

## อินเวอร์เตอร์ 1 เฟสสองทิศทางแบบเชื่อมกริดที่ควบคุมกระแส

### ด้วยฮิสเตอร์ซิสแบบดับเบิลแบนด์

#### Single-Phase Grid Connected Bidirectional Inverter

#### with Double-band Hysteresis Current Control

ตะวัน ลาเสือ<sup>1</sup>, ธาดา ชวนาพิทักษ์<sup>1</sup>, โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง<sup>1\*</sup>

หัตถุละ สภาวะจันทร์<sup>1</sup> และ พีรวัฒน์ มีสุข<sup>2</sup>

Tawan Lasue<sup>1</sup>, Tada Chawanapitak<sup>1</sup>, Koson Chaicharoenaudomrung<sup>1\*</sup>

Hatta Sawachan<sup>1</sup> and Peerawat Meesuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและระบบควบคุมอัตโนมัติ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok

<sup>2</sup>Electrical Engineering and Automation Control System Program, Department of Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok

\*Corresponding author email: koson.c@cit.kmutnb.ac.th

Received 7 Aug 2022 Revised 14 Oct 2022 Accepted 15 Nov 2022

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนออินเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบเชื่อมกริดที่ควบคุมกระแสด้วยฮิสเตอร์ซิสแบบดับเบิลแบนด์ ซึ่งมีโหมดการทำงาน 2 โหมด ได้แก่ โหมดเรียงกระแสและโหมดอินเวอร์เตอร์ โคร่งสร้างการควบคุมประกอบด้วยวงรอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ตัวควบคุมพีเอและออคัยการควบคุมแบบฮิสเตอร์ซิสแบบดับเบิลแบนด์ควบคุมกระแสไฟฟ้าในวงรอบกระแส สมรรถนะการควบคุมด้วยวิธีที่นำเสนอถูกตรวจสอบด้วยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และชุดทดสอบต้นแบบพิกัด 300 วัตต์ จาก

ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกัน ผลการทดสอบการทำงานในโหมดเรียงกระแสแสดงให้เห็นได้ว่ากริดจ่ายกำลังไฟฟ้า 355 วัตต์ ผ่าน วงจรอินเวอร์เตอร์ไปยังโหลดตัวต้านทาน สำหรับการทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์กำลังไฟฟ้า ที่ถ่ายโอนเข้าสู่กริดมีค่าเท่ากับ 281 วัตต์ โดยแรงดันไฟฟ้าด้านไฟฟ้ากระแสตรงของทั้ง 2 โหมดยังคงถูกรักษาไว้ที่ 400 โวลต์ นอกจากนี้ยังมีผลการทดสอบผลตอบสนองในสถานะชั่วขณะที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยระบบควบคุม สามารถรักษาระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตคงที่ 400 โวลต์

**คำสำคัญ:** อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส, อินเวอร์เตอร์กริดไทน์, วงจรแปลงผันสองทิศทาง

### Abstract

This article presents a single-phase grid connected bidirectional inverter with hysteresis current control. It can operate in two modes: rectifier mode and inverter mode. The control consists of a voltage control loop that uses a PI controller and double-band hysteresis controls the current in the current loop. The control performance of the proposed method was verified by simulation using MATLAB/Simulink program and a 300 W single-phase bidirectional inverter prototype. The simulation results and experimental results show that is consistent. The experimental results of the rectifier mode show that the grid supplies 355 watts of power through the bidirectional inverter to the resistive load. Operating in inverter mode, the power transferred to the grid is 281 watts, with the DC voltage in both modes was still regulated at 400 V. In addition, there are transient responses showing the efficiency of DC voltage regulation.

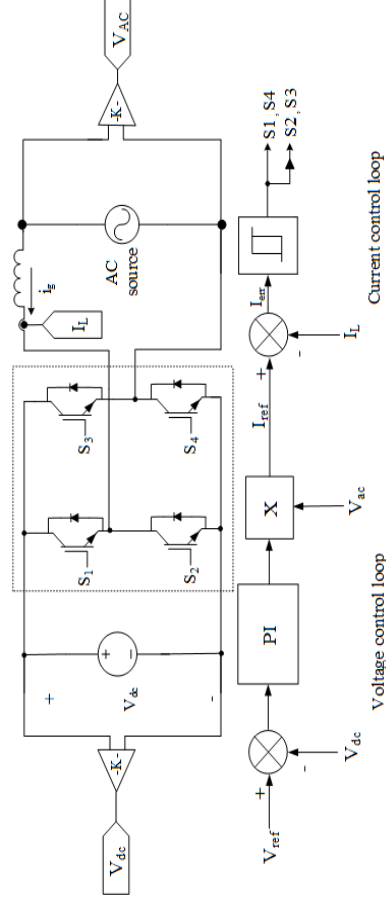
**Keywords:** Single-phase inverter, Grid tie inverter, Bidirectional power converter

### บทนำ

ในปัจจุบันมีแหล่งพลังงานทดแทนมากขึ้นไม่ว่าจะเป็น โซลาร์เซลล์ หรือแหล่งกักเก็บพลังงานจำพวกแบตเตอรี่ (Khezri, Mahmoudi and Haque ,2020) (Sangwongwanich, Yang and Blaaberger,2016 ) (Zhang, Sun, Li, Lu, and Zhao, 2018 ) โดยตั้งที่กล่าวมาเป็นแหล่งจ่ายกระแสตรง ซึ่งหากต้องการแปลงเป็นแหล่งจ่ายกระแสสลับเพื่อจ่าย

ให้กับกริดการไฟฟ้าหรือจำเป็นต้องการแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ จำเป็นต้องอาศัยวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง โดยบทความนี้จะกล่าวถึงอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสสองทิศทางแบบเชื่อมกริดที่ทำงานในโหมดเรียงกระแสและโหมดอินเวอร์เตอร์ (เจตน บัญญัติแรก และรัชชานนท์ แซ่มัญชิตย์, 2564) (เชตุพล อิมทิม และรัชชัย ผ่องแผ้ว, 2562) (ชินวัตร มีช้าง และสะการเดือน สันธิวาส, 2560)

อินเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบเชื่อมกริดเป็นคอนเวอร์เตอร์แบบมีสวิตช์ไอจีบีทีทั้ง 4 ตัว การทำงานโดยทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับได้ โดยการทำงานของคอนเวอร์เตอร์จะต้องมีการควบคุมกระแสที่ออกจากคอนเวอร์เตอร์ ( $i_g$ ) และแรงดันที่ตีซิปส์ ( $V_{dc}$ ) ดังรูปที่ 1 ตัวควบคุมแบบฮิสเตอร์ริซิส ในคอนเวอร์เตอร์นี้ใช้วงรอบควบคุมแรงดัน ( $V_{dc}$ ) ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และวงรอบการควบคุม



ภาพที่ 1 อินเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบเชื่อมกริดที่ควบคุมด้วยฮิสเตอร์ริซิสแบบซิงเกิลแบนด์

กระแส ( $i_g$ ) ใช้ตัวควบคุมแบบฮิสเตอร์ริซิสแบบซิงเกิลแบนด์ ซึ่งเป็นวิธีที่เรียบง่ายเมื่อเทียบกับวิธีการปรับเบิกลูเอ็หรือวิธีเวกเตอร์การสวิตช์ อย่างไรก็ตามการควบคุมกระแสด้วยฮิสเตอร์ริซิสแบบซิงเกิลแบนด์จะมีความถี่สวิตช์สูง ทำให้เกิดการสูญเสียจากการสลับสวิตช์ (Switching Loss) ใกล้เคียงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบฮิสเตอร์ริซิสแบบดับเบิลแบนด์ (Komurcugil, 2015) (Komurcugil and Kukrer, 2015)

ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการควบคุมกระแสด้วยฮิสเตอร์ริซิสแบบดับเบิลแบนด์สำหรับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสสองทิศทางแบบเชื่อมกริด โดยดำเนินการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นจึงทำการออกแบบและสร้างชุดต้นแบบขนาดพิกัด 300 W ดำเนินการทดสอบเพื่อยืนยันสมรรถนะของการควบคุมที่นำเสนอ

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 1. วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส

โดยทั่วไปวงจรฟูลบริดจ์ ประกอบด้วย สวิตช์ 4 ตัว ดังรูปที่ 2 ซึ่งปกติจะนิยมขับ นำสวิตช์ให้ตัดต่อวงจรไขว้กัน เพื่อสร้าง แรงดันออกเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมสวิตช์ของ วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ทำงานพร้อม กันเป็นคู่' ซึ่งจะได้สัญญาณขาออกเป็น รูปคลื่นสี่เหลี่ยม

### 1. ผลตอบสนองของกระแสที่กิริต ( $i_g$ ) ในสถานะคงตัวกับการสับสวิตช์ของ วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

การสับสวิตช์ของวงจรฟูลบริดจ์ อินเวอร์เตอร์ที่แสดงในรูปที่ 2 นั้นการ เปิด/ปิด สวิตช์แต่ละรูปแบบนั้นจะส่งผลให้ เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อกระแสที่กิริต ( $i_g$ ) ที่แตกต่างกันโดยสามารถวิเคราะห์ ผลกระทบได้เป็นกรณีนี้ที่แรงดันที่กิริต ( $v_g$ ) เป็นบวกและเป็นลบ ในกรณีนี้ที่แรงดันกิริต

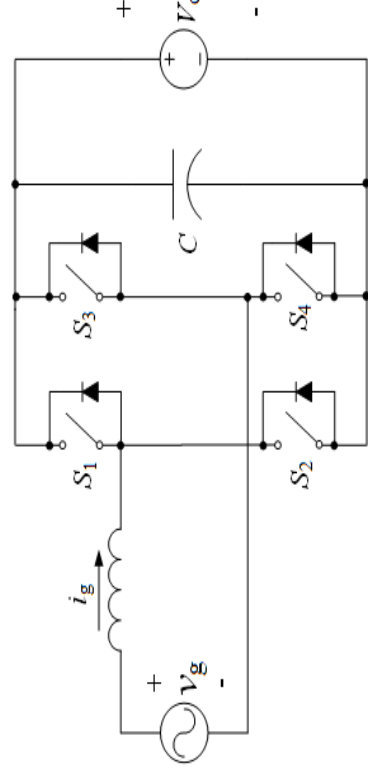
เป็นบวก ( $+v_g$ ) และแรงดันที่กิริตเป็นลบ ( $-v_g$ ) รูปแบบการสับสวิตช์สามารถเป็นไปได้หลายรูปแบบสำหรับในบทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์ในเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- ในการพิจารณาถือว่าสวิตช์เป็นอุดมคติและไม่มีค่าความต้านทานแฝงในตัวเมียนำ

- รูปแบบการสับสวิตช์จะไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรที่แรงดันกระแสตรงขาออก
- การสับสวิตช์ของวงจรงจรฟูลบริดจ์จะสับ สวิตช์เป็นคู่

- การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ กระแสที่กิริตเป็นการพิจารณาในสถานะคงตัว
- พิจารณา  $V_g$  เท่ากับค่ายอดของแรงดัน ที่กิริต (311 V) และ แรงดันของเอาต์พุตของ คอนเวอร์เตอร์ ( $V_o$ ) เป็นค่าที่ (400 โวลต์)

ไม่มีการกระเพื่อม



ภาพที่ 2 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 1 เฟสที่พิจารณา

การพิจารณากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ โดยพิจารณาจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ( $V_L$ ) โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำกับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (1)

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

จัดสมการใหม่ได้

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} V_L \Delta T \quad (2)$$

โดย

$\Delta i_L$  คือ การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่

ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

$L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำ

$V_L$  คือ แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

$\Delta T$  คือ ช่วงเวลาการสับสวิตซ์

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาไม่นำค่าความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) และช่วงเวลากการสับสวิตซ์ ( $\Delta T$ ) มาพิจารณาด้วยเนื่องจากเป็นค่าคงที่และกำหนดให้ช่วงเวลากการสับสวิตซ์เท่ากับทุกช่วงเวลา กำหนดให้กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ ) คือกระแสที่

กริต ( $i_g$ ) จึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (3)

$$\Delta i_g = \Delta i_L \alpha V_L \quad (3)$$

### ตารางที่ 1 รูปแบบการสับสวิตซ์เพื่อใช้ควบคุมกระแสที่กริตขณะแรงดันกริตเป็นบวก

สวิตซ์ รูปแบบ	$S_1$	$S_3$	$S_2$	$S_4$	$i_g / \Delta i_g$
1	on	off	off	on	ลดลง (-) เพิ่มขึ้น (+)
2	on	off	off	on	ลดลง (-) เพิ่มขึ้น (+)

### ตารางที่ 2 รูปแบบการสับสวิตซ์เพื่อใช้ควบคุมกระแสที่กริตขณะแรงดันกริตเป็นลบ

สวิตซ์ รูปแบบ	$S_1$	$S_3$	$S_2$	$S_4$	$i_g / \Delta i_g$
1	off	on	on	off	เพิ่มขึ้น (+) ลดลง (-)
2	off	on	on	off	เพิ่มขึ้น (+) ลดลง (-)

จากการพิจารณาตามตารางที่ 1 และ

คุณลักษณะที่กำหนดมาข้างต้นทำให้ทราบ

ได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่กิริตเป็น

ขณะแรงดันกิริตเป็นบวกและเป็นลบดัง

ตารางที่ 2

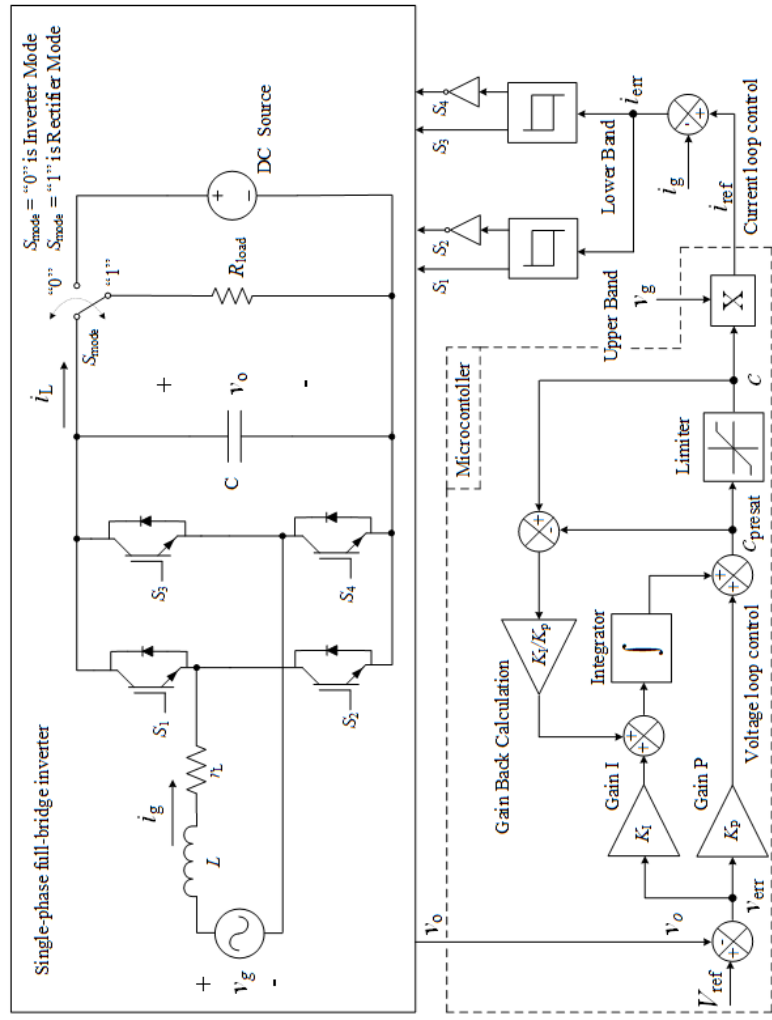
## 2. หลักการควบคุมของอินเวอร์เตอร์ 1

### เฟส สองทิศทางแบบเชื่อมกิริต

โครงสร้าง การควบคุมของ

อินเวอร์เตอร์ 1 เฟสสองทิศทางแบบเชื่อม

กิริตแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 อินเวอร์เตอร์ 1 เฟสสองทิศทางแบบเชื่อมกิริตที่ควบคุมด้วยฮิสเตอร์ซิสแบบดับเบิล

แบนด์

การควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ส่วนสำคัญ

ประกอบด้วย ส่วนของวงรอบนอก (วงรอบ

แรงดัน) และวงรอบใน (วงรอบกระแส)

โดยสองวงรอบสำคัญนี้มีไว้เพื่อการควบคุม

แรงดันที่เอาต์พุต ( $V_o$ ) และวงรอบกระแสมี

ไว้เพื่อควบคุมกระแสที่กิริต( $i_g$ ) ให้เป็นไซน์

(Sinusoidal) โดยภายในวงรอบแรงดันจะ

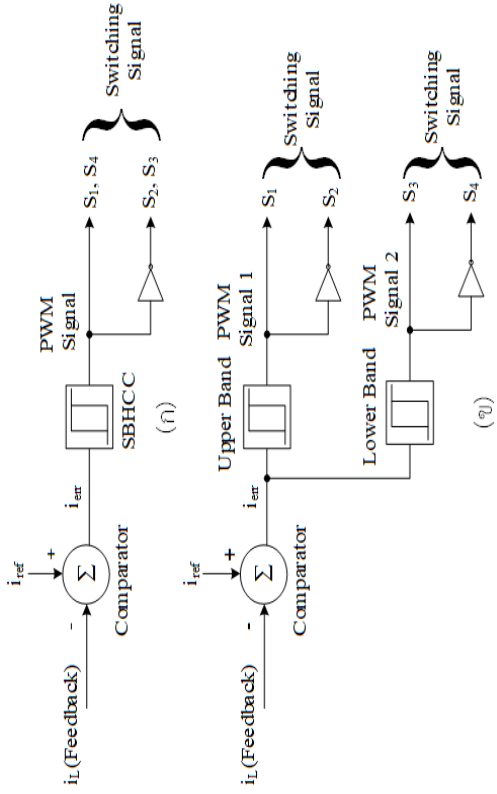
ใช้เทคนิคการควบคุมแบบแปรผันตรง (P)

และแบบอินทิเกรต (I) ร่วมกัน อย่างไรก็ตาม

ตามหากำหนดฮิสเตอร์ไว้จำกัดกระแสที่ก

ริที่จะทำให้ช่วงเริ่มต้นจะมีกระแสที่กิริตสูงเกินกว่าที่สวิตช์ไอจีบีทีจะทนได้ จึงมีความจำเป็นต้องมีลิมิตเตอร์และแอนติไวฟ (Anti-Windup) ช่วยในการป้องกันจำกัดกระแสที่กิริตและป้องกันการสะสมของอินทิเกรตเตอร์ ( $I$ ) เพื่อให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เอาต์พุต ( $V_o$ ) มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับแรงดันอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) โดยหลักการทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำแรงดันอ้างอิง เปรียบเทียบกับแรงดันกระแสตรงขาออกเพื่อหาความผิดพลาด ( $V_{err}$ ) นำไปขยายความผิดพลาดด้วยตัวควบคุมและใส่เข้าสู่วงรอบควบคุมกระแสต่อไป สำหรับวงรอบควบคุมกระแสเป็นการควบคุมปริมาณกระแสสลับ จึงยากต่อการควบคุมด้วยพีไอ จึงใช้เทคนิคฮิสเทอรีซิสเปิด/ปิด การทำงานไอจีบีทีเป็นลำดับตามการเคลื่อนตัวของปริมาณกระแสขอบเขตที่กำหนด กระแสอ้างอิง ( $i_{ref}$ ) ได้มาจากเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์คูณด้วยแรงดันกิริต เพื่อให้เป็นปริมาณกระแสสลับ จากนั้นค่ากระแสผิดพลาด ( $i_{err}$ ) คือผลต่างระหว่างกระแสที่กิริต ( $i_g$ ) และกระแสอ้างอิง ( $i_{ref}$ ) จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับขอบเขตกระแสบน (HB) และ

ขอบเขตศูนย์ (HO) และขอบล่าง (HL) ผลที่ได้จะเป็นรูปแบบของการ ปิด-เปิดสวิตช์ไอจีบีทีโดยมีลักษณะกระแสที่กิริตเทคนิคการควบคุมกระแสโดยใช้ฮิสเทอรีซิสโดยทั่วไปในวงรอบควบคุมกระแสจะใช้เทคนิคการควบคุมกระแสโดยใช้ฮิสเทอรีซิสแบบซิงเกิลแบนด์ (Single band hysteresis current control; SBHCC) ซึ่งกำหนดความกว้างของแบนด์ที่ตั้งแสดงในภาพที่ 4 (ก) สำหรับเทคนิคการควบคุมกระแสโดยใช้ฮิสเทอรีซิสแบบดับเบิลแบนด์ (Double band hysteresis current control; DBHCC) ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) เทคนิคนี้มีการสลับสวิตช์ที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมกระแสแบบซิงเกิลแบนด์ ตารางที่ 3 และตารางที่ 4 แสดงรูปแบบการสวิตช์ของการควบคุมกระแสด้วยฮิสเทอรีซิสแบบซิงเกิลแบนด์และแบบดับเบิลแบนด์ตามลำดับ



ภาพที่ 4 การควบคุมกระแสด้วยฮิสเทอรีซิส

(ก) Single-Band Hysteresis Current Control

(ข) Double-band Hysteresis Current Control

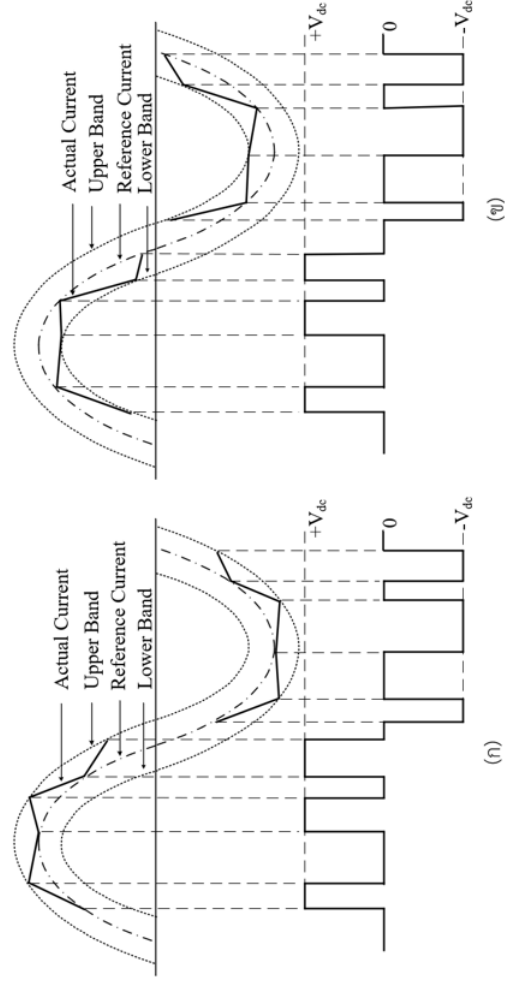
ตารางที่ 3 Single-Band Hysteresis Current Control

สวิตช์ รูปแบบ	$S_1$	$S_3$	$S_2$	$S_4$	$i_g / \Delta i_g$
แรงดันกริดเป็นบวก (vg)	off	on	on	off	เพิ่มขึ้น (+)
	on	off	off	on	ลดลง (-)
แรงดันกริดเป็นลบ (-vg)	off	on	on	off	เพิ่มขึ้น (+)
	on	off	off	on	ลดลง (-)

ตารางที่ 4 Double-band Hysteresis Current Control

สวิตช์ รูปแบบ	$S_1$	$S_3$	$S_2$	$S_4$	$i_g / \Delta i_g$
แรงดันกริดเป็นบวก (vg)	on	off	off	on	เพิ่มขึ้น (+)
	on	on	off	off	ลดลง (-)
แรงดันกริดเป็นลบ (-vg)	off	on	on	off	เพิ่มขึ้น (+)
	on	on	off	off	ลดลง (-)





ภาพที่ 5 การทำงานของฮิสเทอรีซิสแบบดับเบิลแบนด์

(ก) โหมดเรียงกระแส

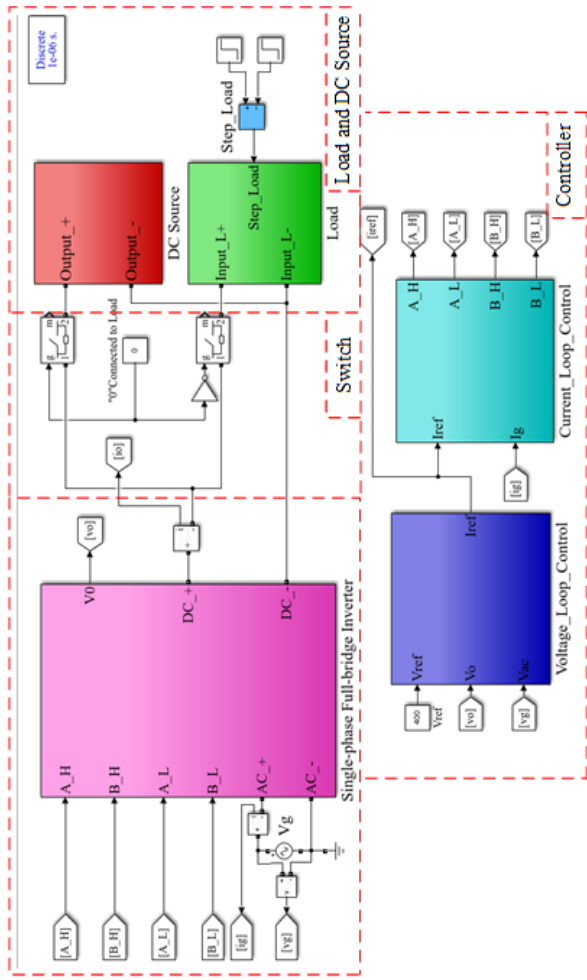
(ข) โหมดอินเวอร์เตอร์

ผลที่ได้จากรูปแบบของการ ปิด-เปิด สวิตช์ไอจีบีทีของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สองทิศทางแบบเชื่อมกริดที่ควบคุมด้วยฮิสเทอรีซิสแบบดับเบิลแบนด์ มีลักษณะ กระแสที่กริด ขณะควบคุมในโหมดเรียง กระแสและโหมดอินเวอร์เตอร์ แสดงใน ภาพที่ 5

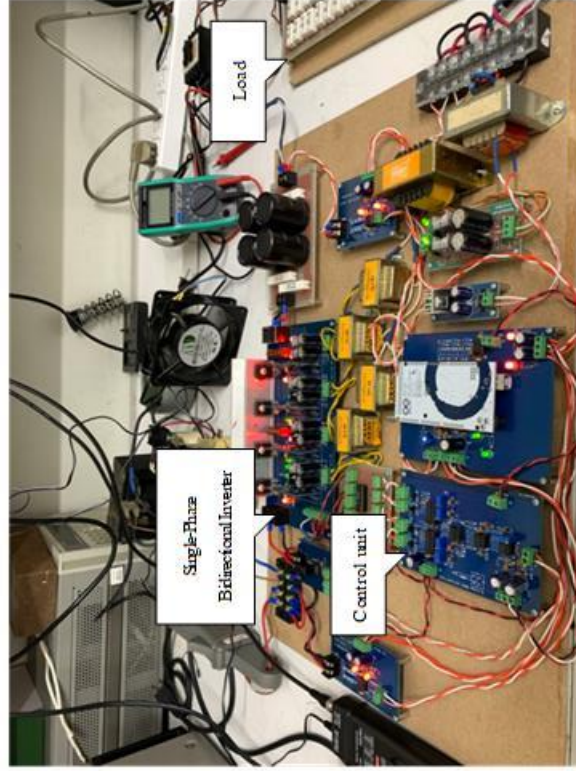
### ผลการดำเนินงาน

การจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์ 1 เฟสสองทิศทางแบบเชื่อมกริดแสดงในภาพ ที่ 6 โดยจะจำลองการทำงานในโหมดเรียง กระแสและโหมดอินเวอร์เตอร์โดยเมื่อปรับ

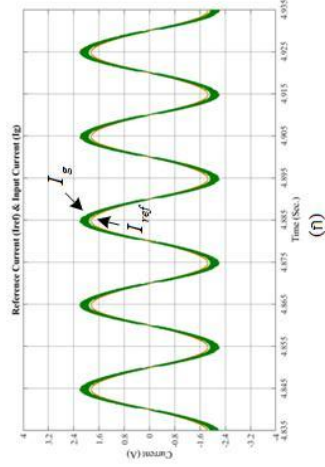
ลอจิกที่สวิตช์ (Switch) เท่ากับศูนย์จะทำให้ ให้เบรกเกอร์ เชื่อมต่อวงจรฟูลบริดจ์ อินเวอร์เตอร์ 1 เฟสสองทิศทาง กับโหมด ความต้านทานและเมื่อหากปรับลอจิกสวิตช์ เท่ากับหนึ่งจะทำให้เบรกเกอร์เชื่อมต่อวงจร ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส กับแหล่งจ่าย กระแสตรง ในภาพที่ 7 แสดงภาพรวมของ อุปกรณ์ทดสอบอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สองทิศทางต้นแบบพิกัด 300 W โดยมี แรงดันกริด 230 V 50 Hz ตัวเหนี่ยวนำ 10.8 mH โหมดตัวต้านทาน 500  $\Omega$  และ ควบคุมด้วยบอร์ด Arduino Mega 2560



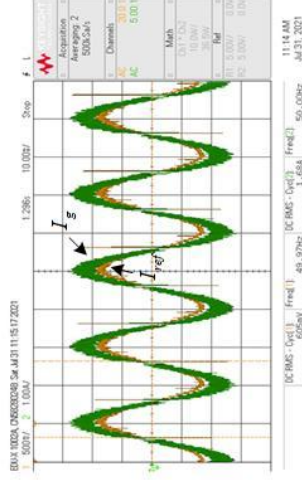
ภาพที่ 6 การจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสสองทิศทาง



ภาพที่ 7 ชุดทดสอบอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสสองทิศทางแบบเชื่อมกริด



(ก)



(ข)

### ภาพที่ 8 กระแสที่กริดในโหมดเรียงกระแส

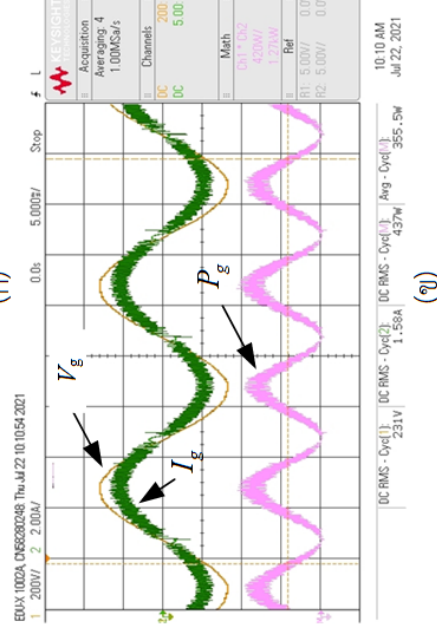
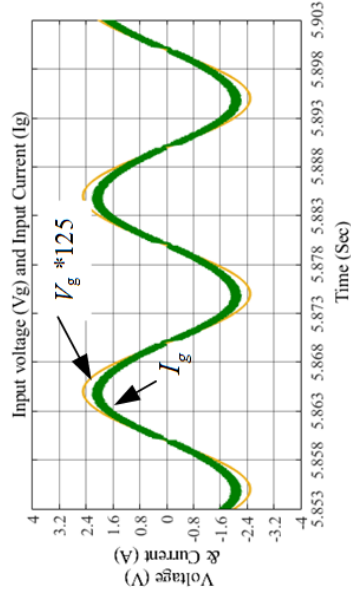
(ก) ผลการจำลองสถานการณ์

(ข) ผลการทดสอบ

จากภาพที่ 8 (ก) เป็นผลการจำลองสถานการณ์อินเวอร์เตอร์ 1 เฟสทำงานในโหมดเรียงกระแสโดยจะเห็นว่าเมื่อกระแสอ้างอิง ( $I_{ref}$ ) เป็นบวก (แรงดันที่กริดเป็นบวก) การแกว่งของกระแสที่กริด ( $I_g$ ) จะอยู่ระหว่างแบนบน ( $I_{ref} + H$ ) กับกระแสอ้างอิง ( $I_{ref}$ ) และเมื่อกระแสอ้างอิง ( $I_{ref}$ ) เป็นลบ (แรงดันที่กริดเป็นลบ) การแกว่งของกระแสที่กริด ( $I_g$ ) จะอยู่ระหว่างแบนล่าง ( $I_{ref} - H$ ) กับกระแสอ้างอิง ( $I_{ref}$ ) ใน

ภาพที่ 8 (ข) แสดงผลทดสอบกระแสที่กริดในโหมดเรียงกระแสภาพที่ 9 (ก) แสดงผลการจำลองสถานการณ์การนำกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่กริดในโหมดเรียงกระแส จะเห็นได้ว่ามีเฟสตรงกัน ซึ่งหมายถึงกระแสไหลออกจากกริด ในภาพที่ 9 (ข) แสดงผลการทดสอบกระแสและแรงดันที่กริดในโหมดเรียงกระแส จะเห็นได้ว่ากริดจ่ายกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 355 วัตต์

กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 355 วัตต์



### ภาพที่ 9 กระแสและแรงดันกริดในโหมดเรียงกระแส

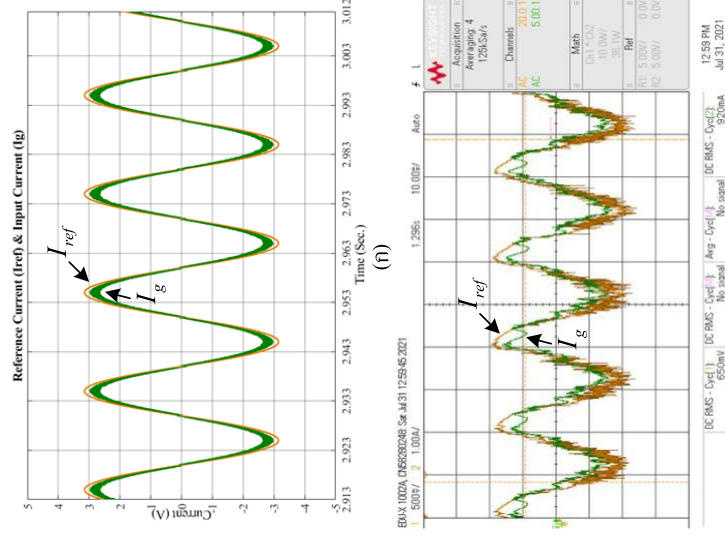
- (ก) ผลการจำลองสถานการณ์
- (ข) ผลการทดสอบ

สำหรับผลการจำลองสถานการณ์ วงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสสองทิศทางใน โหมดอินเวอร์เตอร์แสดงในภาพที่ 10 (ก) ซึ่งการควบคุมกระแสที่กริดจะเหมือนกับ การทำงานในโหมดเรียงกระแสเพียงแต่ จะต่างกันเล็กน้อยกล่าวคือ เมื่อกระแส อ้างอิง ( $I_{ref}$ ) เป็นบวก (แรงดันที่กริดเป็น ลบ) การแกว่งของกระแสที่กริด ( $I_g$ ) จะอยู่

ระหว่างแบนกลาง ( $I_{ref} - H$ ) กับกระแสอ้างอิง ( $I_{ref}$ ) และเมื่อกระแสอ้างอิง ( $I_{ref}$ ) เป็นลบ (แรงดันที่กริดเป็นบวก) การแกว่งของ กระแสที่กริด ( $I_g$ ) จะอยู่ระหว่างแบนกลาง ( $I_{ref} + H$ ) กับกระแสอ้างอิง ( $I_{ref}$ ) ในภาพ ที่ 10 (ข) เป็นผลการทดสอบเปรียบเทียบ ระหว่างกระแสที่กริดกับกระแสอ้างอิงที่ เป็นไปในแนวทางเดียวกัน จากผลการ

ทดสอบดังกล่าวพบว่ากระแสมีความผิดเพี้ยนเนื่องจากกำลังสูญเสียที่หม้อแปลงของหม้อแปลงที่ใช้สำหรับแยกกราวด์

(Isolated transformer) โดยขนาดพิกัดของหม้อแปลงดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับพิกัดของระบบที่ทดสอบ



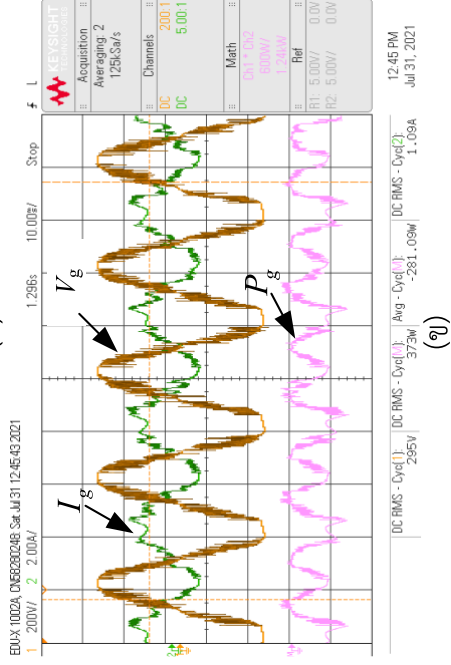
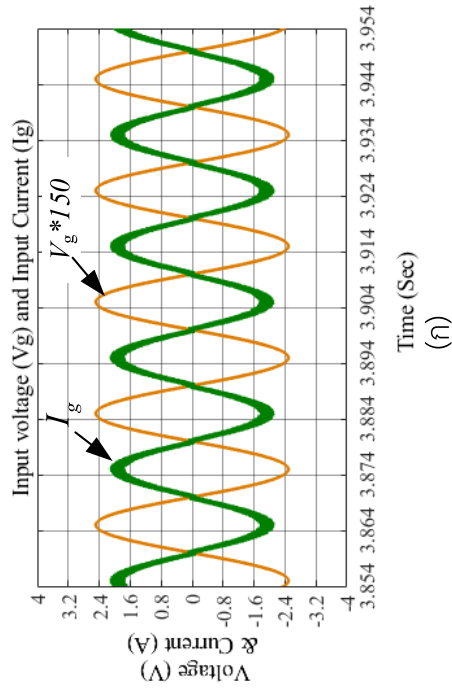
ภาพที่ 10 กระแสที่กริดในหม้อเดินเวอเตอร์

(ก) ผลการจำลองสถานการณ์

(ข) ผลการทดสอบ

ภาพที่ 11 (ก) แสดงผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับสัญญาณกระแสและแรงดันที่กริด โดยจะสังเกตเห็นว่ามีความต่างเฟสกัน 180° ซึ่งหมายถึงกระแสไหลเข้ากริด ผลการทดสอบกระแสและแรงดันกริดในหม้อเดินเวอเตอร์แสดงใน

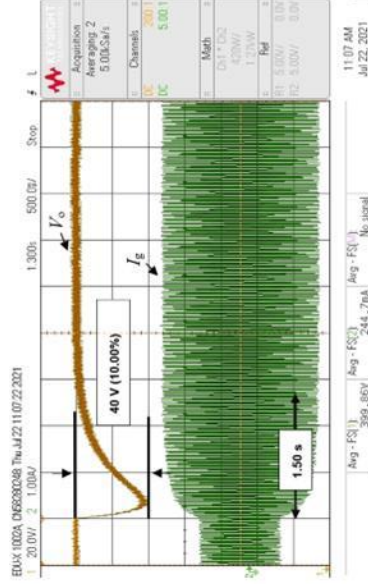
ภาพที่ 11 (ข) จะสังเกตเห็นว่ารูปคลื่นสัญญาณกระแสทางด้านอินพุต (I<sub>g</sub>) จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีการบิดตามกระแสอ้างอิง (I<sub>ref</sub>) โดยมีกำลังไฟฟ้าที่กริด (P<sub>g</sub>) เท่ากับ -281.09 วัตต์



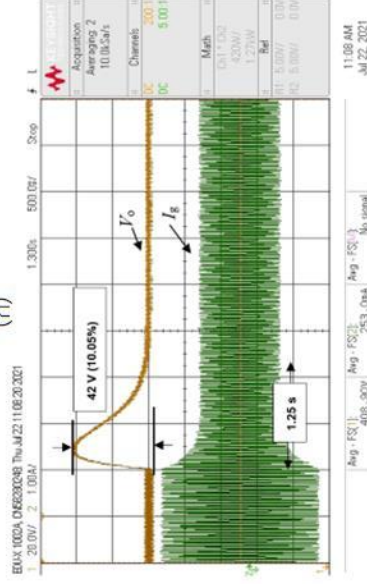
ภาพที่ 11 กระแสและแรงดันกริดในโหนดอินเวอร์เตอร์

(ก) ผลการจำลองสถานการณ์

(ข) ผลการทดสอบ



(ก)



(ข)

### ภาพที่ 12 ผลการทดสอบสภาวะชั่วขณะ

- (ก) กรณีโหลดเพิ่มจาก 50% โหลดเป็น 100% โหลด
- (ข) กรณีโหลดลดจาก 100% โหลด เป็น 50% โหลด

ในภาพที่ 12 (ก) แสดงผลการทดสอบที่ สภาวะชั่วขณะ โดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลด จาก 50% โหลดเป็น 100% โหลด ผลการ ทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมกระแสและ แรงดันมีเสถียรภาพที่สภาวะชั่วขณะ โดย สามารถรักษาระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตให้ คงที่ไม่ต่ำกว่า 400 โวลต์ โดยแรงดันด้าน เอาต์พุตมีการพุ่งตกลงขณะเปลี่ยนแปลงโหลด ที่ 40 โวลต์ หรือ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลาใน การเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) ที่เวลา 1.50 วินาที สำหรับผลการทดสอบที่สภาวะ

ชั่วขณะโดยมีการเปลี่ยนแปลงโหลดจาก 100% โหลด เป็น 50% แสดงในภาพที่ 12 (ข) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุม กระแสและแรงดันมีเสถียรภาพที่สภาวะ ชั่วขณะ โดยสามารถรักษาระดับแรงดัน ทางด้านเอาต์พุตให้คงที่ไม่ต่ำกว่า 350 โวลต์ โดยแรงดันด้านเอาต์พุตมีการพุ่งขึ้นขณะ เปลี่ยนแปลงโหลดที่ 42 โวลต์ หรือ 10.05 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะ คงตัว (Steady State) ที่เวลา 1.25 วินาที



## สรุปผลการศึกษา

บทความนี้นำเสนออินเวอร์เตอร์ 1 เฟส สองทิศทางแบบเชื่อมกริดที่ควบคุมกระแสด้วยฮิสเทอรีซิสแบบดับเบิ้ลแบนด์ การทำงานของวงจรแบ่งออกเป็น 2 โหมดคือ โหมดเรียงกระแส และโหมดอินเวอร์เตอร์ โดยเมื่อวงจรทำงานในโหมดเรียงกระแส กำลังไฟฟ้าที่กริดมีค่าเป็นบวก และเมื่อวงจรทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ กำลังไฟฟ้าที่กริดมีค่าเป็นลบ การจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของการควบคุมที่นำเสนอมายังและยืนยันด้วยชุดทดสอบต้นแบบพิกัด 300 วัตต์ จากผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกัน สำหรับในโหมดเรียงกระแสสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตได้ที่ 400 โวลต์ และกริดจ่ายกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 355 วัตต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 97.80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในโหมดอินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังกริดได้เท่ากับ -281 วัตต์ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบผลตอบแทนในสถานะช่วงขณะฉับพลันและลดโหลดจากเครื่องหนึ่งของพิกัดไปยังค่าพิกัดพบว่าการควบคุมที่นำเสนอยังคงสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าและความควบคุมกระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## เอกสารอ้างอิง

เจตน บัญญัติแรก และรัชชานนท์ แซ่มบัณฑิตย์. “วงจรถูกบริการอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ที่มีการแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังและความคุมกระแสแบบฮิสเทอรีซิส.” ปริญาณินพจน์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2564.

ชินวัตร มีช้าง และสะภาวเดือน สันนิวาส. “ชุดวงจรแปลงผันพลังงานสองทิศทาง 1 เฟส ควบคุมโดยวิธีฮิสเทอรีซิส.” ปริญาณินพจน์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2560.

เชตุพล อิมทิม และรัชชัย ผ่องแผ้ว. “วงจรถับแรงดันระดับแรงดันสำหรับปรับปรุงตัวประกอบกำลัง.” ปริญาณินพจน์อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ภาควิชาเทคโนโลยี



- วิศวกรรมไฟฟ้าวิทยาลัยเทคโนโลยี  
อุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2562.
- Ariya Sangwongwanich, Yongheng  
Yang, and Frede Blaabjerg,  
“Sensorless reserved power  
control strategy for two-stage  
grid-connected Photovoltaic  
systems”, IEEE 7th International  
Symposium on Power  
Electronics for Distributed  
Generation Systems (PEDG),  
2016.
- Geon-Hong Min, Kyung-Hwan Lee,  
Jung-Ik Ha and Myong Hwan  
Kim, “Design and Control of  
Single-Phase Grid-Connected  
Photovoltaic Microinverter with  
Reactive Power Support  
Capability”, International Power  
Electronics Conference (IPEC-  
Niigata 2018 -ECCE Asia), 2018.
- Hasan Komurcugil, “Double-band  
hysteresis current-controlled  
single-phase shunt active filter  
for switching frequency  
mitigation”, International  
Journal of Electrical Power &  
Energy Systems, 2015, pp. 131-  
140.
- Hasan Komurcugil and Osman  
Kukrer, “Double-band hysteresis  
current-controlled single-phase  
shunt active filter for switching  
frequency mitigation”,  
International Journal of  
Electrical Power & Energy  
Systems, 2015, pp. 131-140.
- Li Zhang; Kai Sun, Yun Wei Li,  
Xiaonan Lu, and Jinqian Zhao,  
“A Distributed Power Control of  
Series-Connected Module-  
Integrated Inverters for PV Grid-  
Tied Applications”, IEEE  
Transactions on Power  
Electronics, 2018, pp. 7698 -  
7707.
- Minsoo Jang, Mihai Ciobotaru and  
Vassilios G. Agelidis, “A Single-  
Phase Grid-Connected Fuel Cell  
System Based on a Boost-  
Inverte”, IEEE Transactions on  
Power Electronics, 2013, pp.  
279 - 288.
- Rahmat Khezri, Amin Mahmoudi and  
Mohammed H. Haque,  
“Optimal Capacity of Solar PV

- and Battery Storage for  
Australian Grid-Connected  
Households”, IEEE Transactions  
on Industry Applications, 2020,  
pp. 5319 - 5329.
- Vitor F. Barbosa, Antônio O. Costa  
Neto, Gustavo B. Lima, and Luiz  
C. G. Freitas, “Analysis of a  
Single-Phase Hybrid  
Bidirectional Rectifier with  
Series Voltage Compensation in  
a Grid-Connected DC  
Microgrid”, IEEE PES Innovative  
Smart Grid Technologies  
Conference - Latin America  
(ISGT Latin America), 2019