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็น กระแสตรงแบบชุก พิกัดกำลังไฟฟ้า 250W แรงดันเอาต์พุต -48V พบว่าระบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้คงที่ ทั้งการทำงานในสถานะอยู่ตัวและการตอบสนองชั่วคราว ระบบมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง และรูปคลื่นของ กระแสต้านอินพุตมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ยิ่งกว่านั้นการออกแบบระบบควบคุมไม่ยุ่งยากและไม่ซับซ้อน

Abstract

This paper presents a design of the control system to control AC/DC converter. Algorithm of a control system design consists of the output voltage loop control used a fuzzy gain scheduling of PI control and the current loop control used a hysteresis control, which is described in this paper. The evaluation of the proposed control system is used to control an isolated CUK AC/DC converter operation, with a 250W load and a -48V output voltage. The system is achieved as the following; the tight output voltage both the steady state operation and the transient response, a power factor is nearly unity and the waveform of input current is nearly sinusoidal. In addition, the control system design is simple and uncomplicated

คำสำคัญ : วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง ผลการตอบสนองเร็ว

Keywords : AC/DC converter, Fast transient response

*ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ yutthana.k@rmutsb.ac.th โทร. 0 29691369-74 ต่อ 2923

1. บทนำ

ในปัจจุบันการนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงจะมุ่งเน้นการศึกษาในประเด็นกว้างๆ คือ การลดสัญญาณการป้อนกลับการควบคุมการทำงานของวงจร และการนำเสนอขั้นตอนการปรับปรุงผลตอบสนองการทำงานของระบบ สำหรับงานวิจัยที่มุ่งเน้นศึกษาประเด็นแรกนั้นข้อดี คือ สามารถลดต้นทุนการสร้างแต่มีข้อจำกัด คือต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนสำหรับควบคุมการทำงานของระบบ ส่วนประเด็นการนำเสนอขั้นตอนแบบที่สองนั้นจะนำเสนอเทคนิคการป้อนสัญญาณเข้าไปในรูปควบคุมแรงดันเอาต์พุตเพื่อปรับปรุงผลการตอบสนองของระบบกรณีมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ

แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ต้องคำนึงถึงการคุมค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ระบบมีผลการตอบสนองเร็วขณะมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ รวมถึงค่าคุณภาพทางไฟฟ้าทางด้านอินพุตของระบบต้องอยู่ภายใต้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC61000-3-2 เป็นต้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มุ่งเน้นศึกษาประเด็นดังกล่าว เช่นใน ได้พิจารณาข้อจำกัดผลการตอบสนองชั่วคราวและการคุมค่าแรงดันเอาต์พุต คือ การกำหนดความถี่ตัดข้ามสำหรับการออกแบบตัวควบคุมในรูปควบคุมแรงดัน โดยปกติแล้วค่าความถี่ที่เหมาะสมจะประมาณ 10-20 Hz สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าในประเทศไทย 50 Hz หากกำหนดค่าความถี่มากกว่านี้ ข้อดีคือระบบจะได้รับการตอบสนองเร็วแต่รูปคลื่นกระแสทางด้านอินพุตผิดเพี้ยน ส่งผลให้ค่าคุณภาพทางไฟฟ้าด้านอินพุตของระบบแย่

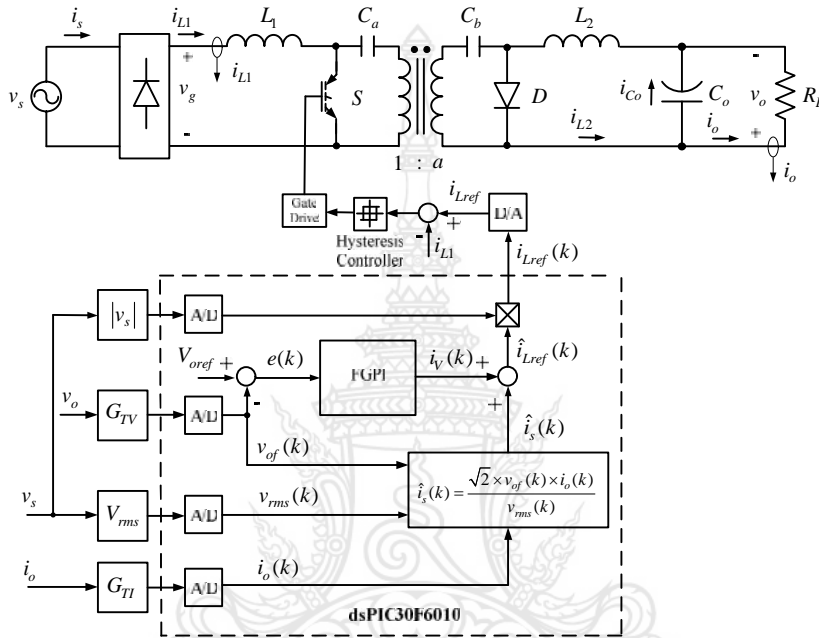
จากข้อจำกัดการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสำหรับชดเชยค่าความผิดพลาดแรงดันเอาต์พุตในรูปควบคุมแรงดันของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง ประเด็นหลักก็คือ การกำหนดความถี่ตัดข้ามสำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม บทความนี้จะนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมโดยไม่จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า ยิ่งกว่านั้นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอยังสามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างอัตโนมัติตามค่าความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุต เพื่อรองรับการสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ โดยตัวควบคุมที่นำมาใช้จะอ้างอิงจากงานวิจัยที่นำเสนอใน การทดสอบเพื่อยืนยันระบบควบคุมที่นำเสนอจะถูกนำมาทดสอบบนวงจรต้นแบบที่สร้างขึ้นระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้วงจรแยกโดดของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง แบบชุก ขนาดพิกัดโหลด 250W แรงดันเอาต์พุต -48V รายละเอียดการนำเสนอแสดงดังหัวข้อต่อจากนี้

2. วิธีการทดลอง

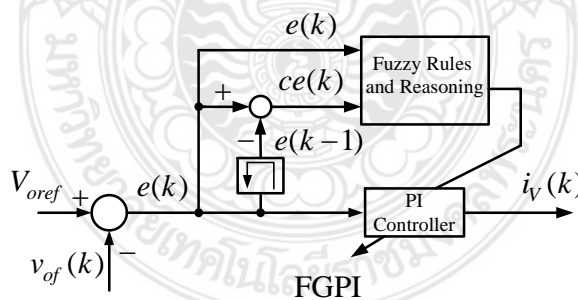
2.1 ระบบควบคุมที่นำเสนอ

พื้นฐานวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง ที่นำมาใช้ทำหน้าที่ดังกล่าวจะใช้วงจรแปลงผันแบบบูสต์ แบบซีพิกและแบบชุก ในงานวิจัยนี้เลือกวงจรแปลงผันแบบชุก เพราะว่าด้านอินพุตและด้านเอาต์พุตมีตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะทำให้กระแสไหลต่อเนื่อง แล้วส่งผลให้สามารถลดขนาดอุปกรณ์การกรองความผิดพลาดของรูปคลื่นกระแสด้านอินพุตและแรงดันด้านเอาต์พุตได้ ข้อดีของวงจรชุกอีกประเด็นหนึ่งคือการแยกโดดทางไฟฟ้าทำได้ง่าย รวมถึงแรงดันเอาต์พุตสามารถกำหนดให้มีค่ามากหรือน้อยกว่าแรงดันอินพุตได้ ตามการกำหนดแรงดันอ้างอิงแต่ทว่าโดยภาพรวมแล้ววงจรแปลงผันแบบชุก จะจัดอยู่ในระบบอันดับสี่ซึ่งจะทำให้การออกแบบการชดเชยค่าความผิดพลาดของระบบค่อนข้างยุ่งยาก สำหรับในงานวิจัยวิจัยนี้สามารถละทิ้งได้เนื่องจากการออกแบบควบคุมในรูปควบคุมแรงดันจะใช้ตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยพีซีโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (dSPIC30F6010) ควบคุมการทำงาน ส่วนในรูปควบคุมกระแสจะใช้การควบคุมแบบแอนะล็อกด้วยวงจรฮีสเตอร์ซิสซึ่งมีข้อดี คือ ง่ายต่อการออกแบบและให้ผลตอบสนองเร็ว และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าจะออกแบบให้ทำงานในโหมดการนำกระแสแบบต่อเนื่อง

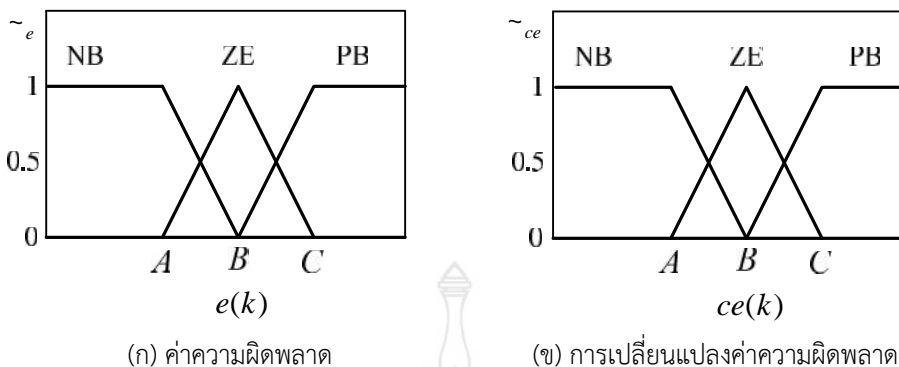
ระบบที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยวงจรกำลังและวงจรควบคุม สำหรับรูปการควบคุมแรงดันเอาต์พุตสัญญาณที่ได้รับจะเป็นคำสั่งการทำงานในรูปควบคุมกระแส ($\hat{i}_{Lref}(k)$) ซึ่งมาจากสัญญาณที่แก้ไขค่าความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุต ($i_V(k)$) บวกกับค่าของกระแสด้านอินพุต ($\hat{i}_s(k)$) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้รับคือระบบได้รับผลการตอบสนองเร็ว ส่วนการแก้ไขค่าความผิดพลาดแรงดันเอาต์พุตใช้ตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยฟัซซีแสดงดังบล็อกในรูปที่ 2 ซึ่งรายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อต่อจากนี้



รูปที่ 1 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง



รูปที่ 2 ตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยฟัซซี



รูปที่ 3 ฟังก์ชันภาวะสมาชิก

2.2 ตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยฟuzzy

หลักการของตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยฟuzzy ตัวควบคุมหลักก็คือ ตัวควบคุมแบบพีไอ แต่วิธีการของฟuzzy จะทำหน้าที่ปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอ (K_P, K_I) โดยขนาดของอัตราขยายจะขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุต ซึ่งมีขั้นตอนวิธีการดังนี้ เริ่มจากการสร้างกฎฟuzzy ประกอบด้วย 2 อินพุต คือ ค่าความผิดพลาด ($e(k)$) และการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุต ($ce(k)$) แสดงดังสมการที่ (1) และ (2) สำหรับฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตฟuzzyทั้งสอง แสดงดังรูปที่ 3 (ก) และ (ข) กฎการสร้างฟuzzy ในบทความนี้ใช้กฎจำนวน 9 กฎ ก็เพียงพอ เพื่อรองรับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบและการคุมค่าแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ โดยพิจารณาจากช่วงเวลาเข้าที่ของระบบ การพุ่งเกินและการพุ่งต่ำของแรงดันเอาต์พุต ในกรณีมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ

สำหรับการกำหนดค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอในแต่ละกรณี ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ของ NB คือ ค่าลบมาก ZE คือ ค่าศูนย์ และ PB คือ ค่าบวกมาก ตามลำดับ

$$e(k) = v_{oref} - v_{of}(k) \tag{1}$$

$$ce(k) = e(k) - e(k-1) \tag{2}$$

จากรูปที่ 3 การคำนวณหาฟังก์ชันภาวะสมาชิกของอินพุตฟuzzy แสดงดังสมการที่ (3) ถึง (5) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ กรณีที่อินพุตอยู่ในย่าน NB ($A \leq X \leq B$) ค่าฟังก์ชันภาวะสมาชิกหาได้จาก

$$\tilde{e}, \tilde{ce} = \begin{cases} 1 & : X \leq A \\ \frac{B-X}{B-A} & : A \leq X \leq B \\ 0 & : B \leq X \end{cases} \tag{3}$$

เมื่อค่าอินพุตอยู่ในย่าน ZE ($A \leq X \leq C$) ค่าฟังก์ชันภาวะสมาชิกหาได้จาก

$$\tilde{e}, \tilde{ce} = \begin{cases} 0 & : X \leq A \\ \frac{X - A}{B - A} & : A \leq X \leq B \\ \frac{C - X}{C - B} & : B \leq X \leq C \\ 0 & : C \leq X \end{cases} \quad (4)$$

และเมื่อค่าอินพุตอยู่ในย่าน PB ($B \leq X \leq C$) ค่าฟังก์ชันภาวะสมาชิก คือ

$$\tilde{e}, \tilde{ce} = \begin{cases} 0 & : X \leq C \\ \frac{X - C}{C - B} & : B \leq X \leq C \\ 1 & : C \leq X \end{cases} \quad (5)$$

เมื่อ X คือ $e(k)$ หรือ $ce(k)$

การกำหนดค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบฟuzzy โดยสมมติให้ค่า K_p อยู่ในช่วง $[K_{P(\min)}, K_{P(\max)}]$ เช่นเดียวกัน K_I ก็อยู่ในช่วง $[K_{I(\min)}, K_{I(\max)}]$ เพื่อความสะดวกค่า K_p และ K_I ปกติจะกำหนดให้อยู่ในย่านระหว่าง 0 และ 1 ถูกแปลงให้เป็นเชิงเส้นกระทำโดยใช้สมการที่ (6) และ (7) ซึ่งได้อธิบายไว้ใน [11] คือ

$$K'_p = (K_p - K_{P(\min)}) / (K_{P(\max)} - K_{P(\min)}) \quad (6)$$

$$K'_I = (K_I - K_{I(\min)}) / (K_{I(\max)} - K_{I(\min)}) \quad (7)$$

หลักการพิจารณาค่า K'_p และ K'_I จะพิจารณาได้จากฟuzzyเซต IF-THEN Rules ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{If } e(k) \text{ is } A_i \text{ and } ce(k) \text{ is } B_i, \text{ then } K'_p \text{ is } C_i \text{ and } K'_I \text{ is } D_i \\ i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (8)$$

เมื่อ A_i และ B_i คือ เซตฟuzzyของข้อมูลอินพุต ส่วน C_i และ D_i คือ เอาต์พุต ซึ่งมีค่าเป็น Big (B) หรือ Small (S) พิจารณาได้จากฟังก์ชันภาวะสมาชิกในรูปที่ 4 สำหรับการกำหนดเกณฑ์ฟuzzyจะพิจารณาจากงานวิจัยที่นำเสนอใน ซึ่งใช้หลักการพิจารณาได้จากผลการตอบสนองแบบขั้นแสดงดังรูปที่ 5 ประกอบการพิจารณา ยกตัวอย่างเช่นเมื่อเอาต์พุตมีค่าอยู่ในย่าน b_1 ระบบควบคุมต้องการค่า K_p มากเพื่อที่จะเร่งให้เอาต์พุตเข้าสู่เป้าหมายได้เร็วแต่ขณะนี้ระบบต้องการค่า K_I ที่ค่าน้อยเพื่อป้องกันการออสซิลเลตของสัญญาณเอาต์พุต ในทางกลับกันถ้าสัญญาณเอาต์พุตมีค่าอยู่ในย่าน b_3 ระบบควบคุมในขณะนี้ต้องการค่า K_I ค่ามากเพื่อให้ระบบเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเร็ว แต่ค่า K_p ต้องการค่าน้อยเพื่อป้องกันการฟุ้งเกิน โดยสรุปแสดงได้ดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

สำหรับการทำให้ไม่เป็นฟuzzyแสดงดังสมการที่ 9 และ 10

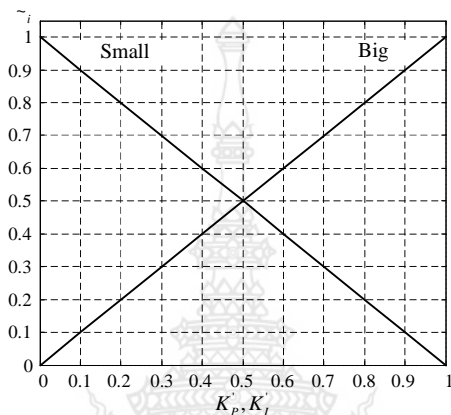
$$\sum_{i=1}^m \mu_i = 1 \quad (9)$$

$$\mu_i = \mu_e[e(k)]\mu_{ce}[ce(k)] \quad (10)$$

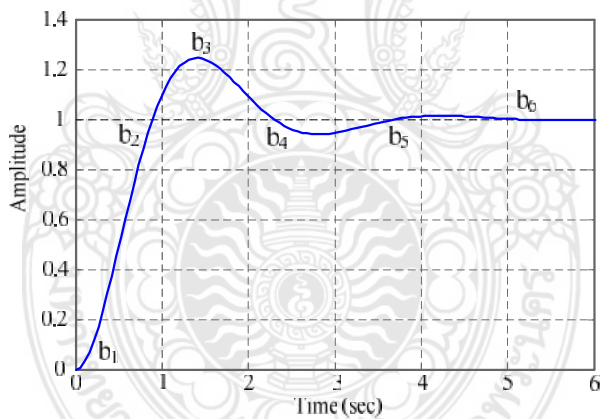
จากนั้นจะได้ว่าการกำหนดค่าเกนแบบฟัซซีสำหรับตัวควบคุมแบบพีไอ จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$K'_P = \sum_{i=1}^m \mu_i K'_{P,i} \tag{11}$$

$$K'_I = \sum_{i=1}^m \mu_i K'_{I,i} \tag{12}$$



รูปที่ 4 ฟังก์ชันภาวะสมาชิกของ K'_P และ K'_I



รูปที่ 5 สัญญาณแบบขั้นสำหรับพิจารณาค่า K'_P และ K'_I

ตารางที่ 1 กฎฟัซซีของ K'_P

$\Delta e(k)$ \ $e(k)$	NB	ZE	PB
NB	B	B	B
ZE	S	S	S
PB	B	B	B

ตารางที่ 2 กฎฟuzzyของ K_I'

$\Delta e(k)$ / $e(k)$	NB	ZE	PB
NB	S	B	S
ZE	B	B	B
PB	S	B	S

2.3 การออกแบบการควบคุมแรงดันเอาต์พุต

ขั้นตอนวิธีการหาค่า K_p' และ K_I' ของตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยฟuzzyผลลัพธ์ที่ได้รับจะนำไปสู่การหาค่า K_p และ K_I เพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ ซึ่งมีวิธีการ ดังต่อไปนี้

คำนวณหาค่าความผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดของแรงดันเอาต์พุตจากสมการที่ (1) และ (2) จากนั้นคำนวณหาฟังก์ชันภาวะสมาชิกของอินพุตฟuzzy แล้วนำฟังก์ชันภาวะสมาชิกของค่าความผิดพลาดคูณกับการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดตามสมการที่ (10) ซึ่งเป็นวิธีพิจารณาการเข้าสู่กฎฟuzzy เมื่อได้ฟังก์ชันภาวะสมาชิก แล้วซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกับการกำหนดค่าอัตราขยาย K_p' และ K_I' สามารถหาค่าได้จากรูปที่ 4 พบว่าค่า 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 4 วิธีการทำให้ไม่เป็นฟuzzyปฏิบัติได้ดังสมการที่ (11) และ (12) สุดท้ายสามารถคำนวณหาค่าเกณฑ์ของ K_p และ K_I ได้จากสมการที่ (13) และ (14) ตามลำดับ

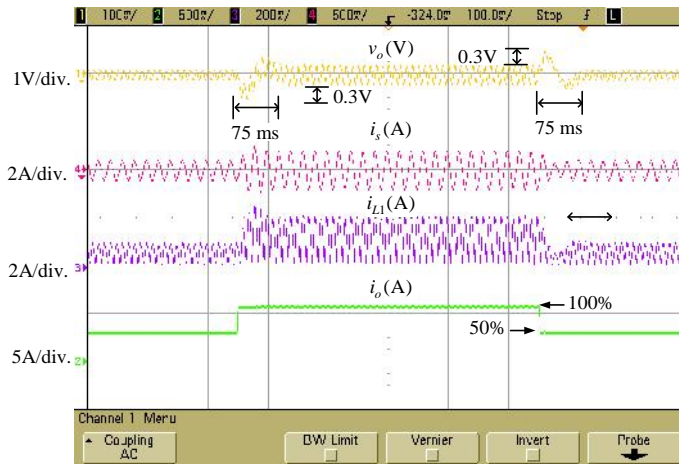
$$K_p = (K_{p(max)} - K_{p(min)})K_p' + K_{p(min)} \tag{13}$$

$$K_I = (K_{I(max)} - K_{I(min)})K_I' + K_{I(min)} \tag{14}$$

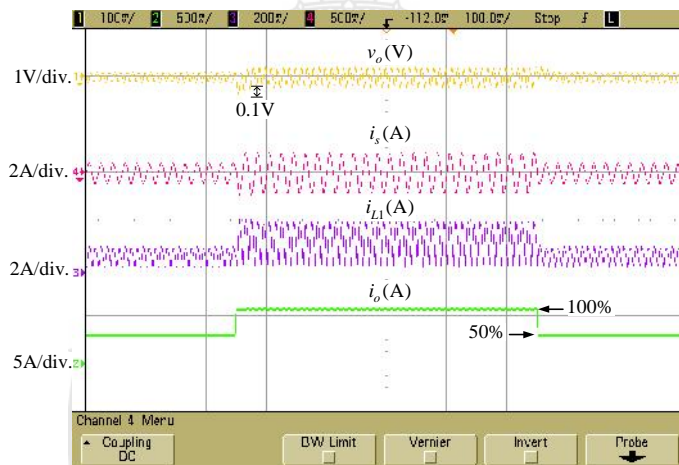
การกำหนดเกณฑ์ต่ำสุด สูงสุดของตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยฟuzzy ($[K_{p(min)}, K_{p(max)}]$ และ $[K_{I(min)}, K_{I(max)}]$) จะกำหนดโดยอ้างอิงค่าเกณฑ์อยู่ในขอบเขตของการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอบนโดเมนความถี่ประกอบ เมื่อกำหนดความถี่ตัดผ่านเท่ากับ 10Hz และเฟสมาร์จินเท่ากับ 70° จะได้ K_p เท่ากับ 4.4 และ K_I เท่ากับ 126 ดังนั้นจึงกำหนดค่าอัตราขยายของ $K_p[K_{p(min)}, K_{p(max)}] = K_p[4, 10]$ และ $K_I[K_{I(min)}, K_{I(max)}] = K_I[126, 200]$ สำหรับการสุ่มค่าสัญญาณมาคำนวณค่าสั่งกระแส ($i_{Lref}(k)$) จะสุ่มสัญญาณมาคำนวณทุกๆ 250 μs ตามลำดับ

ตารางที่ 3 รายละเอียดของระบบที่นำเสนอ

รายการ	ค่าพารามิเตอร์
แรงดันอินพุต	220V 50Hz
แรงดันเอาต์พุต	-48V
พิกัดกำลังงานเอาต์พุต	250W
ตัวเก็บประจุ C_a และ C_b	0.68 μF
อัตราส่วนของหม้อแปลงแยกโดด 1 : a	0.5
ตัวเก็บประจุ C_o	20,400 μF
ตัวเหนี่ยวนำด้านอินพุต L_1	1mH
ตัวเหนี่ยวนำด้านเอาต์พุต L_2	5mH
อัตราขยายแรงดันเอาต์พุต G_{TV}	1/12
อัตราขยายกระแสอินพุต G_{TI}	10/3
FGPI [K_{pmin}, K_{pmax}], [K_{Imin}, K_{Imax}]	[4 10], [126 200]



รูปที่ 6 ผลการทดสอบกรณีใช้ตัวควบคุมแบบพีโอ



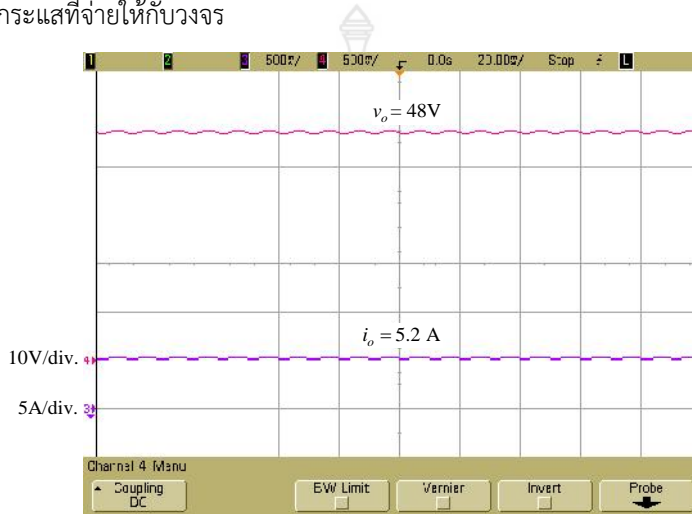
รูปที่ 7 ผลการทดสอบกรณีใช้ตัวควบคุมแบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

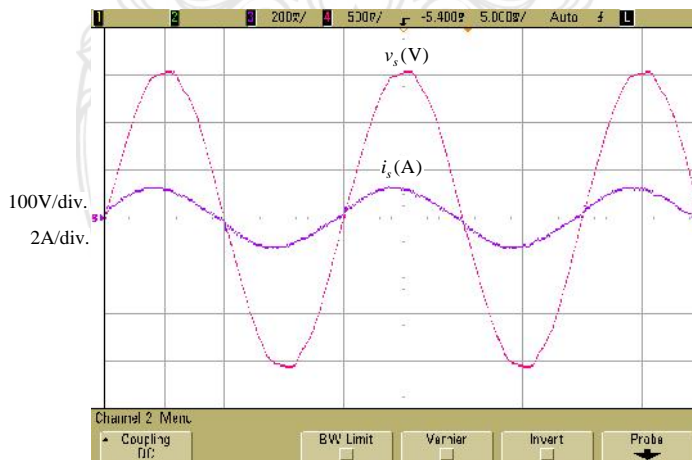
การทดสอบระบบที่นำเสนอใช้วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงที่มีการแยกโดดโดยใช้ วงจรพื้นฐานแบบชุก รายละเอียดของวงจรแสดงดังตารางที่ 3 การสุ่มสัญญาณเพื่อนำมาคำนวณคำสั่งกระแสใน ลูปควบคุมแรงดัน ในระบบนี้จะใช้เวลา $250 \mu\text{s}$ สำหรับการทดสอบระบบควบคุมที่นำเสนอจะทดสอบการทำงาน 2 สภาวะคือ การทำงานในกรณีที่สัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ และขณะที่ระบบทำงานในสถานะอยู่ตัว ซึ่งการวัด แรงดันเอาต์พุตและกระแสโหลดจะวัดกลับสัญญาณ

การทำงานของระบบขณะมีการรบกวนเข้ามาในระบบ ทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใด จากโหลด 50% เป็น 100% แล้วกลับมาที่ 50% แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6 และ 7 โดยรูปที่ 6 กรณีใช้ตัวควบคุม พีโอแบบดั้งเดิม จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าขณะมีการรบกวนเข้ามาในระบบแรงดันที่บัสไฟฟ้ากระแสตรงมีแรงดัน พุงต่ำและเกินประมาณ 0.3V และตัวควบคุมต้องใช้เวลาประมาณ 75ms เพื่อให้ควบคุมแรงดันเอาต์พุตคงที่ ในทาง ตรงกันข้ามเมื่อใช้ตัวควบคุมพีโอแบบกำหนดเกณฑ์ด้วยพีซีผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าระบบได้รับการ ตอบสนองเร็วขณะมีการรบกวนเข้ามาในระบบ รวมถึงมีแรงดันพุงต่ำและพุงเกินน้อย

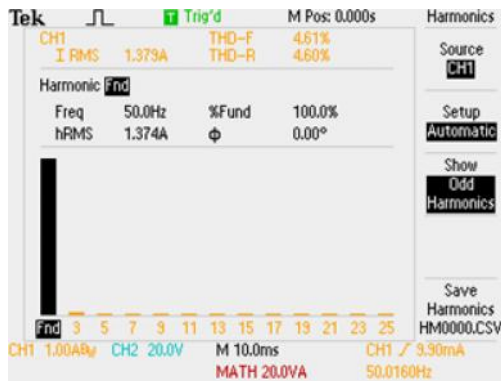
การทดสอบการทำงานในสถานะอยู่ตัว แสดงผลการทดสอบทางด้านอินพุต เพื่อพิจารณาค่าคุณภาพทางไฟฟ้า ส่วนด้านเอาต์พุตสำหรับพิจารณาการคุ่มค่าแรงดันเอาต์พุต รูปที่ 8 แสดงรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่โหลดขณะจ่ายโหลดที่พิกัด (250W) พบว่าระบบสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตคงที่ ส่วนรูปที่ 9 แสดงรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านอินพุต จะเห็นได้ว่ากระแสด้านอินพุตมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์และมีเฟสตรงกับแรงดันอินพุต ส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง เมื่อใช้ออสซิลโลสโคปยี่ห้อ Tektronix รุ่น TPS2000 วิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์อันดับคี่และคู่แสดงดังรูปที่ 10 (ก) และ (ข) จะเห็นได้ว่าอันดับฮาร์มอนิกส์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ยกเว้นอันดับพื้นฐานเป็นขนาดของกระแสที่จ่ายให้กับวงจร



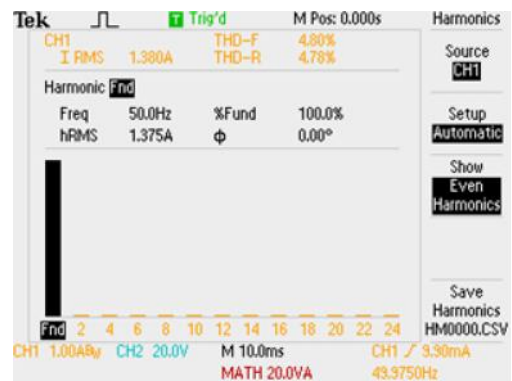
รูปที่ 8 แรงดันและกระแสที่เอาต์พุต



รูปที่ 9 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านอินพุต

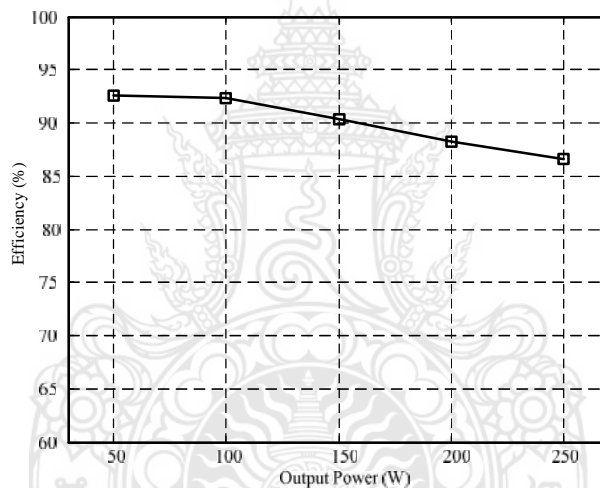


(ก) ฮาร์มอนิกอันดับคี่ของกระแสด้านอินพุต

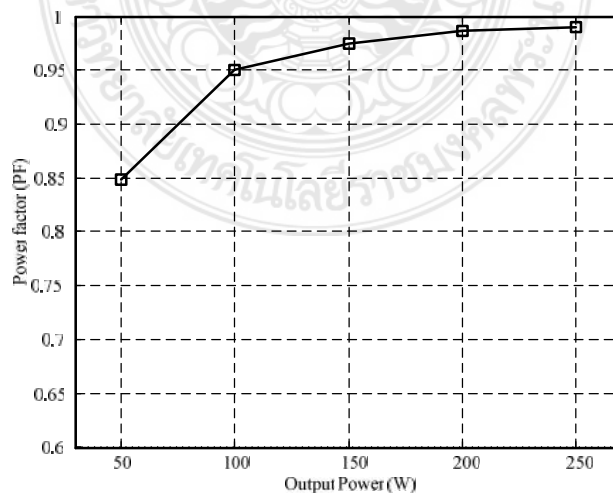


(ข) ฮาร์มอนิกอันดับคู่ของกระแสด้านอินพุต

รูปที่ 10 อันดับฮาร์มอนิกของกระแสด้านอินพุต

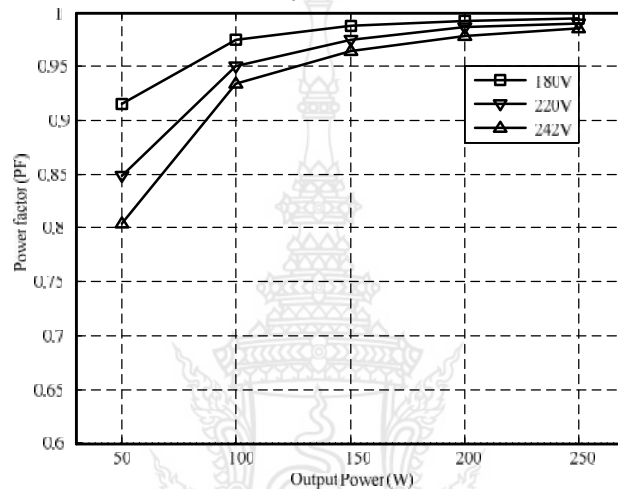


รูปที่ 11 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรขณะจ่ายโหลด 50W ถึง 250W แรงดันอินพุต 220V



รูปที่ 12 ผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังของวงจรขณะจ่ายโหลด 50W ถึง 250W แรงดันอินพุต 220V

การประเมินประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่พิกัด 50W 100W 150W 200W และ 250W แรงดันอินพุต 220V มีผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 93% ขณะจ่ายโหลด 50W และต่ำสุดประมาณ 86% ที่พิกัดโหลดสูงสุด ส่วนการพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังของวงจร (Power Factor) พิจารณาได้จากรูปที่ 12 และ 13 ในรูปที่ 12 ผลการทดสอบเมื่อกำหนดแรงดันอินพุตคงที่ 220V ขณะจ่ายโหลดที่พิกัด 50W 100W 150W 200W และ 250W จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าระบบมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่ง เช่นเดียวกันในรูปที่ 13 เมื่อกำหนดให้แรงดันอินพุต 180V 220V และ 242V จะเห็นได้ว่าระบบมีค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงหนึ่งพบได้ขณะที่จ่ายโหลดสูงสุด



รูปที่ 13 ผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังของวงจรขณะจ่ายโหลด 50W ถึง 250W แรงดันอินพุต 180V 220V และ 242V

4. สรุป

การออกแบบระบบควบคุมสำหรับควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสดตรงที่นำเสนอในบทความนี้ อ้างอิงผลการทดสอบการทำงานของระบบทั้งในสถานะอยู่ตัวและการตอบสนองชั่วคราวพบว่า วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าสามารถคุมค่าแรงดันเอาต์พุตคงที่ ระบบมีการตอบสนองเร็วกรณีมีการรบกวนเข้ามาในระบบเมื่อเทียบกับตัวควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม เห็นได้ชัดเจนจากเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอต้องใช้เวลา 75ms ในส่วนรูปคลื่นของกระแสด้านอินพุตมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสด้านอินพุตมีค่าต่ำ รวมถึงกระแสด้านอินพุตมีเฟสตรงกับแรงดันด้านอินพุต เป็นเหตุให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง (0.98) และประสิทธิภาพโดยรวมของวงจรประมาณ 86% ขณะทำงานที่พิกัด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ในทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ (MRG5580123) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- Francisco Javier Azcondo Angel de Castro Víctor Manuel López and Oscar García M. 2010. **Power Factor Correction Without Current Sensor Based on Digital Current Rebuilding**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS. VOL. 25. NO. 6: 1527-1536.
- Hung-Chi Chen. 2009. **Single-Loop Current Sensorless Control for Single-Phase Boost-Type SMR**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS. VOL. 24. NO. 1: 163-171.
- Javier Sebastián, Diego G. Lamar, Marta María Hernando, Alberto Rodríguez-Alonso and Arturo Fernández. 2009. **Steady-State Analysis and Modeling of Power Factor Correctors With Appreciable Voltage Ripple in the Output-Voltage Feedback Loop to Achieve Fast Transient Response**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS. VOL. 24, NO. 11: 2555-2566.
- Fei Zhang and Jianping Xu. 2011. **A Novel PCCM Boost PFC Converter With Fast Dynamic Response**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS. VOL. 58. NO. 9: 4207-4216.
- A. Fernández J. Sebastih P. Villegas M.M. Hernando and J. Garcia. 2005. **Dynamic Limits of a Power-Factor Preregulation**. IEEE Ind. Electron. Vol. 52.: 71-87.
- ยุทธนา กัณฑ์พะเยา และวิบูลย์ ชื่นแขก. 2555. การวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมพีไอแบบกำหนดเกณฑ์ฟัซซีสำหรับควบคุมวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON-35): 433-436
- Jian Sun. 2005. **Input Impedance Analysis of Single-Phase PFC Converters**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS. VOL. 20. NO. 2: 308-314.
- Ahmad J. Sabzali, Member, IEEE, Esam H. Ismail tafa A. Al-Saffar and Abbas A. Fardoun. 2011. **New Bridgeless DCM Sepic and Cuk PFC Rectifiers With Low Conduction and Switching Losses**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. VOL. 47 NO. 2: 873-881.
- Hongbo Ma Jih-Sheng Lai Quanyuan Feng Wensong Yu Cong Zheng and Zheng Zhao. 2012. **A Novel Valley-Fill SEPIC-derived Power Supply Without Electrolytic Capacitors for LED Lighting Application**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS VOL. 27 NO. 6: 3057-3071.
- Ahmad J. Sabzali Esam H. Ismail stafa A. Al-Saffar and Abbas A. Fardoun. 2011. **New Bridgeless DCM Sepic and Cuk PFC Rectifiers With Low Conduction and Switching Losses**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS VOL. 47 NO. 2: 873-881.
- Yutthana Kanthaphayao Viboon Chunkag and Uthen Kamnarn. 2011. **Fuzzy Gain Scheduling of PI Controller for Distributed Control of Parallel AC/DC Converters**. IJICIC. Vol. 7.:6757-6771.