

# การออกแบบบัสคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อแบบอนุกรมสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

## Design of Series Connected Boost converter for Single-Phase Stand-alone Photovoltaic Inverter

มนทล นาวงษ์  
Monthon Nawong

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์, E-mail: monthon.nawong@dpu.ac.th

### บทคัดย่อ

อินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปใช้หลักการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงขึ้น บทความนี้นำเสนอการออกแบบบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งแผงต่อวงจรและนำวงจรมาเชื่อมต่อแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงขึ้นสำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ บัสคอนเวอร์เตอร์ใช้หลักการควบคุมแบบชนิดพีไอด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F1010 เพื่อรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ ผลการทดลองพบว่าระบบที่นำเสนอสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 100 V จากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลง 20 V ถึง 40 V ตามความเข้มของแสงและนำวงจรมาเชื่อมต่อแบบอนุกรมจำนวนสี่วงจรเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 400 V สำหรับอินเวอร์เตอร์มีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก 223 V ใช้งานกับโหลดอินдукชันมอเตอร์ขนาดพิกัด 0.3 kW โดยทั้งสี่วงจรมีประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ย 94.27 เปอร์เซ็นต์

**คำสำคัญ :** บัสคอนเวอร์เตอร์ การควบคุมแบบชนิดพีไอ บัสคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อแบบอนุกรม อินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟส

### Abstract

The single-phase stand-alone photovoltaic inverter commonly connects to series of photovoltaic panels for increasing higher voltage dc. This paper presents a design of boost converter connected with a photovoltaic panel and use this circuit connects in series to increase higher voltage dc source for inverter's input. The boost converter using PI controller with dsPIC30F1010 microcontroller is designed to maintain the constant output voltage. Results found that the proposed system can provide 100 V constant output voltages for the 20-40 V photovoltaic input voltages according to the different solar irradiance variations. The circuit is connected with four circuits in series in order to provide constant dc of 400 V for the inverter that has ac output of 223 V using with 0.3 kW induction motor loads. The overall efficiency of four circuits is approximately 94.27%.

**Keywords:** Boost converter, PI Controller, Series connected boost converter, Single-phase stand-alone inverter.

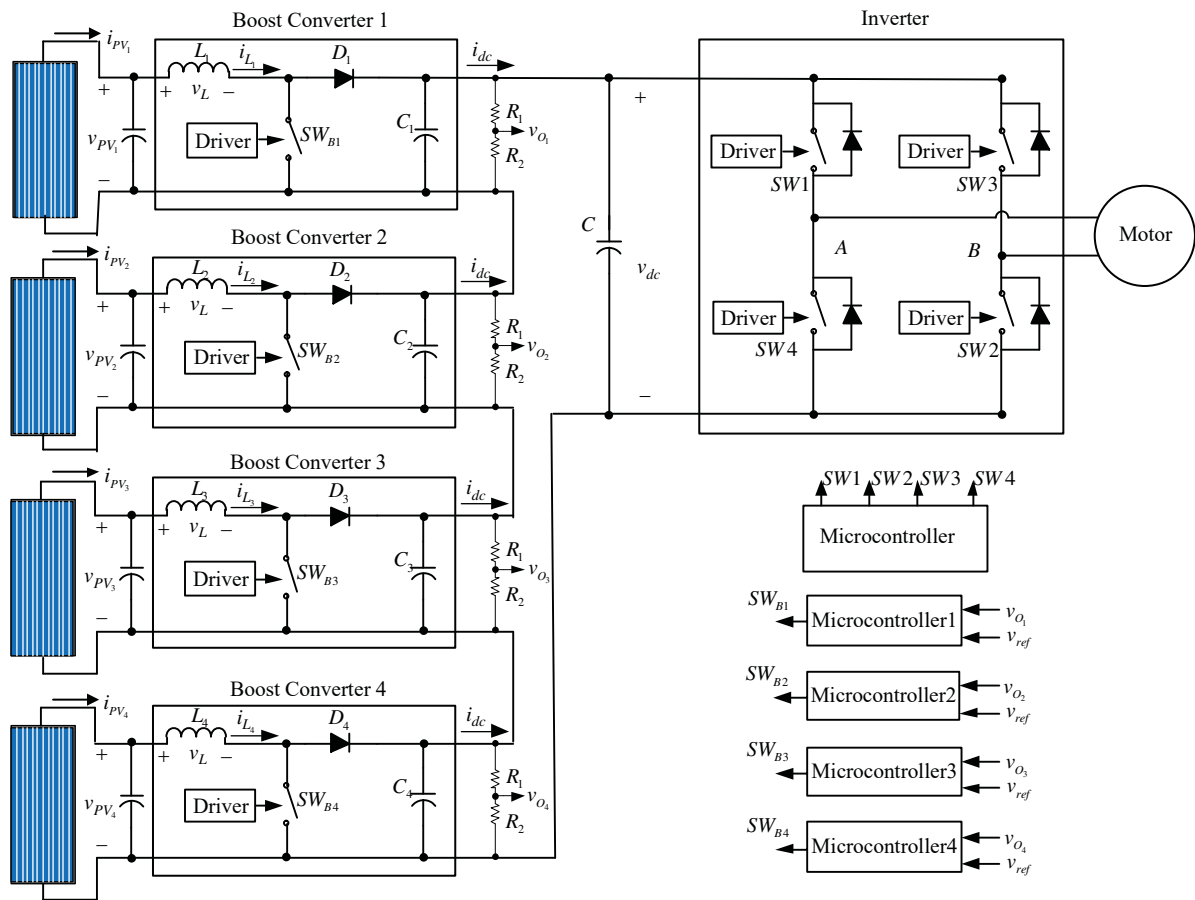
### 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้มีความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากฟอสซิลกำลังเริ่มหมดไปและปัญหาจากการใช้พลังงานจากฟอสซิลคือทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังนั้นพลังงานทดแทนจึงเป็นทางเลือกที่นำมาใช้งาน

ทดแทนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากฟอสซิล เช่น พลังงานลม และพลังงานจากแสงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งเป็นพลังงานสะอาด มีอยู่ทั่วไป และไม่มีต้นทุนของวัตถุดิบ พลังงานจากแสงอาทิตย์ใช้อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell: PV) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงาน

ไฟฟ้าได้โดยตรงซึ่งมีระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำดังนั้นเมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานจึงต้องนำมาต่อเชื่อมเป็นวงจรแบบโมดูล (Module) หรือพาแนล (Panel) เรียกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module or PV Panel) พลังงานไฟฟ้าที่

ผลิตได้มีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและความเข้มแสง ดังนั้นวงจรคอนเวอร์เตอร์จึงถูกนำ



รูปที่ 1 บูสคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบนอนุกรมสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

มาใช้งานในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น นำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงหรือนำมาประจุแบตเตอรี่โดยใช้วงจร buck converter หรือ นำมาประจุแบตเตอรี่โดยใช้วงจร boost converter [1] และนำมาใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับหรือเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าโดยใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) [2] อินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้งานในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งแบบชนิดหนึ่งเฟสและชนิดสามเฟส สามารถแบ่งตามประเภทการใช้งานได้เป็น 2 ประเภทคือ อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบนระบบไฟฟ้า (Grid-connected inverter) [3] และอินเวอร์เตอร์แบบอิสระ (Stand-alone inverters) [4] โดยมีรูปแบบการทำงานโดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสมีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านออก 220 V ซึ่งต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้าน

เข้า 300 V ถึง 400 V แต่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ไม่เกิน 40 V ต่อแผงขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ของแผง ดังนั้นจึงต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 10 แผง ถึง 14 แผงต่อบนอนุกรม เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงขึ้นเพื่อเป็นแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ [5] แต่การต่อบนอนุกรมจำนวนหลายแผงทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดของทุกแผงมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นจึงต้องใช้ขนาดพื้นที่ของแผงที่เท่ากันและวางอยู่ตำแหน่งของการรับแสงที่เท่ากันด้วย เมื่อเกิดเงาบังที่แผงใดแผงหนึ่ง ทำให้แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของทั้งระบบมีค่าลดลง [6]

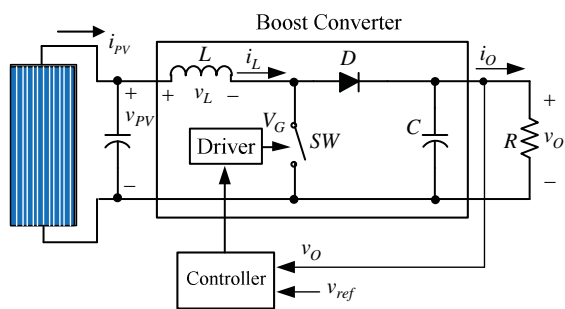
วงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ (DC/DC converter) [7] ถูกนำมาใช้ในการเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ทำให้ช่วยลดจำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อ

แบบอนุกรมโดยใช้วงจรตีชิวตีซีคอนเวอร์เตอร์ชนิดฟลายเบคคอนเวอร์ (Flyback converter) [8] ซึ่งมีหม้อแปลงเป็นส่วนประกอบหลักทำให้วงจรมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก บูสคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรตีชิวตีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่ใช้หม้อแปลงเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นวงจรจึงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพสูงจึงเหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

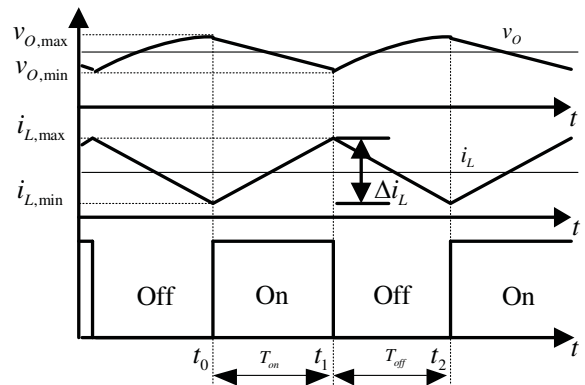
สำหรับงานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและเชื่อมต่อบูสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม โดยการเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งแผงต่อวงจร ที่ขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 20 V ถึง 40 V ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามระดับความเข้มของแสงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 100 V ใช้การควบคุมแบบชนิดพีไอด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และนำบูสคอนเวอร์เตอร์มาเชื่อมต่อบูสอนุกรมจำนวนสี่วงจรเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 400 V สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้หลักการสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็มชนิดการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์เพื่อนำมาใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ขนาดพิกัด 0.3 kW ดังรูปที่ 1

## 2. การออกแบบบูสคอนเวอร์เตอร์

บูสคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้า และสามารถรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกให้คงที่ โดยวงจรประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตซ์ (SW) ไดโอด (D) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ดังรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรจากลักษณะการทำงานของสวิตซ์เป็นแบบนำกระแสไฟฟ้าและเป็นแบบไม่นำกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดรูปแบบการทำงานแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก ( $v_o$ ) และกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ ( $i_L$ ) ขณะสวิตซ์นำกระแสไฟฟ้าและไม่นำกระแสไฟฟ้างดังรูปที่ 3

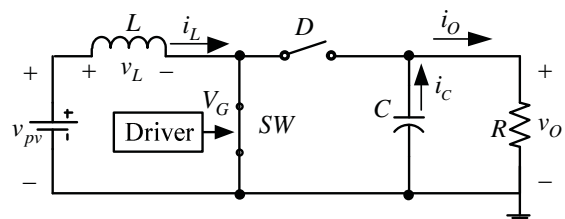


รูปที่ 2 บูสคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $v_o$  และกระแสไฟฟ้า  $i_L$  ขณะสวิตซ์นำกระแสไฟฟ้าและไม่นำกระแสไฟฟ้า

กรณีที่ 1 ช่วงเวลาการทำงานที่  $t_0 < t < t_1$  ดังรูปที่ 4 สวิตซ์นำกระแสไฟฟ้าและไดโอดไม่นำกระแสไฟฟ้า



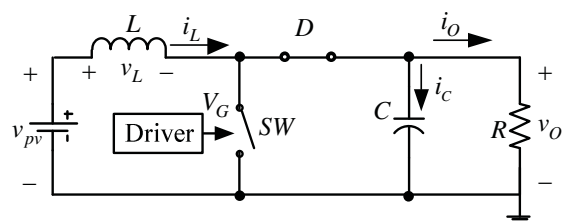
รูปที่ 4 บูสคอนเวอร์เตอร์ช่วงเวลาการทำงานที่  $t_0 < t < t_1$

เมื่อสวิตซ์นำกระแสไฟฟ้าได้วงจรการทำงานดังรูป ในช่วงเวลาการทำงาน  $T_{on} = D \cdot T_s$  ทำให้ได้สมการดังนี้

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_{pv}}{L} \quad (1)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = -\frac{i_o}{C} \quad (2)$$

กรณีที่ 2 ช่วงเวลาการทำงานที่  $t_1 < t < t_2$  ดังรูปที่ 5 สวิตซ์ไม่นำกระแสไฟฟ้าและไดโอดนำกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 5 บูสคอนเวอร์เตอร์ช่วงเวลาการทำงานที่  $t_1 < t < t_2$

เมื่อสวิตช์ไม่นำกระแสได้วงจรการทำงานดังรูป ในช่วงเวลาการทำงาน  $T_{off} = (1-D) \cdot T_s$  ทำให้ได้สมการดังนี้

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_{pv} - v_o}{L} \quad (3)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{i_L - i_o}{C} \quad (4)$$

การออกแบบบวสคอนเวอร์เตอร์โดยใช้แหล่งพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้า ( $v_{pv}$ ) ที่ผลิตได้มีค่าระหว่าง 20 V ถึง 40 V และแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก ( $v_o$ ) มีค่าคงที่ 100 V กระแสไฟฟ้าทางด้านออก ( $i_o$ ) มีค่า 1 A ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์  $f_s$  มีค่า 40 kHz การออกแบบการทำงานของวงจรในโหมดกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง ดังนั้นค่าตัวดีไซเคิลต่ำสุด ( $D_{min}$ ) และค่าตัวดีไซเคิลสูงสุด ( $D_{max}$ ) เป็นไปตามสมการที่ (5) และสมการที่ (6) ดังนี้

$$D_{min} = 1 - \frac{v_{pv,max}}{v_o} = 1 - \frac{40V}{100V} = 0.6 \quad (5)$$

$$D_{max} = 1 - \frac{v_{pv,min}}{v_o} = 1 - \frac{20V}{100V} = 0.8 \quad (6)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำคือ

$$i_L = \frac{v_{pv,max}}{(1-D_{min})^2 \cdot R} = \frac{40V}{(1-0.6)^2 \cdot 100\Omega} = 2.5A \quad (7)$$

กำหนดให้ค่าระลอกคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ( $\Delta i_L$ ) มีค่าเท่ากับ 0.5A ดังนั้นค่าของตัวเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้ตามสมการ (8) ดังนี้

$$L = \frac{v_{pv,max}}{\Delta i_L} \cdot D_{min} \cdot T_s = \frac{(40V)}{0.5A} (0.6)(25\mu s) = 1.2mH \quad (8)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่ำสุด ( $i_{L,min}$ ) และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่ามากที่สุด ( $i_{L,max}$ ) คือ

$$i_{L,min} = i_L - \frac{\Delta i_L}{2} = 2.5A - 0.25A = 2.25A \quad (9)$$

$$i_{L,max} = i_L + \frac{\Delta i_L}{2} = 2.5A + 0.25A = 2.75A \quad (10)$$

กำหนดให้ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก ( $\Delta v_o$ ) มีค่าไม่เกิน 1% ค่าตัวเก็บประจุตามสมการที่ (11)

$$C = \frac{D_{max} \cdot T_s}{R \cdot \Delta v_o / v_o} = \frac{0.8 \cdot (25 \times 10^{-6})}{100\Omega \cdot 0.01} = 20\mu F \quad (11)$$

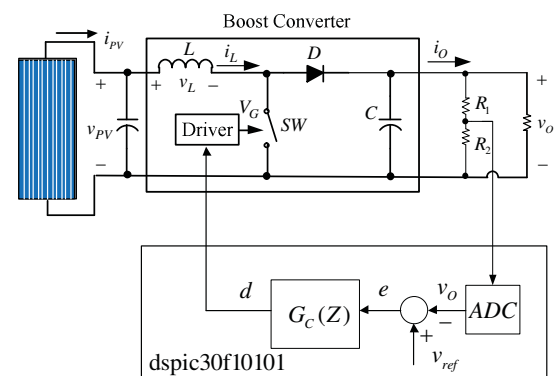
ค่าพารามิเตอร์ของบวสคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบทั้งหมดเป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของบวสคอนเวอร์เตอร์

พารามิเตอร์	พิกัด
แรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้า ( $v_{pv}$ )	20 V ถึง 40 V
แรงดันไฟฟ้าทางด้านออก ( $v_o$ )	100 V
ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ ( $f_s$ )	40 kHz
ตัวเหนี่ยวนำ ( $L$ )	1.2mH
ตัวเก็บประจุ ( $C$ )	20μF

### 3. การควบคุมการทำงานของบวสคอนเวอร์เตอร์

การควบคุมการทำงานของบวสคอนเวอร์เตอร์ โดยการออกแบบวงจรควบคุมให้สามารถรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกให้คงที่ โดยการออกแบบวงจรควบคุมแบบพีไอ มีแผนภาพบล็อกการทำงานดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพบล็อกการทำงานของการควบคุมแบบดิจิตอล

การออกแบบวงจรควบคุมแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่โดยเริ่มจากการคำนวณหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของบวสคอนเวอร์เตอร์ ( $G_{vd}(s)$ ) ดังนี้

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_o}{L_e C D_o} \cdot \frac{\left(-\frac{L_e}{R}s + 1\right)}{s^2 + \frac{1}{CR}s + \frac{1}{L_e C}} \quad (12)$$

โดยที่  $L_e = L/(1-D)^2$  และ  $D_o = 1-D$  สำหรับค่าของพารามิเตอร์ของบวสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเป็นไปตามตารางที่ 1 ทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของบวสคอนเวอร์เตอร์เป็นไปตามสมการที่ (13)

$$G_{vd}(s) = \frac{-1 \times 10^5 s + 4 \times 10^8}{s^2 + 200s + 801600} \quad (13)$$

เปลี่ยนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของบวสคอนเวอร์เตอร์แบบแอนะล็อกในสมการที่ (13) ให้เป็นแบบดิจิทัล ( $G_{vd}(z)$ ) ตามสมการที่ (14) ดังนี้

$$G_{vd}(z) = \frac{0.1874z + 0.1768}{z^2 - 1.715z + 0.8406} \quad (14)$$

สำหรับการออกแบบวิธีควบคุมการทำงานของบวสคอนเวอร์เตอร์ให้สามารถรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกได้ในงานวิจัยนี้แนะนำให้เสนอการควบคุมชนิดพีไอ (PI Controller) โดยมีรูปแบบดังสมการที่ (15)

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (15)$$

การควบคุมชนิดพีไอประกอบด้วยโพลหนึ่งตำแหน่งและซีโรอีกหนึ่งตำแหน่งซึ่งสามารถกำหนดค่าสำหรับการออกแบบค่าของ  $K_p$  และ  $K_i$  ได้จากการทำงานในฟังก์ชัน *sisotool* ของโปรแกรม Matlab/Simulink ดังสมการที่ (16)

$$G_C(s) = 0.08 + \frac{20}{s} \quad (16)$$

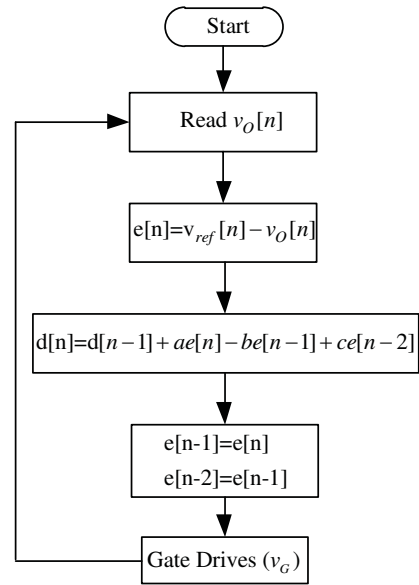
จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของบวสคอนเวอร์เตอร์ในสมการที่ (14) ทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถวลได้ดังนี้

$$G_C(z) = \frac{u}{e} = \frac{1.299 - 1.689z^{-1} + 0.5348z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (17)$$

สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถวลตามสมการที่ (17) นำมาเขียนโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดังนี้

$$d(n) = U(n) = U(n-1) + 1.299E(n) - 1.689E(n-1) + 0.5348E(n-2) \quad (18)$$

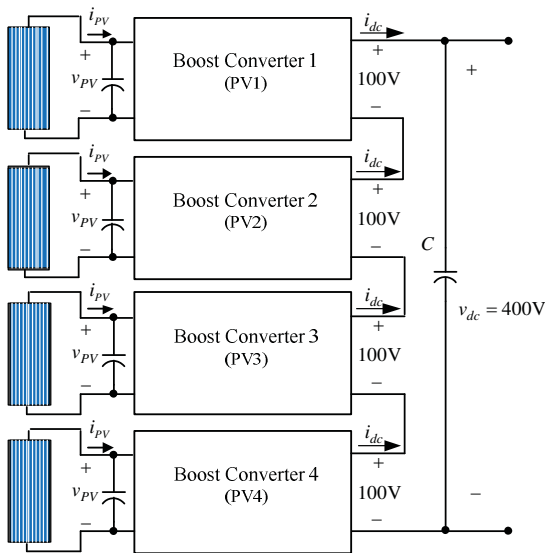
สามารถอธิบายการทำงานในรูปแบบของแผนผังการทำงานของวงจรควบคุมแบบดิจิทัลดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนผังการทำงานของวงจรควบคุมแบบดิจิทัล

#### 4. การเชื่อมต่อบวสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม

บวสคอนเวอร์เตอร์แต่ละวงจรที่ออกแบบใช้แหล่งพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งแผงต่อวงจร มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 100 V ต่อวงจรและเมื่อนำมาต่อแบบอนุกรมจำนวนสี่วงจรทำให้ได้แรงดันไฟฟ้า ( $v_{dc}$ ) ทางด้านออกคงที่ 400 V และกระแสไฟฟ้า ( $i_{dc}$ ) ที่มีค่าเท่ากันทั้งสี่วงจร ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 บูสคอนเวอร์เตอร์ที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม

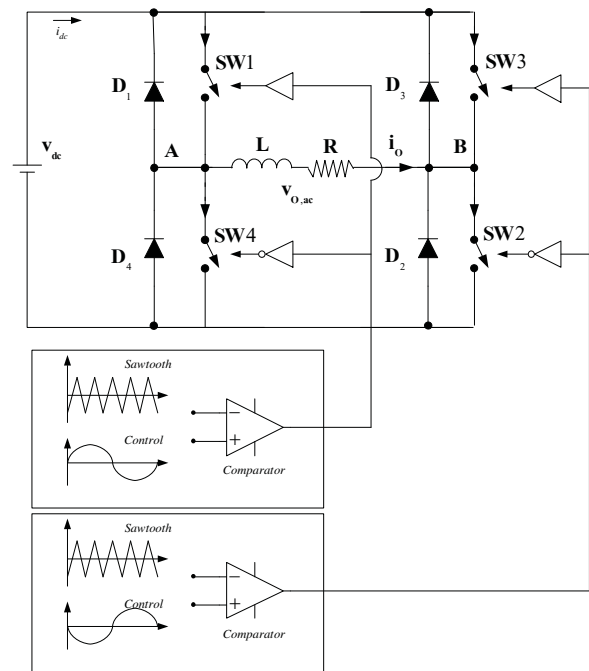
### 5. การทำงานของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก ( $v_{o,ac}$ ) และปรับค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก ( $f_o$ ) โดยใช้หลักการสวิตชิงแบบพีดีบีลยูเอ็มชนิดการสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์มีแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกดังนี้

$$v_{o,1} = m_a \cdot V_{dc} = \frac{(0.8) \cdot 400V}{\sqrt{2}} = 226V_{rms} \quad (19)$$

อัตราส่วนการมอดูเลตความถี่  $m_f$  มีค่าตามสมการที่ (20) ทำให้ได้ค่าของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ตามลำดับของฮาร์โมนิกดังตารางที่ 2

$$m_f = \frac{f_{sw}}{f_1} = \frac{1kHz}{50} = 20 \quad (20)$$

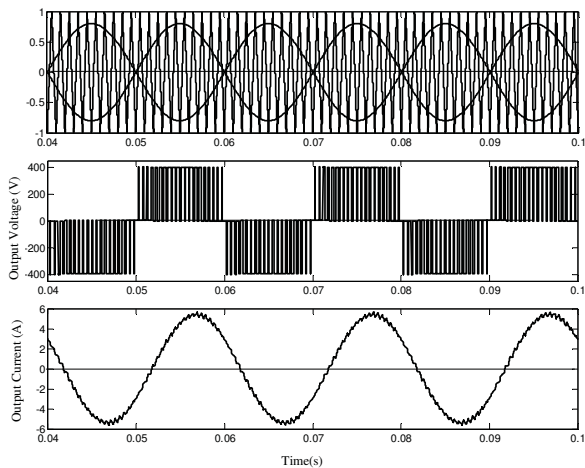


รูปที่ 9 อินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสแบบยูนิโพลาร์

ตารางที่ 2 ค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์

ลำดับฮาร์โมนิก	ความถี่ Hz	แรงดันไฟฟ้าด้านออก (V)	กระแสไฟฟ้าด้านออก (A)	กำลังไฟฟ้าด้านออก (W)
1	50	226.27	0.8980	201.61
35	1750	3.67	0.0032	0.0026
37	1850	39.31	0.033	0.2734
39	1950	88.81	0.0710	1.2615
41	2050	88.81	0.0677	1.1458
43	2150	39.31	0.0286	0.2048
45	2250	3.67	0.0025	0.0016
กำลังไฟฟ้า				205

หลักการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ (SW1-SW4) สำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสแบบยูนิโพลาร์ โดยทั่วไปคือการนำสัญญาณฟันเลื่อยและสัญญาณรูปคลื่นซิกต่างเฟสกัน 180 องศา มาทำการเปรียบเทียบเพื่อให้ได้สัญญาณพีดีบีวเอ็ม (SPWM) รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 รูปคลื่นการมอดูเลตของสัญญาณควบคุม แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์



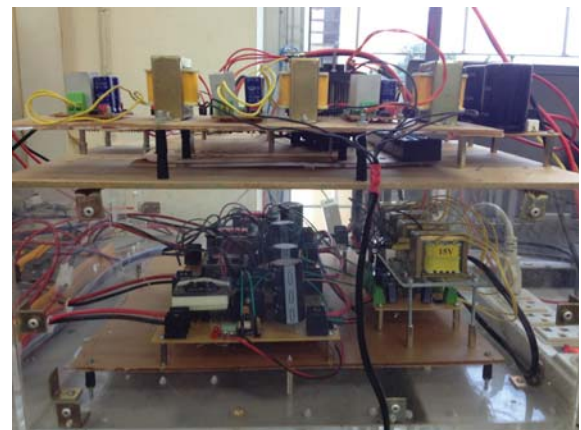
ก) แผงเซลล์แสงอาทิตย์

## 6. ผลการทดลองการทำงาน

การทดสอบการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อบนบอร์ดสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกเป็นการทำงานการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 100 V ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F1010 ต่อวงจรและนำมาเชื่อมต่อบนบอร์ดจำนวนสี่วงจรเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 400 V เพื่อนำไปทดสอบกับอินเวอร์เตอร์ที่มีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก 220 V ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F1010 และใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์

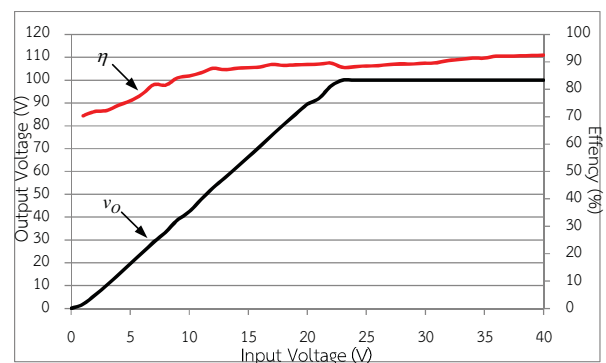
### 6.1 ผลการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์

การทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองวงจรใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามรูปที่ 11 แต่ละวงจรมีการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F1010 และกำหนดค่าตัวตั้งไซเคิลของบัสคอนเวอร์เตอร์ให้มีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.8 เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตามที่ออกแบบ เมื่อทดสอบการทำงานของวงจรโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าจาก 0 V ถึง 40 V ทำให้ได้ผลของแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีอัตราส่วนคงที่เมื่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้ามีค่าน้อยกว่าประมาณ 20V และเมื่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้ามีค่ามากกว่า 20V ทำให้ค่าตัวตั้งไซเคิลมีค่าน้อยกว่า 0.8 แรงดันไฟฟ้าทางด้าน



ข) บัสคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 12 ผลการทำงานของแรงดันไฟฟ้าด้านออกและประสิทธิภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าของบัสคอนเวอร์เตอร์

ออกมีค่าคงที่ที่ 100 V โดยประสิทธิภาพการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์เป็นไปตามสมการที่ (21) ผลการทำงานของ

แรงดันไฟฟ้าด้านออกและประสิทธิภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าเป็นไปตามรูปที่ 12

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{v_{dc} i_{dc}}{v_{pv} i_{pv}} \quad (21)$$

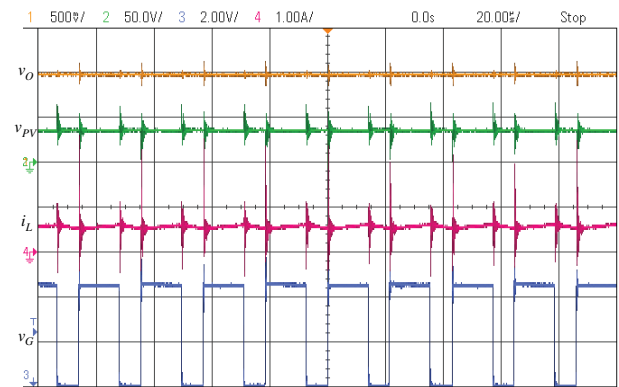
เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ในช่วงที่แรงดันไฟฟ้าทางด้านออกคงที่ 100 V ค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าและค่าประสิทธิภาพการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ทั้งสี่วงจร (PV1-PV4) เป็นไปตามตารางที่ 3 โดยบัสคอนเวอร์เตอร์ (PV1) มีค่าของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าต่ำสุดที่ 22.57 V กระแสไฟฟ้าด้านเข้าสูงสุด 0.944 A บัสคอนเวอร์เตอร์ (PV2) มีค่าของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าต่ำสุดที่ 23.62 V กระแสไฟฟ้าด้านเข้าสูงสุด 0.913 A บัสคอนเวอร์เตอร์ (PV3) มีค่าของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าต่ำสุดที่ 22.67 V กระแสไฟฟ้าด้านเข้าสูงสุด 0.960 A และบัสคอนเวอร์เตอร์ (PV4) มีค่าของแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าต่ำสุดที่ 21.96 V กระแสไฟฟ้าด้านเข้าสูงสุด 0.976 A

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้า

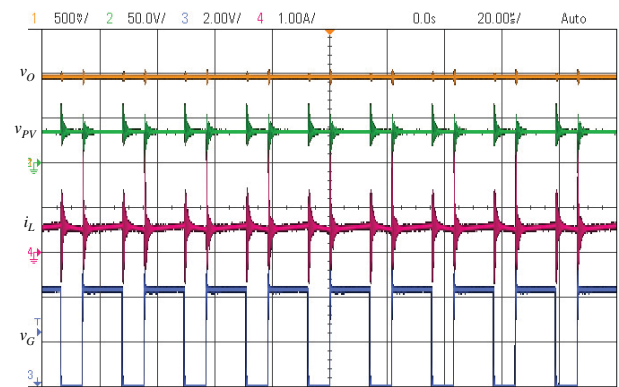
วงจร	ด้านเข้า			ด้านออก			$\eta$
	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	
PV 1	22.57	0.944	21.31	100	0.196	19.60	91.98
	40	0.532	21.28	100	0.196	19.60	92.11
PV 2	23.62	0.913	21.57	100	0.196	19.60	90.87
	40	0.526	21.04	100	0.196	19.60	93.16
PV 3	22.67	0.960	21.76	100	0.196	19.60	90.07
	40	0.532	21.28	100	0.196	19.60	92.11
PV 4	21.96	0.976	21.43	100	0.196	19.60	91.46
	40	0.524	20.96	100	0.196	19.60	93.51

การทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์แต่ละวงจรที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจำนวนหนึ่งแผงต่อวงจรนำมาทดสอบกับสภาพภูมิอากาศจริงทำให้ได้รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและสัญญาณขับสวิตช์ของบัสคอนเวอร์เตอร์ทั้งสี่วงรดังรูปที่ 13 และเมื่อวัดค่าของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ทางด้านเข้าและทางด้านออก ได้ผลตามตารางที่ 4 โดยมีค่าประสิทธิภาพ

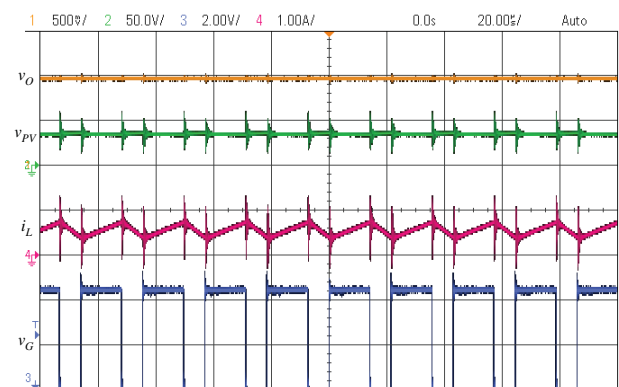
เฉลี่ยทั้งสี่วงจร 94.27 เปอร์เซ็นต์



ก) บัสคอนเวอร์เตอร์ 1 (PV 1)

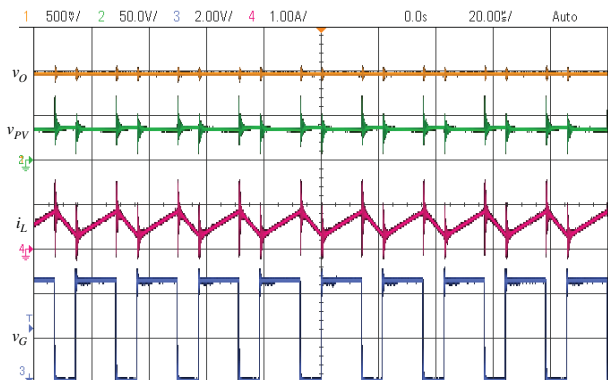


ข) บัสคอนเวอร์เตอร์ 2 (PV 2)



ค) บัสคอนเวอร์เตอร์ 3 (PV 3)





ง) บุกคอนเวอร์เตอร์ 4 (PV 4)

รูปที่ 13 ผลการทำงานของบุกคอนเวอร์เตอร์ (CH1) แรงดันไฟฟ้า  $v_O$  (50 V/div), (CH2) แรงดันไฟฟ้า  $v_{PV}$  (50 V/div), (CH3) สัญญาณ  $v_G$  (2 V/div), (CH 3) กระแสไฟฟ้า  $i_L$  (1 A/div) และแกนของเวลา (20us/Div)

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการทำงานของบุกคอนเวอร์เตอร์เมื่อทดสอบกับสภาพภูมิอากาศจริง

วงจร	แผงเซลล์แสงอาทิตย์			ด้านออก			$\eta$
	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	
PV 1	36.90	0.563	20.77	100	0.199	19.9	95.79
PV 2	36.20	0.575	20.81	100	0.198	19.8	95.12
PV 3	36.31	0.585	21.24	100	0.199	19.9	93.68
PV 4	36.35	0.595	21.62	100	0.200	20	92.47

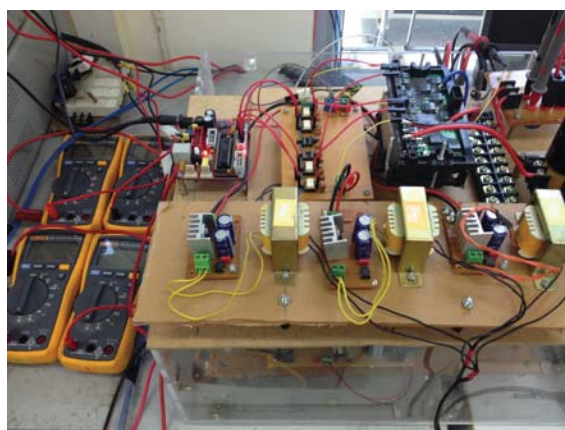
ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพการทำงานของบุกคอนเวอร์เตอร์เมื่อเกิดเกิดสภาวะเงาบังที่แผงใดแผงหนึ่ง

วงจร	แผงเซลล์แสงอาทิตย์			ด้านออก		
	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
PV 1	36.90	0.563	20.77	354	0.2	70.8
PV 2	10.8	1.30	14.04			
PV 3	36.31	0.585	21.24			
PV 4	36.35	0.595	21.62			

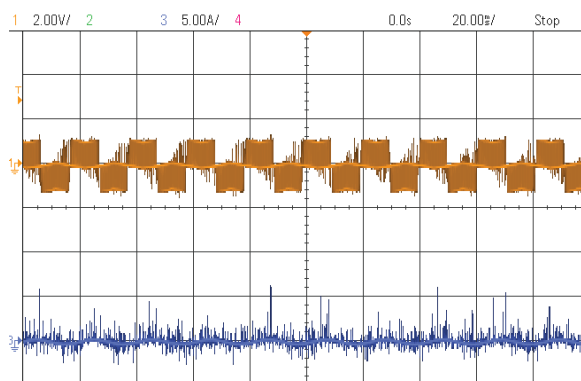
จากค่าตามตารางที่ 5 เมื่อเกิดสภาวะเงาบังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แผงใดแผงหนึ่ง (PV2) ทำให้บุกคอนเวอร์เตอร์มีแรงดันไฟฟ้า 10.8 V และกระแสไฟฟ้า 1.30 A และอีกสามวงจรที่เหลืออยู่ยังคงทำงานได้ตามปกติ ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้ารวมทั้งหมดมีค่าลดต่ำลงตามแผงที่เกิดสภาวะเงาบัง

## 6.2 ผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์

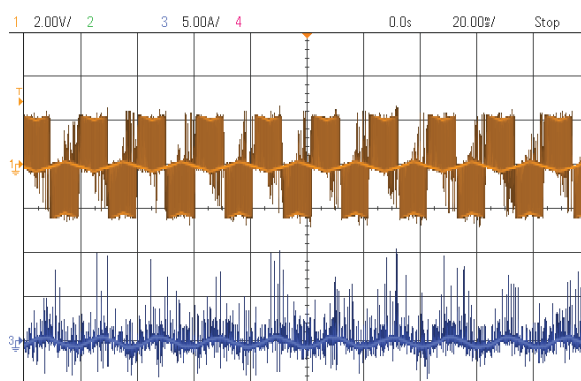
ในส่วนการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F1010 ในการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ (SW1-SW4) ดังรูปที่ 14 โดยอินเวอร์เตอร์ใช้ไอจีบีทีเพาเวอร์โมดูล (IGBT 15J331 power module) พิกัด 15 A 600 V ได้ผลการทำงานของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ทางด้านออกและกระแสไฟฟ้าที่ทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อมีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรบุกคอนเวอร์เตอร์ที่ 100 V, 200 V, 300 V และ 400 V ดังรูปที่ 15



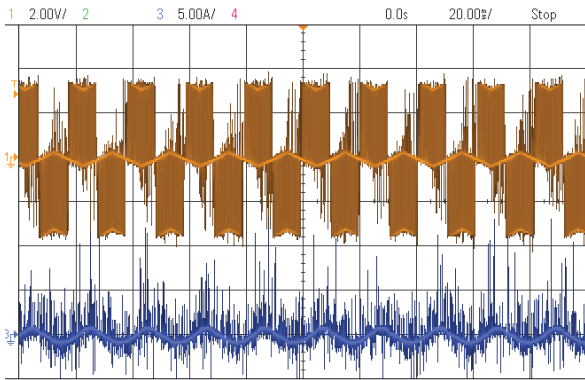
รูปที่ 14 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง



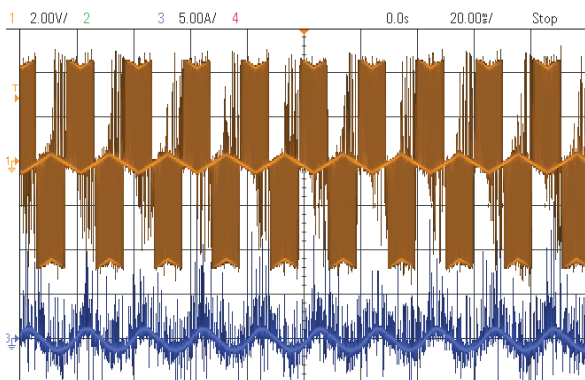
ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 V



ข) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 200 V



ค) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 300 V



ง) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 400 V

รูปที่ 15 ผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์ (CH1)

แรงดันไฟฟ้า  $v_{o,ac}$  (200 V/div), (CH 2) กระแสไฟฟ้า

$i_{o,ac}$  (5 A/div) และแกนของเวลา (20ms/Div)

### 6.3 ผลการทำงานของระบบเมื่อใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์

เมื่อนำบรูสคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อแบบอนุกรมสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ขนาด

พิกัด 0.3 kW โดยการทดสอบการทำงานเมื่อทำการเชื่อมต่อบรูสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรมทั้งสี่วงจรและทำการจ่ายพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับบรูสคอนเวอร์เตอร์ที่ละวงจรโดยเริ่มจากหนึ่งวงจรได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 100 V และกระแสไฟฟ้า 0.04 A สองวงจรได้

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 200 V และกระแสไฟฟ้า 0.08 A สามวงจรได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 300 V และกระแสไฟฟ้า 0.13 A และสี่วงจรได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 400 V และกระแสไฟฟ้า 0.17 A ตามตารางที่ 6

เมื่อพิจารณาการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ขนาดพิกัด 0.3 kW ดังรูปที่ 16 พบว่าเมื่อจ่ายพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับบรูสคอนเวอร์เตอร์จำนวนหนึ่งวงจรมีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก 55 V และกระแสไฟฟ้า 0.2 A ทำให้มอเตอร์ยังไม่เริ่มหมุนเนื่องจากกำลังไฟฟ้ที่ผลิตได้จากจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับบรูสคอนเวอร์เตอร์จำนวนหนึ่งวงจรไม่เพียงพอกับโหลดและเมื่อจ่ายพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับบรูสคอนเวอร์เตอร์จำนวนสองวงจรทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 110 V และกระแสไฟฟ้า 0.39 A ทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนที่ความเร็วรอบ 240 rpm และเมื่อจ่ายพลังงานที่สามวงจรและสี่วงจรทำให้มีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 164 V และ 223 V และกระแสไฟฟ้า 0.55 A และ 0.74 A ตามลำดับทำให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบ 1363 rpm และ 2408 rpm ได้ค่าตามตารางที่ 7



รูปที่ 16 โหลดอินดักชันมอเตอร์ขนาดพิกัด 0.3 kW

ตารางที่ 6 การทำงานของการเชื่อมต่อบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จำนวนชุด	แผงเซลล์แสงอาทิตย์												ทางด้านออก		
	PV 1			PV 2			PV 3			PV 4					
	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	38.5	0.12	4.62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0.04	4
2	39.1	0.21	8.211	39.8	0.21	8.358	0	0	0	0	0	0	200	0.08	16
3	38.6	0.34	13.12	39.1	0.34	13.29	36.5	0.35	12.77	0	0	0	300	0.13	39
4	37.6	0.47	17.67	38.1	0.47	17.90	35.5	0.48	17.04	37.2	0.48	17.85	400	0.17	68

ตารางที่ 7 การทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์

จำนวนชุด	Input DC		Output AC		ความเร็วรอบ (rpm)
	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	
1	100	0.04	55	0.2	0
2	200	0.08	110	0.39	240
3	300	0.13	164	0.55	1363
4	400	0.17	223	0.74	2408

## 7. สรุป

ผลการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งแผงต่อวงจรเชื่อมต่อแบบอนุกรมมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ย 94.27 เปอร์เซ็นต์ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 400 V สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟส ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก 223 V ใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ขนาดพิกัด 0.3 kW และข้อดีคือแต่ละชุดวงจรการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์มีการควบคุมที่อิสระต่อกันทำให้เมื่อวงจรหรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชุดใดชุดหนึ่งเกิดความเสียหายหรือเกิดสภาวะเงาบังทำให้ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ วงจรที่เหลืออยู่ยังทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และรูปแบบของวงจรที่นำเสนอทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดหรือพิกัดเดียวกันต่อแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงขึ้นสำหรับอินเวอร์เตอร์ และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับพลังงานทดแทนอื่นเช่น พลังงานลมหรือแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงอื่นๆได้ หรือใช้ร่วมกับพลังงานจากแบตเตอรี่เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพื่อรักษาเสถียรภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Armstrong, M.E. Glavin and W.G. Hurley, "Comparison of Battery Charging Algorithms for Stand Alone Photovoltaic Systems," IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC2008), pp. 1469-1475.
- [2] Soeren Baekhoej Kjaer, John K. Pedersen and Frede Blaabjerg, "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules," IEEE Transactions on industry applications, vol. 41, pp. 1292-1306, Sep. 2005.
- [3] A.F. Cupertino, J.T. de Resende, H.A. Pereira and S.I. Seleme Junior, "A grid-connected photovoltaic system with a maximum power point tracker using passivity-based control applied in a boost converter," 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON), pp. 1-8, Nov. 2012.
- [4] Diary R. Sulaiman, Hilmi F. Amin, and Ismail K. Said, "Design of high efficiency DC-DC converter for photovoltaic solar home applications," Journal of Energy & Power Engineering, vol. 4 issue 11, pp. 43-51, Nov. 2010.
- [5] Yodwong, B., Kaewmanee, W., Sikkabut, S., BoonSeng, A., Mungporn, P., Sethakul, P., ... Thounthong P. (2015). 3-phase Inverter for Solar Panel. In *The 7th National Conference on Technical Education*. (pp. 23-28), Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. (in Thai)
- [6] Vongkoon, P., & Liutanakul, P. (2012). Modeling of Photovoltaic (PV) Array during Partial Shading by Using Embedded MATLAB Function. In *The 35th Electrical Engineering Conference* (pp. 425-428), Nakhonnayok, Thailand. (in Thai)

- [7] R.W. Erickson and D. Maksimovic, "Fundamentals of power electronics," Kluwer Academic Publishers, University of Colorado, 2005, USA.
- [8] Interleaved Flyback Inverter for Residential Photovoltaic Applications," 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), pp. 1-10, Sept. 2013.