



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

การสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงาน
จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Design of Single-Phase Stand-alone Inverter for Photovoltaic Modules

โดย

ดร.มนทล นาวงษ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏบรีย

รายงานการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏบรีย

2559

ชื่อเรื่อง : การสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผง
เซลล์แสงอาทิตย์
ผู้วิจัย : มณฑล นาวงษ์
ปีที่พิมพ์ : 2559

บทคัดย่อ

อินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปใช้หลักการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงขึ้น บทความนี้นำเสนอการออกแบบบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งแผงต่อวงจรและนำวงจรมาเชื่อมต่อแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงขึ้นสำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ บูสคอนเวอร์เตอร์ใช้หลักการควบคุมแบบชนิดพีไอด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F1010 เพื่อรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ ผลการทดลองพบว่าระบบที่นำเสนอสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 100 V จากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลง 20 V ถึง 40 V ตามความเข้มของแสงอาทิตย์และนำวงจรมาเชื่อมต่อแบบอนุกรมจำนวนสี่วงจรเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 400V สำหรับอินเวอร์เตอร์มีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก 223 V ใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ โดยทั้งสี่วงจรมีประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ย 94.27 เปอร์เซ็นต์

Title : Design of Single-Phase Stand-alone Inverter for Photovoltaic Modules
Researcher : Monthon Nawong
Year of Publication : 2016

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 V to 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 induction motor loads. The overall efficiency of four circuits is approximately 94.27%.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์จากมหาวิทยาลัยธุรกิจ
บัณฑิตที่สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการแปรสภาพพลังงานกลไฟฟ้า ภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้าที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากงานวิจัยฉบับนี้หรือส่วนหนึ่งส่วนใดก็ตาม ข้าพเจ้า
ขอมอบให้กับบิดาและมารดา ครู คณาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์แก่
ข้าพเจ้า

มนทล นางษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย	3
1.4 นิยามศัพท์	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module)	6
2.2 การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์	9
2.3 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์	10
2.4 การเชื่อมต่อวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม	15
2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์	16
2.6 การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ	20
2.7 บทสรุป	21
บทที่ 3 การออกแบบวงจร	22
3.1 พิกัดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	22
3.2 การออกแบบวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์	23
3.3 การควบคุมการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์	27
3.4 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์	32
3.5 บทสรุป	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบการทำงาน	35
4.1 ผลการจำลองการทำงาน	35
4.2 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรต้นแบบ	41
4.3 บทสรุป	48
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุปผลการวิจัย	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
บรรณานุกรม	51
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก วงจรที่ใช้ในการทดลอง	
ภาคผนวก ข เอกสารกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	
ภาคผนวก ง ประวัติผู้เขียน	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์เมื่อปรับค่าดีไอซีเคิล	14
2.2 ค่าคงที่ตัวคูณสำหรับการสวิตชิงแรงดันไฟฟ้ายูนิโพลาร์	19
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดพิกัด 250W ทดสอบที่ค่าความเข้มแสง ($1\text{kW}/\text{m}^2$) และอุณหภูมิ (25°C)	23
3.2 ค่าดีไอซีเคิลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	24
3.3 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์เมื่อปรับค่าดีไอซีเคิล	25
3.4 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์	27
3.5 การคำนวณแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าในแต่ละลำดับฮาร์มอนิก	34
4.1 ประสิทธิภาพการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์	44
4.2 การทำงานของการเชื่อมต่อบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์	47
4.3 การทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์	48

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง	2
1.2 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบใช้วงจรดิซิจูติซิคอนเวอร์เตอร์	2
2.1 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์	7
2.2 กราฟการทำงานของ I-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่อุณหภูมิคงที่	8
2.3 กราฟการทำงานของ P-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง	9
2.4 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์	10
2.5 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบบูสคอนเวอร์เตอร์	10
2.6 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์	11
2.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก v_O กระแสไฟฟ้า i_L และแรงดันไฟฟ้าขั้วเก็บ V_G	11
2.8 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ขณะสวิตช์นำกระแสไฟฟ้า	12
2.9 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ขณะสวิตช์หยุดนำกระแสไฟฟ้า	12
2.10 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม	16
2.11 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสแบบยูนิโพลาร์	17
2.12 การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	18
2.13 คุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	21
3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์	22
3.2 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์	27
3.3 แผนภาพบล็อกการทำงานของการทำงานการควบคุมแบบดิจิตอล	28
3.4 แผนภาพโอดีของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์	29
3.5 แผนภาพโอดีของการควบคุมชนิดพีไอ	30
3.6 แผนภาพโอดีของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์เมื่อใช้การควบคุมชนิดพีไอ	30
3.7 แผนผังการทำงานของการทำงานการควบคุมแบบดิจิตอล	-32
4.1 การจำลองการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink	35
4.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (บน) แรงดันไฟฟ้า v_O , (กลาง) กระแสไฟฟ้า i_L , (ล่าง) สัญญาณขั้วเก็บของมอเตอร์ v_G เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คงที่	36
4.3 การจำลองการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ผลการจำลองการทำงานของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ (บน) ความเข้มแสง, (กลาง) แรงดันไฟฟ้า v_o , (ล่าง) กระแสไฟฟ้า i_L เมื่อความเข้มแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง	37
4.5 การจำลองการเชื่อมต่อวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม	38
4.6 ผลการจำลองการเชื่อมต่อวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม (บน) แรงดันไฟฟ้า v_o และ (ล่าง) กระแสไฟฟ้า i_o เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คงที่	38
4.7 การจำลองการเชื่อมต่อวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง	39
4.8 ผลการจำลองการเชื่อมต่อวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม (บน) แรงดันไฟฟ้า v_{pv} , (กลาง) แรงดันไฟฟ้า v_o , (ล่าง) กระแสไฟฟ้า i_o เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง	40
4.9 การจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์	40
4.10 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าชนิดการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	41
4.11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	42
4.12 วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	42
4.13 ผลการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ (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) 36	44
4.14 วงจรอินเวอร์เตอร์	45
4.15 ผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์ (CH1) แรงดันไฟฟ้า $v_{o,ac}$ (200 V/div), (CH2) กระแสไฟฟ้า $i_{o,ac}$ (5 A/div) และแกนของเวลา (20ms/Div)	47
4.16 โหลดอินดักชันมอเตอร์	48

สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

สัญลักษณ์	ความหมาย
v_{PV}	แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์
i_{PV}	กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์
I_s	กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวของไดโอด (A)
I_{CC}	กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์ (A)
k	ค่าคงที่ของโบลมันซ์ (J/K)
q	ค่าประจุอิเล็กตรอน (C)
T	อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (K)
R_s	ความต้านทานอนุกรม (Ω)
R_p	ความต้านทานขนาน (Ω)
m	Ideality factor ของไดโอด ($1 < m < 2$)
I_{SC}	กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (A)
V_{OC}	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V)
G	ค่าความเข้มแสง (W/m^2)
T_{ref}	อุณหภูมิอ้างอิงที่ ($25^\circ C$)
G_{ref}	ค่าความเข้มแสงอ้างอิงที่ ($1kW/m^2$)
α	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแส ($A/^\circ C$)
β	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดัน ($V/^\circ C$)
V_{mp}	แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุด
I_{mp}	กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุด
P_{max}	กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้มีค่าสูงสุด
v_{in}	แรงดันไฟฟ้าทางเข้าของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์
v_o	แรงดันไฟฟ้าทางออกของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์
D_{min}	ค่าดิวตี้ไซเคิลต่ำสุด
D_{max}	ค่าดิวตี้ไซเคิลสูงสุด
D	ค่าดิวตี้ไซเคิล
Δi_L	ค่าริบเบิลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
$i_{L,max}$	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุด
$i_{L,min}$	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่ำสุด

สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
i_L	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ
V_G	แรงดันไฟฟ้าขั้วเกตของ MOSFET
$L_{\min}$	ค่าของตัวเหนี่ยวนำต่ำสุด
$L_{\max}$	ค่าของตัวเหนี่ยวนำสูงสุด
L	ค่าของตัวเหนี่ยวนำ
C	ค่าของตัวเก็บประจุ
T_s	คาบเวลาในการทำงาน
f_s	ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์
f_1	คือความถี่มูลฐาน
i_o	กระแสไฟฟ้าทางดำนออก
m_a	คืออัตราส่วนการมอดูเลชัน
m_f	อัตราส่วนการมอดูเลตความถี่

บทที่ 1

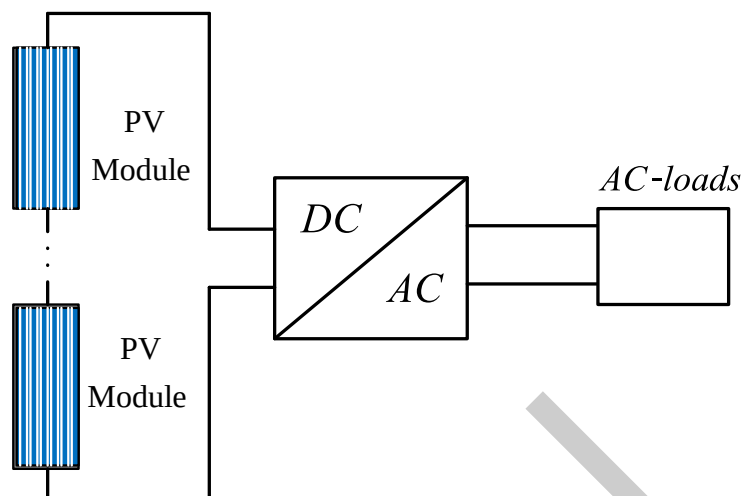
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้มีความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากฟอสซิลกำลังเริ่มหมดไปและปัญหาจากการใช้พลังงานจากฟอสซิลคือทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังนั้นพลังงานทดแทนจึงเป็นทางเลือกที่นำมาใช้งานทดแทนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากฟอสซิล เช่น พลังงานลม และพลังงานจากแสงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งเป็นพลังงานสะอาด มีอยู่ทั่วไป และไม่มีต้นทุนของวัตถุดิบ พลังงานจากแสงอาทิตย์ใช้อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell: PV) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานจึงต้องนำมาต่อเชื่อมเป็นวงจรแบบโมดูล (Module) หรือพาแนล (Panel) เรียกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module or PV Panel) (นภค และสุรชัย, 2555; ปกครอง และพิสิษฐ์, 2555) การใช้ประโยชน์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายรูปแบบ เช่น นำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้โดยตรงหรือนำมาประจุแบตเตอรี่ (มนทล นาวงษ์, 2558) และใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Erickson, R.W., & Maksimovic, D., 2005)

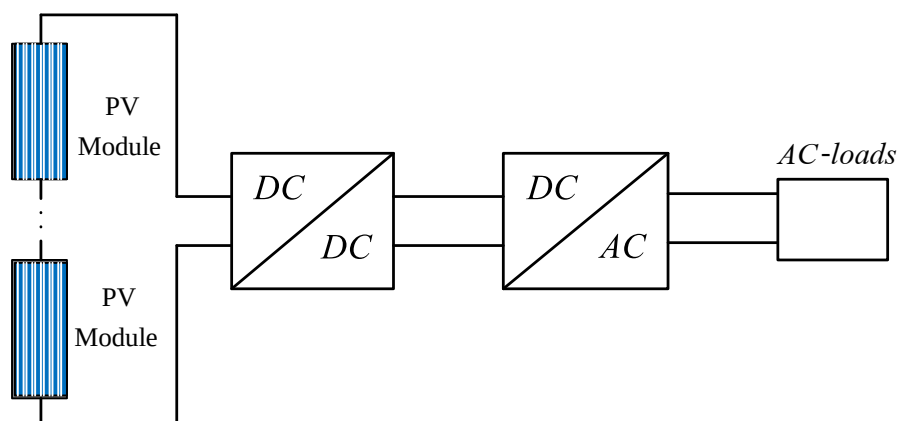
อินเวอร์เตอร์ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปเป็นแบบชนิดหนึ่งเฟสและชนิดสามเฟส สามารถแบ่งตามประเภทการใช้งานได้เป็น 2 ประเภทคือ อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า (Grid-connected inverter) (Sulaiman, D.R., Ameen, H.F., & Said, I.K., 2010) และอินเวอร์เตอร์แบบอิสระ (Stand-alone inverters) (Cupertino, A.F., de Resende, J.T., Pereira, H.A., & Seleme Junior, S.I., 2012; Aibadia, M.H et al, 2014) การออกแบบอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่มีรูปแบบการทำงานโดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับชนิดหนึ่งเฟสพิกัดแรงดันไฟฟ้า 220V และนำไปใช้งานกับโหลดประเภทกระแสสลับโดยตรง แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 30V ต่อแผง ซึ่งอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 350V ถึง 400V ในการเปลี่ยนรูปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัด 220V ดังนั้นเมื่อต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงขึ้นจึงต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 12 แผงถึง 14 แผง ต่อแบบอนุกรมเพื่อเป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุตของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 1.1 ข้อเสียคือต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อแบบอนุกรมจำนวนมาก ซึ่งทำให้มีโอกาสเกิดการบังเงาที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงใดแผงหนึ่ง ทำให้การทำงานของอินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพลดลง และไม่สามารถควบคุมประสิทธิภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์

ผลิตได้มีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ ดังนั้นเมื่อต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออกคงที่จึงต้องควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำให้ใช้วิธีการและวงจรควบคุมการทำงานที่มีความซับซ้อนขึ้น (ไพศศักดิ์ และสมภพ, 2556)



รูปที่ 1.1 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง

วงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ถูกนำมาใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้คงที่เพื่อเป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 1.2 เนื่องจากวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์มีการควบคุมที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อนเหมือนวงจรอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นการนำวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ไปใช้งานร่วมกับวงจรอินเวอร์เตอร์ มีรูปแบบของการใช้งานโดยทั่วไปคือการนำวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ชนิดวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์มาควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีรูปแบบการต่อแบบอนุกรม (Geoffrey R.W, 2004; Kjaer, S.B., Pedersen, J.K., & Blaabjerg, F., 2005) วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่ใช้หม้อแปลงในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นวงจรจึงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบามีประสิทธิภาพสูงจึงเหมาะที่นำมาใช้สำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 1.2 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบใช้วงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์

ในงานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์และวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์เป็นชนิดบูสคอนเวอร์เตอร์เพื่อเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าและสามารถควบคุมระดับของแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ โดยสามารถใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ชนิดหนึ่งเฟสพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 1 HP

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 1 kW ที่ใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ชนิดหนึ่งเฟสพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 1 HP
- 1.2.2 ออกแบบวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์ในการควบคุมกำลังไฟฟ้า
- 1.2.4 เพื่อศึกษาจำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ชนิดหนึ่งเฟสพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 1 HP

1.3 สมมติฐานการวิจัย

- 1.3.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 250W สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าสูงสุดขณะเปิดวงจร (V_{oc}) 37.1V กระแสไฟฟ้าสูงสุดขณะลัดวงจร (I_{sc}) 8.92A แรงดันไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) 29.9V และกระแสไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) 8.35A (ความเข้มแสง 1,000 W/m² อุณหภูมิ 25°C) ค่าของความเข้มแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสภาวะอากาศในแต่ละวัน

($200 \text{ W/m}^2 - 800 \text{ W/m}^2$) ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไม่คงที่ ดังนั้นเมื่อนำไปใช้งานจึงต้องใช้งานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์คอนเวอร์เตอร์ที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ $400\text{V} \pm 20\text{V}$

1.3.2 วงจรอิเล็กทรอนิกส์คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 1 แผงขนาด 250W ที่มีขนาดของแรงดันไฟฟ้า $20\text{V} - 35\text{V}$ มาต่อแบบอนุกรมและทำการเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ให้มีระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ทางด้านออกคงที่และสามารถทำให้ระดับของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกมีค่าไม่น้อยกว่าสองเท่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้า

1.3.3 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด $400\text{V} \pm 20\text{V}$ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด $220\text{V} \pm 20\text{V}$ โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ SPWM ชนิดยูนิโพลาร์

1.4 นิยามศัพท์

1.4.1 Photovoltaic (PV) cell หมายถึงสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นให้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

1.4.2 DC-DC Converters หมายถึงวงจรที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านใช้งาน

1.4.3 DC-AC Converters หรือ Inverter หมายถึงวงจรที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านใช้งาน

1.4.4 Grid-connected inverter หมายถึงอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบนระบบไฟฟ้า

1.4.5 Stand-alone inverters หมายถึงอินเวอร์เตอร์แบบอิสระ

1.4.6 SPWM หมายถึงการสวิตชิงแบบพีคดับเบิลยูเอ็ม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ใช้สำหรับระบบสูบน้ำจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำการเกษตร ในการลดการใช้งานจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากฟอสซิล

1.5.2 การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการสอนนักศึกษาในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

- 1.5.3 จำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับการใช้งานสำหรับอินเวอร์เตอร์ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการสอนนักศึกษาในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
- 1.5.4 แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาดพิกัด 220V ที่ใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ชนิดหนึ่งเฟสสำหรับการสอนนักศึกษาในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
- 1.5.5 ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาอินเวอร์เตอร์เพื่อเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า (Grid-connected inverter) สำหรับโครงการโซลาร์ฟาร์ม (Solar PV rooftop) สำหรับโครงการวิจัยที่จะทำต่อไป

บทที่ 2

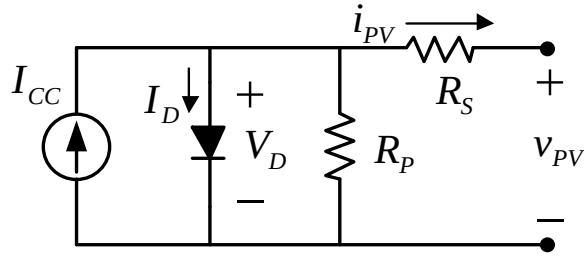
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (Solar Radiation) เป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการใช้สิ่งประดิษฐ์ที่เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Cell: PV) หรือโซลาเซลล์ (Solar Cell) เพื่อการผลิตพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดเล็กและผลิตแรงดันไฟฟ้าได้น้อยมาก (ประมาณ 0.7 โวลต์ต่อหนึ่งเซลล์) ดังนั้นเมื่อนำไปใช้งานให้ได้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงมากขึ้นต้องนำเซลล์แสงอาทิตย์มาเชื่อมต่อเป็นแบบโมดูล (Module) หรือพาแนล (Panel) เรียกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module or PV Panel) และเมื่อต้องการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่สูงมากขึ้นต้องนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อเชื่อมกันเป็นวงจรขนาดใหญ่เรียกว่าอาร์เรย์ (Array)

การผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบหลักคือ ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand-alone system) ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) โดยระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระคือระบบที่ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ที่อยู่ในรูปของพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง วงจรอิเล็กทรอนิกส์คอนเวอร์เตอร์ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มหรือลดระดับของแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ไปใช้งานกับโหลดกระแสตรง หรือถ้านำไปใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับต้องมีอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงรูปแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อนำไปใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับหรือการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module)

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ที่อยู่ในรูปของพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขึ้นอยู่กับปัจจัยซึ่งได้แก่อุณหภูมิ (T) และความเข้มแสง (G) สามารถนำเสนอโดยใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแรงดันไฟฟ้า (v_{PV}) และกระแสไฟฟ้า (i_{PV}) ที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถอธิบายได้ตามสมการดังนี้ (Tanouti, J., Setti, M., Aziz, A., & Mamoun A.EI., 2012)

$$i_{PV} = I_{CC} - I_S \left(e^{\left(\frac{q(v_{PV} + R_S i_{PV})}{mkT} \right)} - 1 \right) - \frac{v_{PV} + R_S i_{PV}}{R_p} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$I_{CC}(T) = I_{SC}(T_{ref}) \frac{G}{G_{ref}} + \alpha(T - T_{ref}) \quad (2.2)$$

$$I_S(T_{ref}) = \frac{I_{SC}(T_{ref})}{\left(e^{\left(\frac{qV_{OC}(T_{ref})}{mkT_{ref}} \right)} - 1 \right)} \quad (2.3)$$

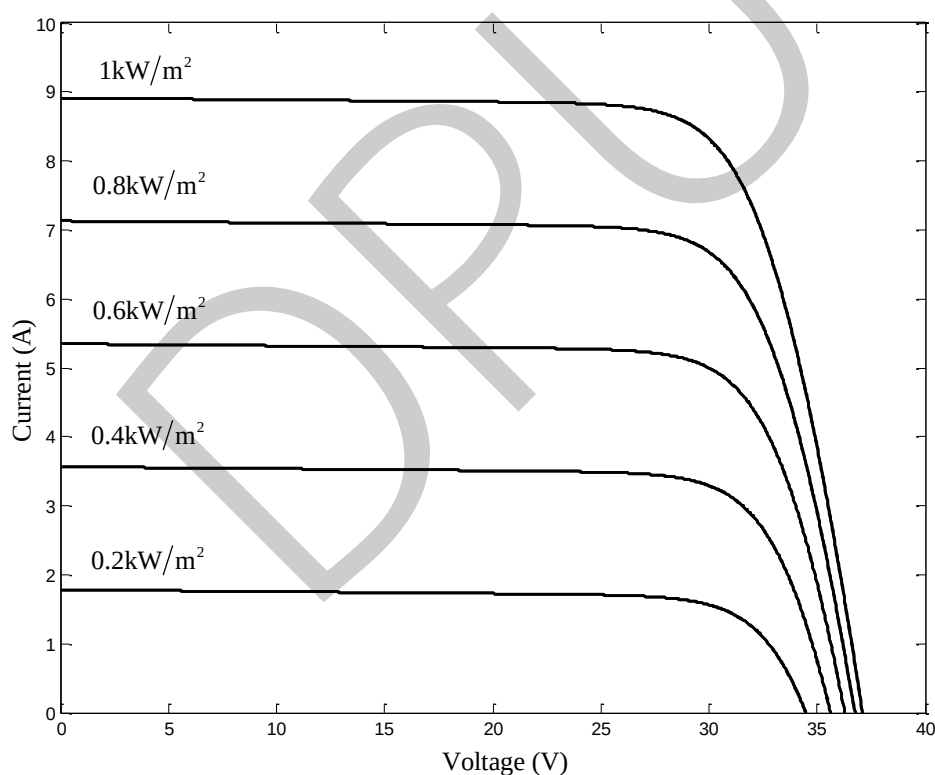
$$V_{OC}(T) = V_{OC}(T_{ref}) + \beta(T - T_{ref}) \quad (2.4)$$

เมื่อ

- | | |
|----------|--------------------------------------|
| I_S | คือ กระแสอิ่มตัวของไดโอด (A) |
| I_{CC} | คือ กระแสที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์ (A) |
| k | คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (J/K) |
| q | คือ ค่าประจุอิเล็กตรอน (C) |
| T | คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (K) |
| R_S | คือ ความต้านทานอนุกรม (Ω) |

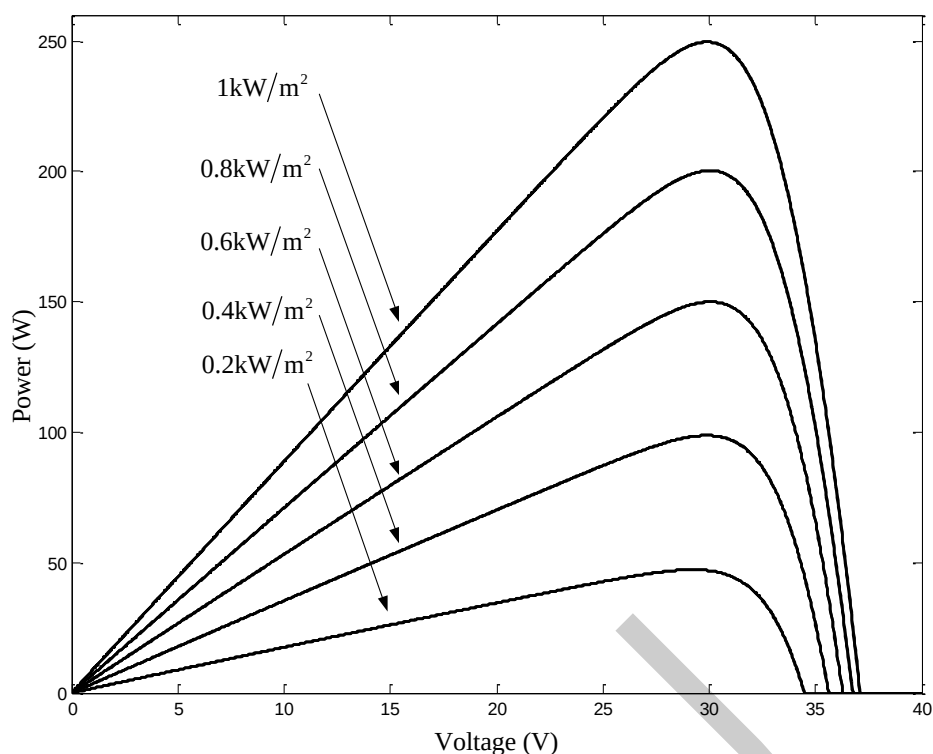
R_p	คือ ความต้านทานขนาน (Ω)
m	คือ Ideality factor ของไดโอด ($1 < m < 2$)
I_{SC}	คือ กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (A)
V_{OC}	คือ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V)
G	คือ ค่าความเข้มแสง (W/m^2)
T_{ref}	คือ อุณหภูมิอ้างอิงที่ ($25^\circ C$)
G_{ref}	คือ ค่าความเข้มแสงอ้างอิงที่ ($1kW/m^2$)
α	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแส ($A/^\circ C$)
β	คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดัน ($V/^\circ C$)

จากสมการที่ (2.1) ทำให้ได้ผลการจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ตามกราฟการทำงานของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V Curve) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟการทำงานของ I-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่อุณหภูมิคงที่

เมื่อพิจารณาค่าของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ผลที่ได้คือมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าตามความเข้มแสงรูปที่ 2.3 กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้มีค่าสูงสุด (P_{max}) ที่จุดแรงดันไฟฟ้า (V_{mp}) และกระแสไฟฟ้า (I_{mp})



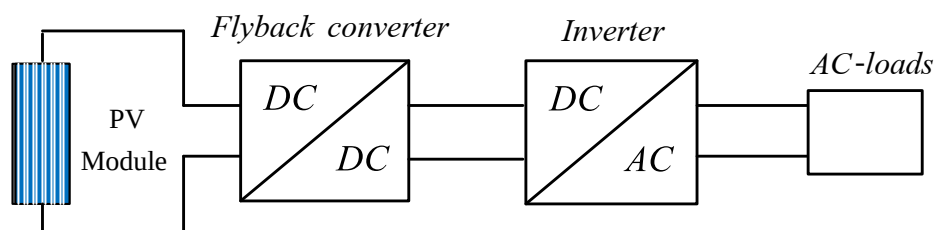
รูปที่ 2.3 กราฟการทำงานของ P-V Curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง

2.2 การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับต้องใช้อินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงรูปแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อนำไปใช้งานกับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับหรือการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า แต่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ในระดับต่ำกว่าพิกัดของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการแปลงรูปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ดังนั้นจึงต้องใช้วงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์มาช่วยในการเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีรูปแบบของการนำวงจรดีซีทูดีซีคอนเวอร์เตอร์มาใช้งานดังนี้

2.2.1 อินเวอร์เตอร์แบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback converter)

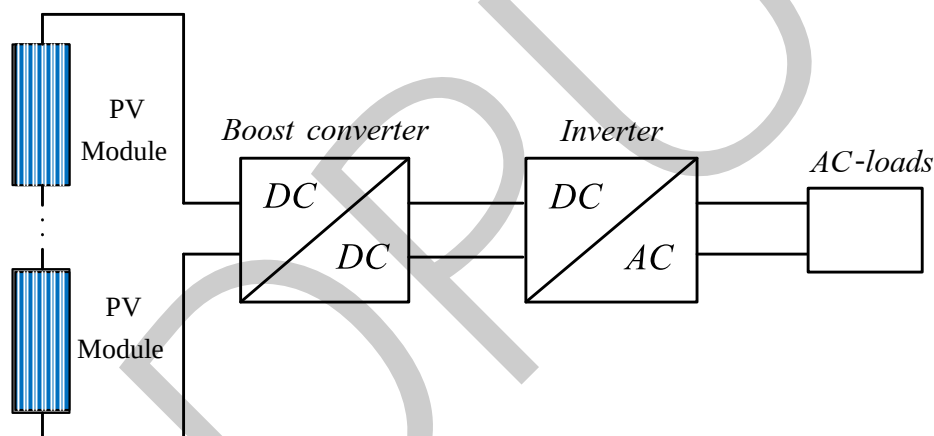
การนำวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์มาใช้งานในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการนำมาเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้นถึงระดับความต้องการแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 2.4 โดยปกติใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงหนึ่งแผงต่อวงจรและเมื่อต้องการกำลังไฟฟ้าทางด้านโหลดที่สูง จึงต้องนำวงจรทั้งหมดมาขนานกันเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าทางด้านออกที่ต้องการ



รูปที่ 2.4 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

2.2.2 อินเวอร์เตอร์แบบบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost converter)

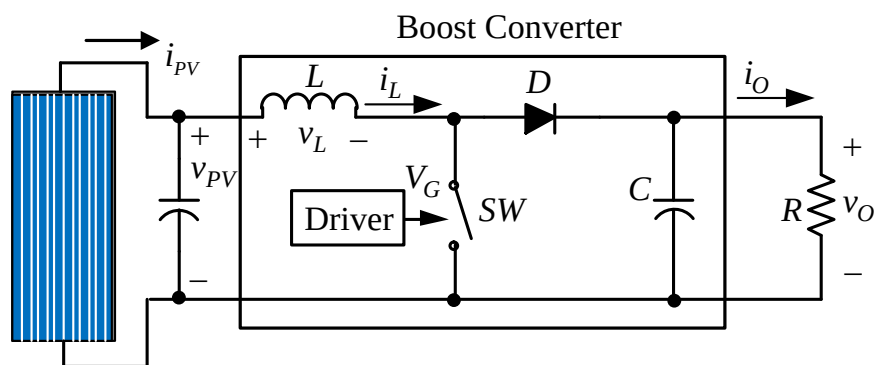
อินเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบบูสคอนเวอร์เตอร์ การทำงานโดยการเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น ซึ่งมีการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นก่อนที่นำวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์มาเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าต่อไปดังรูปที่ 2.5



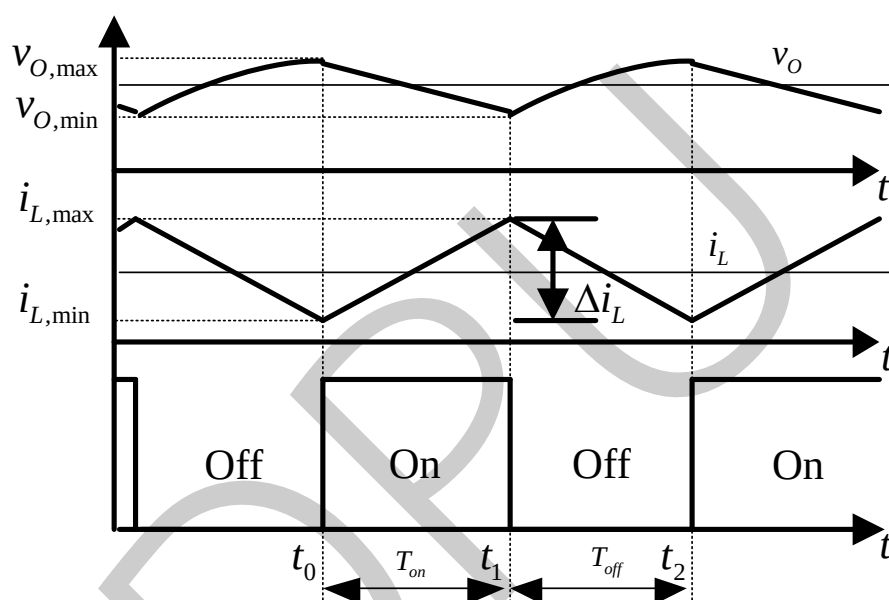
รูปที่ 2.5 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบบูสคอนเวอร์เตอร์

2.3 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้า และสามารถรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกให้คงที่ โดยวงจรประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตช์ (SW) ไดโอด (D) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ดังรูปที่ 2.6 เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรจากลักษณะการทำงานของสวิตช์เป็นแบบนำกระแสไฟฟ้าและเป็นแบบไม่นำกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดรูปแบบการทำงานของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก v_o และกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ i_L ขณะสวิตช์นำกระแสไฟฟ้าและไม่นำกระแสไฟฟ้างดังรูปที่ 2.7

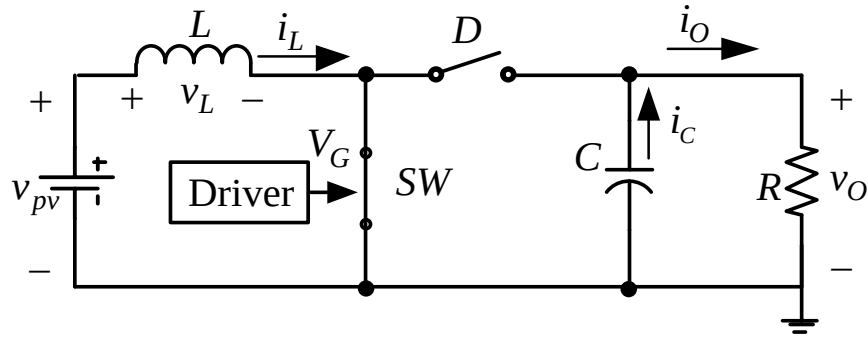


รูปที่ 2.6 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 2.7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก v_O กระแสไฟฟ้า i_L และแรงดันไฟฟ้าขั้วเกต V_G

2.3.1 สวิตช์นำกระแสไฟฟ้าและไดโอดไม่นำกระแสไฟฟ้า

สวิตช์ SW นำกระแสไฟฟ้าและไดโอด D ไม่นำกระแสไฟฟ้า ($t_0 < t < t_1$) ทำให้ได้รูปวงจรการทำงานดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ขณะสวิตช์นำกระแสไฟฟ้า

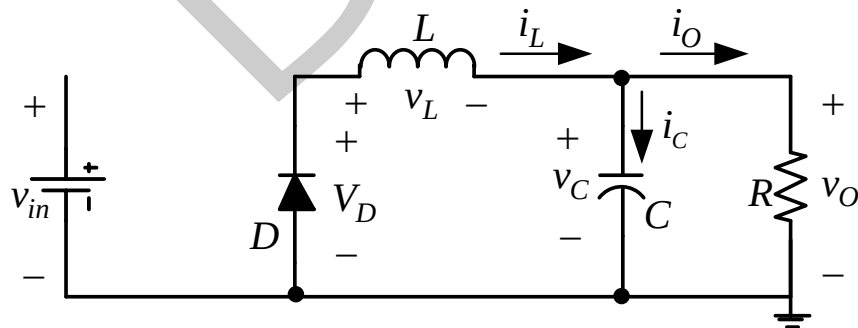
เมื่อพิจารณาสมการของกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำและสมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแสดงได้ดังนี้

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_{PV}}{L} \quad (2.5)$$

$$\frac{dv_O}{dt} = -\frac{i_O}{C} \quad (2.6)$$

2.3.2 สวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้าและไดโอดนำกระแสไฟฟ้า

สวิตช์ SW หยุดนำกระแสไฟฟ้าและไดโอด D นำกระแสไฟฟ้า ($t_1 < t < t_2$) ทำให้ได้รูปวงจรการทำงานดังรูปที่ 2.9 เมื่อพิจารณาสมการของกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำและสมการของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.9 วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ขณะสวิตช์หยุดนำกระแสไฟฟ้า

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_{PV} - v_O}{L} \quad (2.7)$$

$$\frac{dv_O}{dt} = \frac{i_L - i_O}{C} \quad (2.8)$$

2.3.3 แรงดันไฟฟ้าด้านออก

เมื่อพิจารณาที่การทำงานของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสไฟฟ้าและสวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้าทำให้ได้ค่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกดังนี้

$$di_{L,on} = \frac{v_{PV}}{L} DT_s \quad (2.9)$$

$$di_{L,off} = \frac{v_{PV} - v_O}{L} (1-D)T_s \quad (2.10)$$

$$di_{L,on} + di_{L,off} = 0 \quad (2.11)$$

$$\left(\frac{v_{PV}}{L} DT_s \right) + \left(\frac{v_{PV} - v_O}{L} (1-D)T_s \right) = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{v_O}{v_{PV}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (2.13)$$

เมื่อ D คือ ค่าดิวตี้ไซเคิล

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าตามสมการที่ 2.13 ทำให้สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกต่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านได้จากการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์เมื่อปรับค่าดีไอซีเคิล

ค่าดีไอซีเคิล (D)	อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า (v_o/v_{pv})
0.0	1
0.1	1.11
0.2	1.25
0.3	1.43
0.4	1.67
0.5	2
0.6	2.5
0.7	3.33
0.8	5
0.9	10
1.0	Infinity

2.3.4 ค่าของตัวเหนี่ยวนำ

ในการออกแบบวงจรต้องกำหนดค่าของตัวเหนี่ยวนำซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของกระแสไฟฟ้าที่ทางออกดังนี้

$$i_L = \frac{\left(\frac{v_{PV}}{(1-D)} \right)^2}{v_{PV} \cdot R} = \frac{v_{PV}}{(1-D)^2 \cdot R} \quad (2.14)$$

ค่า ripple ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ Δi_L หาได้จาก

$$\Delta i_L = i_{L,\max} - i_{L,\min} \quad (2.15)$$

เมื่อพิจารณาสมการของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแสไฟฟ้าตามสมการที่ (2.16)

$$\Delta i_{L,on} = i_{L,\max} - i_{L,\min} = \frac{v_{PV}}{L} \cdot D \cdot T_s \quad (2.16)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำสูงสุด
เป็นไปตามสมการดังนี้

$$i_{L,\max} = i_L + \frac{\Delta i_L}{2} = i_L + \frac{v_{PV}}{2L} \cdot D \cdot T_s \quad (2.17)$$

$$i_{L,\min} = i_L - \frac{\Delta i_L}{2} = i_L - \frac{v_{PV}}{2L} \cdot D \cdot T_s \quad (2.18)$$

ในการออกแบบหาค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจร buck คอนเวอร์เตอร์เมื่อกำหนดให้วงจรทำงาน
อยู่ในโหมดของกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง และต้องกำหนดค่าของ Δi_L ให้กับวงจร ดังนั้นค่าของตัว
เหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้ตามสมการ (2.19) ดังนี้

$$L = \frac{v_{PV}}{\Delta i_L} \cdot D \cdot T_s \quad (2.19)$$

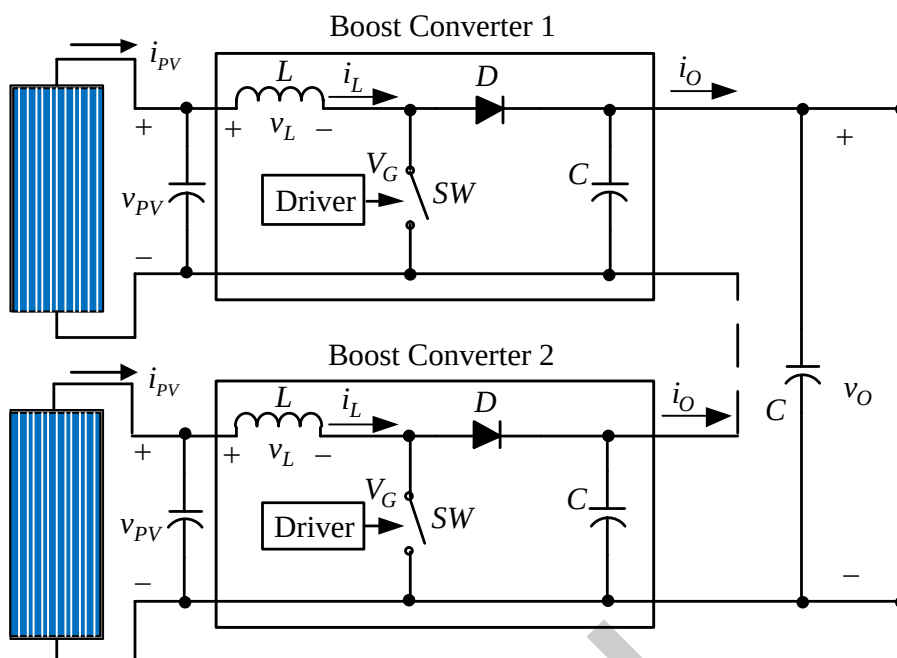
2.3.5 ค่าของตัวเก็บประจุ

การหาค่าของตัวเก็บประจุโดยการกำหนดให้ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก
ให้มีค่าไม่เกิน 1% ดังนั้นค่าตัวเก็บประจุเป็นไปตามสมการที่ (2.20) ดังนี้

$$C = \frac{D \cdot T_s}{R \cdot \Delta v_o / v_o} \quad (2.20)$$

2.4 การเชื่อมต่อวงจร buck คอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม

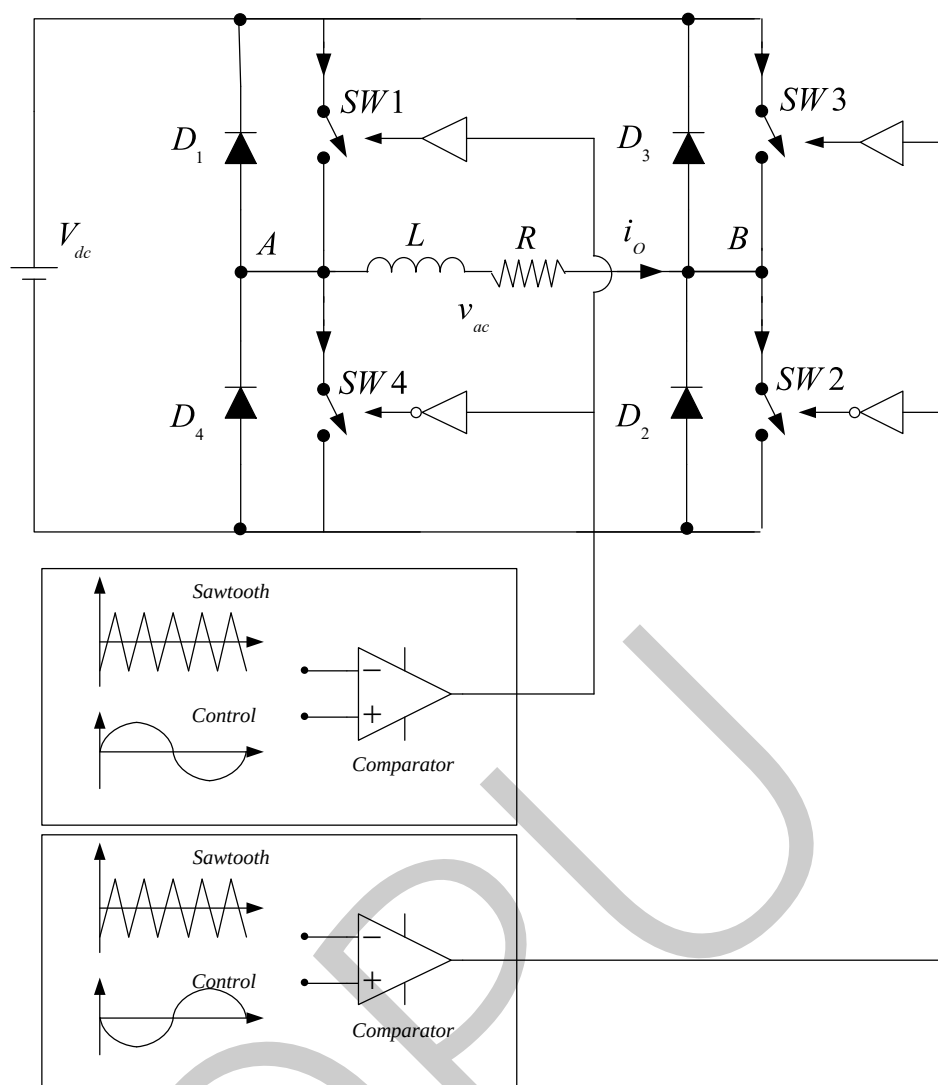
จากวงจร buck คอนเวอร์เตอร์โดยใช้แหล่งพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งแผง
ขนาดพิกัด 250W, 29.9V, 8.34A มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 100V เมื่อนำมาต่อ
แบบอนุกรมดังรูปที่ 2.10 ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าทางด้านออก 200V ดังนั้นถ้าวงจรอินเวอร์เตอร์
ต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเข้า 400V จึงต้องทำการเชื่อมต่อวงจร buck คอนเวอร์เตอร์แบบ
อนุกรมจำนวน 4 วงจรเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าทางด้านออก 400V



รูปที่ 2.10 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่มีการเชื่อมต่อแบบขนาน

2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก ($v_{o,ac}$) และปรับค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก (f_o) อินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ใช้หลักการสวิตชิงแบบพีคเบิกลูเอ็มนิคการสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งสวิตช์สี่ตัวคือ S_1 , S_2 , S_3 และ S_4 โดยที่ S_1 กับ S_4 และ S_2 กับ S_3 ต้องทำงานไม่พร้อมกัน เนื่องจากการสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์มีสองสัญญาณที่แตกต่างกัน สัญญาณแรกใช้ในการควบคุมสวิตช์ S_1 กับ S_4 และสัญญาณที่สองใช้ในการควบคุมสวิตช์ S_2 กับ S_3



รูปที่ 2.11 วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสแบบยูนิโพลาร์

การสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์คือการสร้างสัญญาณสวิตช์แบบพีคเบิลยูเอ็มที่นำสัญญาณฟันเลื่อย (sawtooth wave) มาเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์ (sine wave) สองสัญญาณที่มีเฟสตรงข้ามกัน เพื่อให้ได้สัญญาณสวิตช์ที่มีขนาดของค่าดิวตี้ไซเคิล (D) แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาสองสัญญาณดังรูป 2.12

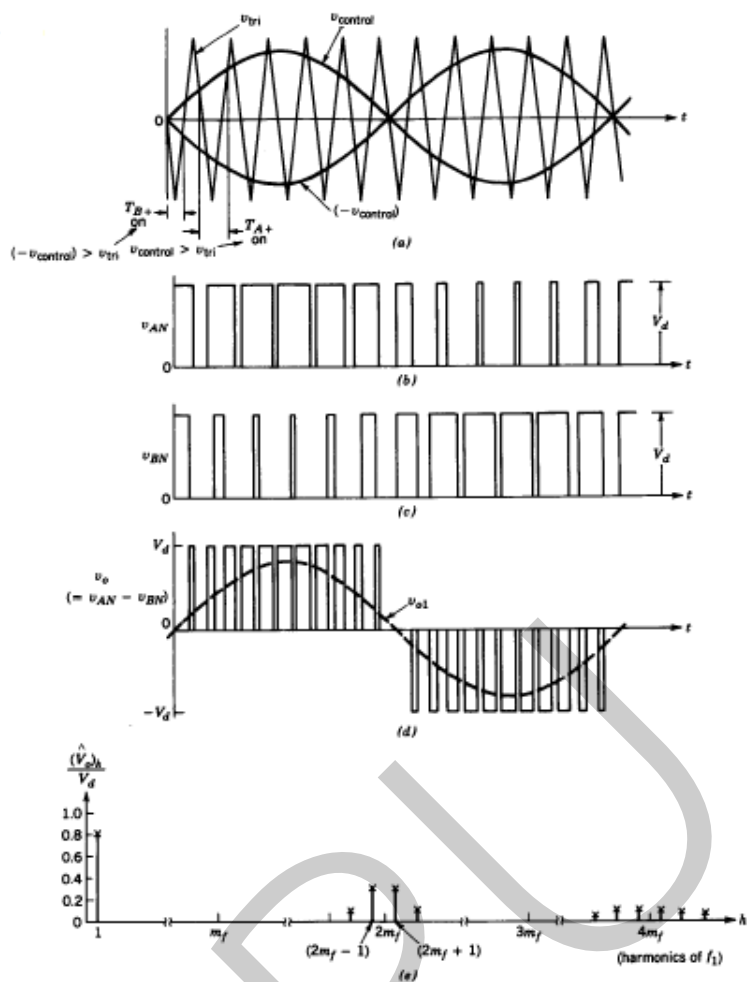


Figure 8-15 PWM with unipolar voltage switching (single phase).

รูปที่ 2.12 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ [4]

จากการทำงานดังรูป 2.12 มีเงื่อนไขในการทำงานของการสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์มีดังนี้

- ก) ถ้าสัญญาณไซน์ ($v_{control}$) มากกว่าสัญญาณฟันเลื่อย (v_{tri}) ทำให้ได้สัญญาณควบคุมมีค่าเป็น 1 แรงดันไฟฟ้า (v_{AN}) มีค่าตามสมการดังนี้

$$v_{AN} = V_{dc} \quad (2.21)$$

- ข) ถ้าสัญญาณไซน์ ($v_{control}$) น้อยกว่าสัญญาณฟันเลื่อย (v_{tri}) ทำให้ได้สัญญาณควบคุมมีค่าเป็น 0 แรงดันไฟฟ้า (v_{AN}) มีค่าตามสมการดังนี้

$$v_{AN} = -V_{dc} \quad (2.22)$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกที่ความถี่มูลฐาน ($v_{o,1}$) มีค่าดังนี้

$$v_{o,1} = m_a \cdot V_{dc} \quad (2.23)$$

โดยที่ m_a คืออัตราส่วนมอดูเลชันซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.24)

$$m_a = \frac{v_{tri}}{v_{control}} \quad (2.24)$$

อัตราส่วนการมอดูเลตความถี่ (m_f) มีค่าตามสมการที่ (2.25) ทำให้ได้ค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ตามลำดับของฮาร์โมนิกดังตารางที่ 2.2

$$m_f = \frac{f_{sw}}{f_1} \quad (2.25)$$

เมื่อ f_{sw} คือความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์
 f_1 คือความถี่มูลฐาน

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ตัวคูณสำหรับการสวิตช์แรงดันไฟฟ้ายูนิโพลาร์

ฮาร์โมนิก	$m_a = 0.2$	$m_a = 0.4$	$m_a = 0.6$	$m_a = 0.8$	$m_a = 1.0$
1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$2m_f \pm 1$	0.190	0.326	0.370	0.314	0.181
$2m_f \pm 3$		0.024	0.071	0.139	0.212
$2m_f \pm 5$				0.013	0.033
$4m_f \pm 1$	0.163	0.157	0.008	0.105	0.068
$4m_f \pm 3$	0.012	0.070	0.132	0.115	0.009
$4m_f \pm 5$			0.034	0.084	0.119
$4m_f \pm 7$				0.017	0.050

กลุ่มของฮาร์โมนิกและค่าคงที่ตัวคูณสำหรับการสวิตช์แรงดันไฟฟ้ายูนิโพลาร์มีค่าตามตารางที่ 2.2 โดยการหาค่าอิมพีแดนซ์ที่โหลดของแต่ละค่าของฮาร์โมนิกต่างๆ มีค่าตามสมการดังนี้

$$Z_n = \sqrt{R^2 + (n(2\pi f)L)^2} \quad (2.26)$$

2.6 การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ

หลักการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับสามารถทำได้โดยการปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ได้ที่ทำโดยสมการ

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.27)$$

เมื่อ N_s คือความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนมีหน่วยเป็นความเร็วรอบต่อนาที
 f คือความถี่ของแรงดันไฟฟ้า
 P คือจำนวนขั้วของมอเตอร์

จากสมการจะเห็นได้ว่าความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจะแปรผันตรงกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า แต่เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ เฟลาของมอเตอร์จะหมุนโดยมีความเร็วต่ำกว่าความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุนอยู่เล็กน้อยที่เรียกว่าความเร็วสลลิป (Slip) มีค่าประมาณ 1-3% ขึ้นอยู่กับภาระของมอเตอร์ ที่ทำได้จากสมการ

$$N_r = N_s(1-s) \quad (2.28)$$

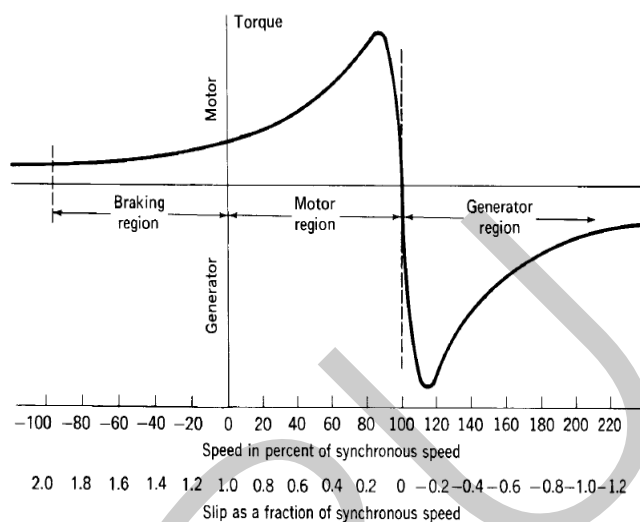
เมื่อ N_r คือความเร็วของเฟลามอเตอร์มีหน่วยเป็นความเร็วรอบต่อนาที
 s เป็นความอัตราส่วนความแตกต่างของความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนกับความเร็วของเฟลา

มอเตอร์ต่อความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (2.29)$$

ดังนั้นเราจะหาความเร็วรอบของเฟลามอเตอร์ได้เท่ากับความเร็วรอบของสนามแม่เหล็ก

หมุนลบด้วยความเร็วของสลิป แต่เนื่องจากความเร็วของสลิปมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุน เราจึงอาจประมาณความเร็วรอบของเฟลอมอเตอร์ได้จากความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุน แต่ไม่ใช่เพียงเราสามารถปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าได้แล้วจะป้อนให้กับมอเตอร์ได้เลยเราจะต้องปรับขนาดของแรงดันให้สอดคล้องกับความถี่ด้วย นั่นก็จะต้องให้อัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่มีค่าคงที่เพื่อให้สนามแม่เหล็กมีขนาดคงที่ส่งผลให้แรงบิดมีค่าคงที่ทุกค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 คุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

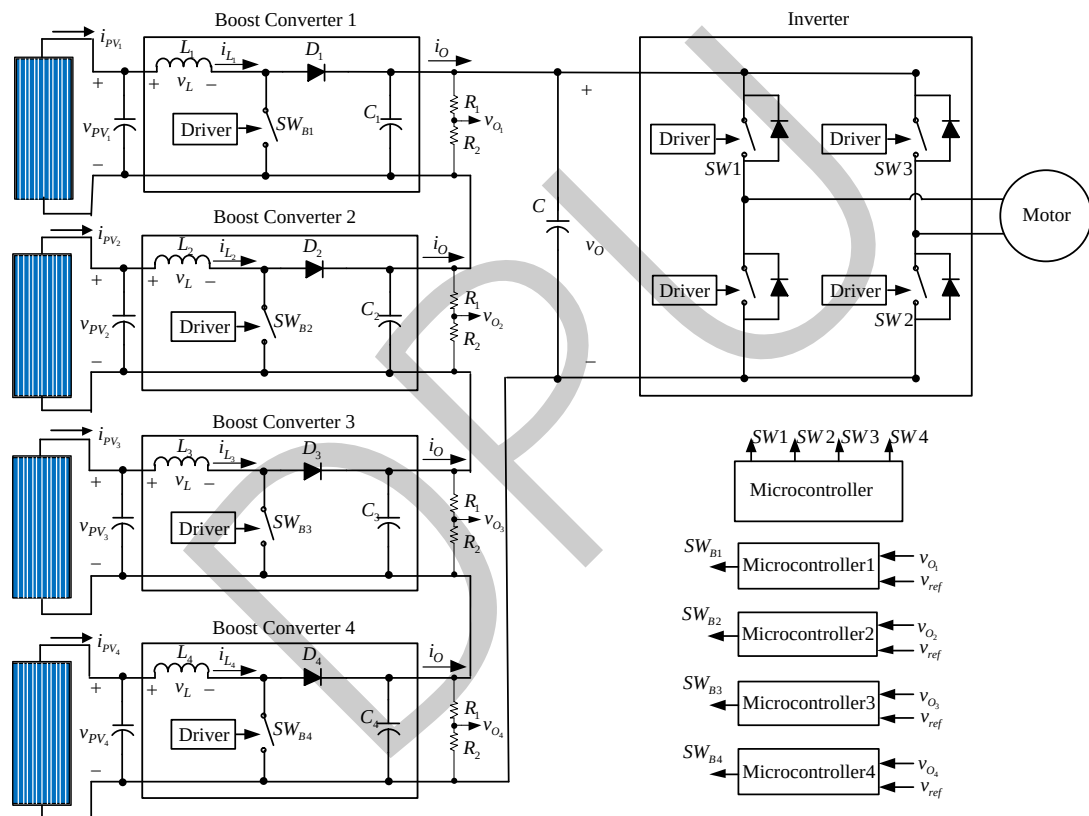
2.7 บทสรุป

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Stand-alone system) ในงานวิจัยนี้ นำเสนอการนำวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์มาใช้ในการเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานต่อหนึ่งแผง และการนำวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์มาอนุกรมกับเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น ดังนั้นระบบนี้จึงเหมาะสมในการควบคุมพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แม้มีการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศ ในส่วนของการออกแบบระบบทั้งหมดที่ใช้งานคือ การเลือกใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การออกแบบและควบคุมการทำงานของวงจรดีซิงค์ดีซีคอนเวอร์เตอร์ การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์มีการกล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 3

การออกแบบวงจร

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบวงจรดิจิทัลสี่คอนเวอร์เตอร์และวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 3.1 โดยวิธีการนำวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกและควบคุมให้คงที่ และนำวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์มาต่ออนุกรมเพื่อให้ได้ระดับของแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นจนสามารถเปลี่ยนรูปกำลังงานไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ชนิดหนึ่งเฟสพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 1 HP



รูปที่ 3.1 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3.1 พิกัดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ขนาดพิกัด 250W และมีค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp}) ขนาด 29.9V และกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp}) ขนาด 8.34A ที่ค่าความเข้มแสง ($1\text{kW}/\text{m}^2$) และอุณหภูมิ (25°C)

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดพิกัด 250W ทดสอบที่ค่าความเข้มแสง ($1\text{kW}/\text{m}^2$) และอุณหภูมิ (25°C)

พารามิเตอร์	Rating
กำลังไฟฟ้า	250W
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{mp})	29.9V
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{mp})	8.34A
แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V_{OC})	37.1V
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร (I_{SC})	8.92A

3.2 การออกแบบวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

การออกแบบวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์โดยใช้แหล่งพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้กำหนดให้ v_{pv} มีค่าระหว่าง 20V ถึง 35V และแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก v_o มีค่าคงที่ 100V กระแสไฟฟ้าทางด้านออก i_o มีค่า 1A ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ f_s มีค่า 40 kHz การออกแบบการทำงานของวงจรในโหมดกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง มีขั้นตอนในการออกแบบดังนี้

3.2.1 คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ

การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุสำหรับวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์เมื่อกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านออกมีค่าคงที่ 100V โดยใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าดีวีไอเซลล์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ขนาด 250W	ค่าดีวีไอเซลล์ (D)
0	1
5	0.95
10	0.9
15	0.85
20	0.8
25	0.75
30	0.7
35	0.65
37.1	0.63

จากค่าดีวีไอเซลล์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามตารางที่ 3.2 เลือกกำหนดให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงสุดไม่เกิน 35V และต่ำสุดมีค่า 20V ทำให้การคำนวณค่าดีวีไอเซลล์เป็นไปตามสมการที่ (3.1) และ ตามสมการที่ (3.2)

$$D_{\min} = 1 - \frac{v_{pv,\max}}{v_o} = 1 - \frac{35V}{100V} = 0.65 \quad (3.1)$$

$$D_{\max} = 1 - \frac{v_{pv,\min}}{v_o} = 1 - \frac{20V}{100V} = 0.8 \quad (3.2)$$

3.2.2 คำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำ (L)

ในการออกแบบหาค่าตัวเหนี่ยวนำต้องหาค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในวงจร ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์เมื่อปรับค่าดีวีไอเซลล์เป็นไปตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำของวงจร buck converter เมื่อปรับค่า duty cycle

ค่า duty cycle (D)	แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ (I_L)
0.0	100	1
0.1	90	1.11
0.2	80	1.25
0.3	70	1.43
0.4	60	1.67
0.5	50	2
0.6	40	2.5
0.65	35	2.86
0.7	30	3.33
0.8	20	5
0.9	10	10
1.0	Infinity	Infinity

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำเมื่อออกแบบการทำงานที่ค่าของแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำสุดเป็นไปตามสมการดังนี้

$$I_L = \frac{v_{pv,min}}{(1-D_{max})^2 \cdot R} = \frac{20V}{(1-0.8)^2 \cdot 100\Omega} = 5A \quad (3.3)$$

กำหนดให้ค่าระลอกคลื่นของตัวเหนี่ยวนำ (Δi_L) มีค่าเท่ากับ 1A

$$L = \frac{v_{pv,max}}{\Delta i_L} \cdot D_{min} \cdot T_S = \frac{(35V)}{1A} (0.65)(25\mu s) = 568.75\mu H \quad (3.4)$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำต่ำสุดและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำที่มีค่ามากที่สุดคือ

$$i_{L,max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = 5A + 0.5A = 5.5A \quad (3.5)$$

$$i_{L,\min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = 5A - 0.5A = 4.5A \quad (3.6)$$

3.2.3 การเลือกใช้ออสเฟท

วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ในงานวิจัยนี้ทำงานที่ความถี่สวิตช์ $f_s = 40\text{kHz}$ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์เท่ากับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแพคเกจเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ (3.7) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านสวิตช์สมการที่ (3.8)

$$V_{SW(\max)} = V_{OC} = 37.1V \quad (3.7)$$

$$i_{SW(\max)} = i_{L_{\max}} = 5.5A \quad (3.8)$$

ดังนั้นเลือกใช้ออสเฟทเบอร์ IRFZ44N

3.2.4 การเลือกใช้ไดโอด

แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแพคเกจเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ (3.9)

$$V_{RD} = V_{OC} = 37.1V \quad (3.9)$$

ดังนั้นเลือกใช้ไดโอดเบอร์ MUR1605

3.2.5 คำนวณค่าตัวเก็บประจุ (C)

วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์กำหนดให้ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกมีค่าไม่เกิน 1% ดังนั้นการคำนวณค่าตัวเก็บประจุตามสมการที่ (3.10)

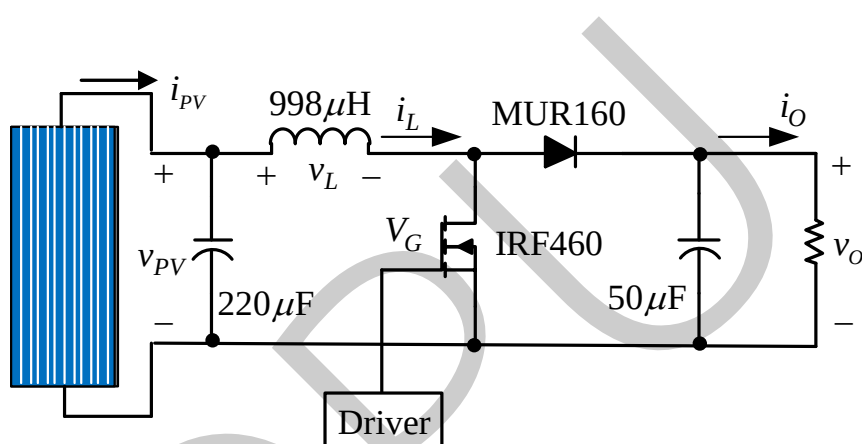
$$C = \frac{D_{\max} \cdot T_s}{R \cdot \Delta v_o / v_o} = \frac{0.8 \cdot (25 \times 10^{-6})}{100\Omega \cdot 0.01} = 20\mu F \quad (3.10)$$

ดังนั้นวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์เลือกใช้ค่าของตัวเก็บประจุ $C = 50\mu F$ และค่าพารามิเตอร์ของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ดังแสดงตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

พารามิเตอร์	พิกัด
แรงดันไฟฟ้าทางด้นเข้า (v_{pv})	20V-35V
แรงดันไฟฟ้าทางด้นออก (v_o)	100V
ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ (f_s)	40 kHz
ตัวเหนี่ยวนำ (L)	$568\mu\text{H}$
ตัวเก็บประจุ (C)	$20\mu\text{F}$

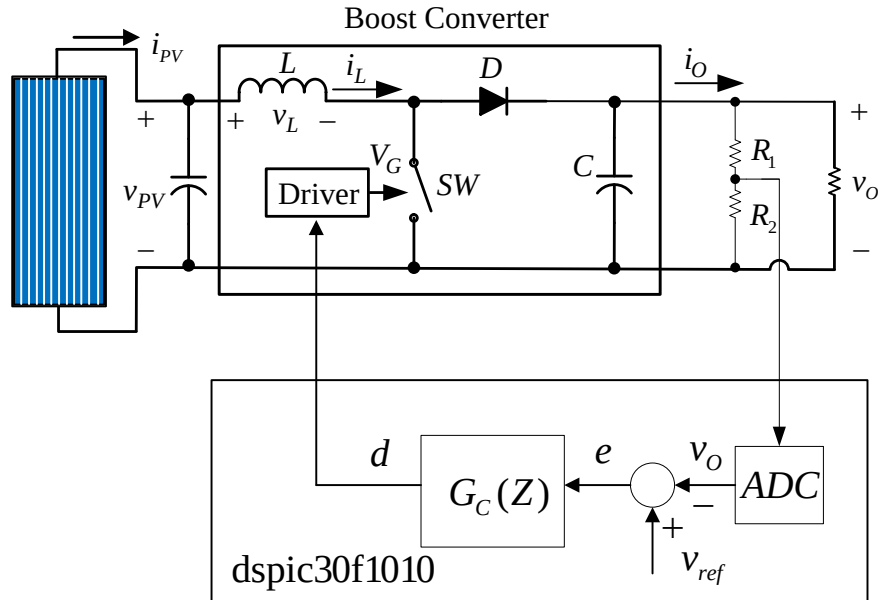
วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

3.3 การควบคุมการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

การควบคุมการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ โดยการออกแบบวงจรควบคุมให้สามารถรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าทางด้นออกให้คงที่ โดยการออกแบบวงจรควบคุมดิจิทัลดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพบล็อกการทำงานของระบบควบคุมแบบดิจิทัล

การออกแบบวงจรควบคุมแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ โดยเริ่มจากการคำนวณหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ ($G_{vd}(s)$) ดังนี้

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_o}{L_e C D_o} \cdot \frac{\left(-\frac{L_e}{R}s + 1\right)}{s^2 + \frac{1}{CR}s + \frac{1}{L_e C}} \quad (3.11)$$

โดยที่ $L_e = L/(1-D)^2$ และ $D_o = 1-D$ สำหรับค่าของพารามิเตอร์ของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเป็นไปตามตารางที่ 3.4 ทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์เป็นไปตามสมการที่ 3.12 ประกอบด้วยโพลสองตำแหน่งและซีโรที่เกิดจากค่าความต้านทานแฝงของตัวเก็บประจุ (ESR) จำนวนหนึ่งตำแหน่ง และนำมาเขียนแผนภาพโบดีได้ดังรูปที่ 3.4

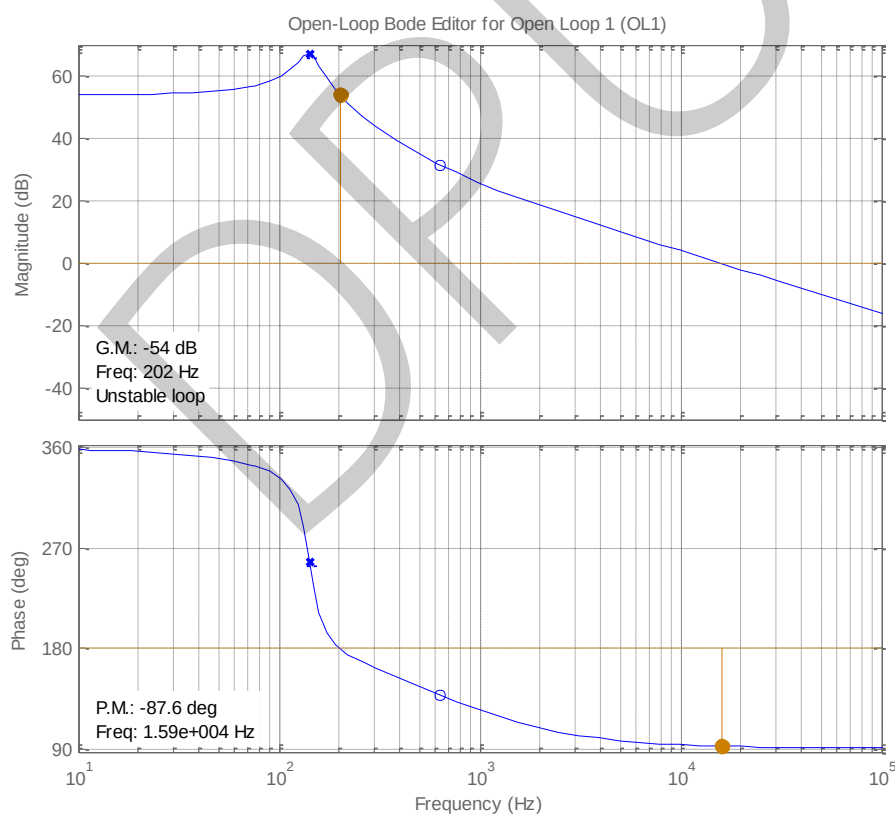
$$G_{vd}(s) = \frac{-1 \times 10^5 s + 4 \times 10^8}{s^2 + 200s + 801600} \quad (3.12)$$

สำหรับการออกแบบวิธีควบคุมการทำงานของวงจรสคอนเวอร์เตอร์ให้สามารถรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกได้ในงานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมชนิดพีไอ (PI Controller) โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 3.13

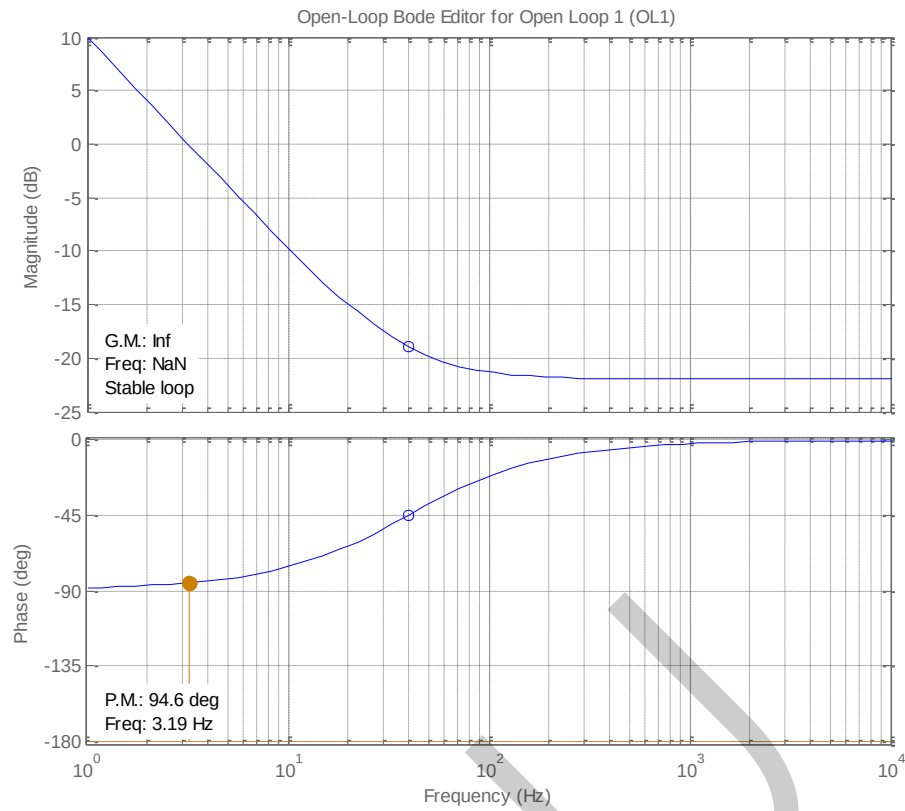
$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.13)$$

การควบคุมชนิดพีไอประกอบด้วยโพลหนึ่งตำแหน่งและซีโรอีกหนึ่งตำแหน่งซึ่งสามารถกำหนดค่าสำหรับการออกแบบค่าของ K_p และ K_i ได้จากการทำงานในฟังก์ชัน sisotool ของโปรแกรม Matlab/Simulink ดังสมการที่ 3.14 และนำมาเขียนแผนภาพโบดีของการควบคุมชนิดพีไอได้ดังรูปที่ 3.5

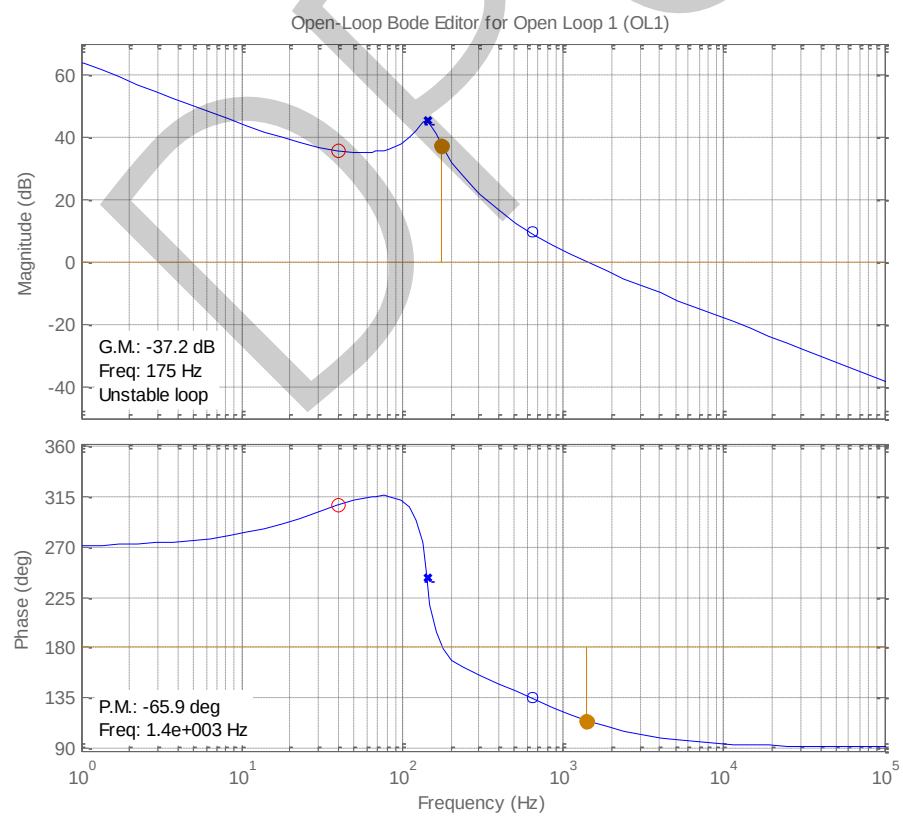
$$G_C(s) = 0.08 + \frac{20}{s} \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.4 แผนภาพ โบดีของวงจรสคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.5 แผนภาพโบดีของการควบคุมชนิดพีไอ



รูปที่ 3.6 แผนภาพโบดีของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์เมื่อใช้การควบคุมชนิดพีไอ

วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์เมื่อใช้การควบคุมชนิดพีไอสามารถนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของการทำงานได้จากแผนภาพโบลด์ดังรูปที่ 3.6

สำหรับการควบคุมการทำงานแบบดิจิตอลนั้นต้องมีการออกแบบโดยการเปลี่ยนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบแอนะล็อกในสมการที่ (3.11) ให้เป็นแบบดิจิตอล ($G_{vd}(z)$) ตามสมการที่ (3.15) ดังนี้

$$G_{vd}(z) = \frac{0.1874z + 0.1768}{z^2 - 1.715z + 0.8406} \quad (3.15)$$

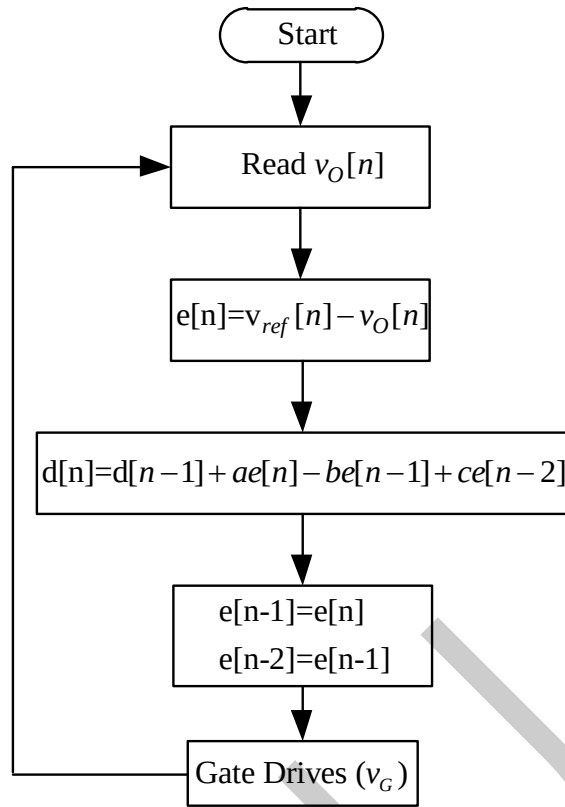
จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ในสมการที่ (3.15) ทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมได้ดังนี้

$$G_C(z) = \frac{u}{e} = \frac{1.299 - 1.689z^{-1} + 0.5348z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (3.16)$$

สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมตามสมการที่ (3.16) นำมาเขียนโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดังนี้

$$d(n) = U(n) = U(n-1) + aE(n) - bE(n-1) + cE(n-2) \quad (3.17)$$

เมื่อ a มีค่า 1.299, b มีค่า 1.689 และ c มีค่า 0.5348 โปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ดังสมการที่ (3.16) สามารถอธิบายการทำงานในรูปแบบของแผนผังการทำงานของวงจรควบคุมแบบดิจิตอลดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนผังการทำงานของการควบคุมแบบดิจิทัล

3.4 การออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟส โดยใช้หลักการสวิตช์แบบพีคเบิกลยูเอ็มนชนิดการสวิตช์ซึ่งแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ ให้สามารถใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ชนิดหนึ่งเฟสพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 1HP (ประมาณ 746W) โดยมีวิธีการออกแบบเริ่มจากการหาค่าของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกที่ความถี่มูลฐาน ($V_{O,1}$) ดังนี้

$$V_{O,1} = m_a \cdot V_{dc} = \frac{(0.8) \cdot 400V}{\sqrt{2}} = 226V_{rms} \quad (3.18)$$

อัตราส่วนการมอดูเลตความถี่ m_f มีค่าตามสมการที่ (3.19) ทำให้ได้ค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจรอินเวอร์เตอร์ตามลำดับของฮาร์โมนิกคำนวณได้ตารางที่ 3.5

$$m_f = \frac{f_{sw}}{f_1} = \frac{1kHz}{50} = 20 \quad (3.19)$$

จากสมการที่ (3.19) ฮาร์โมนิกกลุ่มแรกเกิดที่ลำดับ $2m_f = 40$ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกเกิดขึ้นตามลำดับของฮาร์โมนิกที่ $2m_f \pm 1 = V_{O,39}, V_{O,41}$, $2m_f \pm 3 = V_{O,37}, V_{O,43}$, และ $2m_f \pm 5 = V_{O,35}, V_{O,45}$ สามารถคำนวณตามตารางที่ 3.5 และค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ความถี่มูลฐานมีค่าเท่ากับ

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + ((2\pi 50)L)^2} = 45.45\Omega \quad (3.20)$$

แรงดันไฟฟ้าทางด้านออกที่ความถี่มูลฐานตามสมการที่ (3.18) ทำให้ได้กระแสไฟฟ้าที่ทางด้านออกคือ

$$I_1 = \frac{V_{O,1}}{Z_1} = \frac{226V}{45.45\Omega} = 4.98A \quad (3.21)$$

ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ไหลผ่านโหลดทั้งหมดตามลำดับของฮาร์โมนิกตั้งแต่แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานและแรงดันไฟฟ้าของฮาร์โมนิกที่เกิดกลุ่มแรกสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{O,rms} &= \sqrt{(226.27)^2 + (3.68)^2 + (39.32)^2 + (88.81)^2 + (88.81)^2 + (39.32)^2 + (3.68)^2} \\ &= 264.75V \end{aligned} \quad (3.22)$$

ตารางการคำนวณแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าในแต่ละลำดับฮาร์โมนิกพิจารณาได้ตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การคำนวณแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าในแต่ละลำดับฮาร์โมนิก

ลำดับฮาร์โมนิก	ความถี่ Hz	แรงดันไฟฟ้า ด้านนอก	กระแสไฟฟ้า ด้านนอก	กำลังไฟฟ้า ด้านนอก
1	50	226.27	4.98	743.63
35	1750	3.68	0.00	0.00
37	1850	39.32	0.03	0.00
39	1950	88.81	0.07	0.00
41	2050	88.81	0.06	0.00
43	2150	39.32	0.03	0.00
45	2250	3.68	0.00	0.00
กำลังไฟฟ้ารวมทั้งหมด				743.63

3.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้ทำการออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับโหลดอินดักชันมอเตอร์พิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 1HP ที่ใช้วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบมาเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และทดสอบการทำงานของระบบทั้งหมดในบทต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดสอบการทำงาน

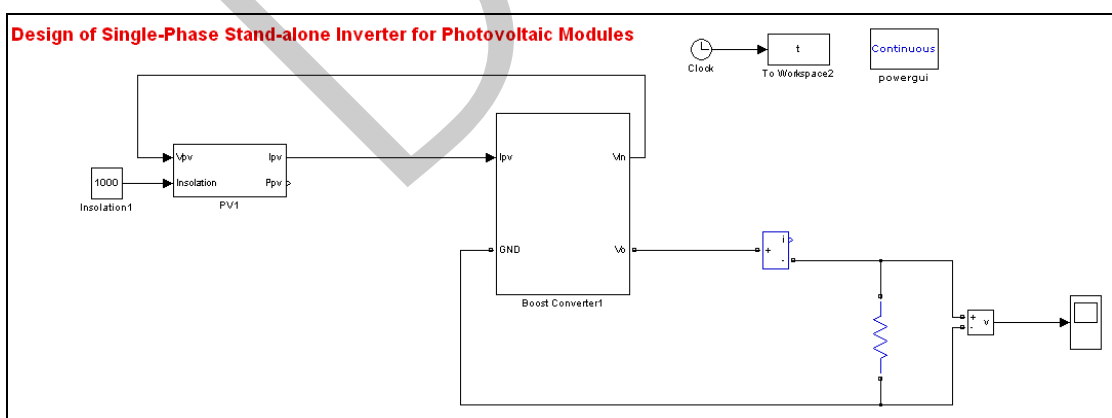
บทนี้นำเสนอผลการทดสอบการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ การเชื่อมต่อวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรมเพื่อเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับโหลดอินดักชันมอเตอร์ฟีดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 1 HP โดยการทดสอบการทำงานแบ่งออกเป็นการทดสอบโดยจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และผลการทดสอบจากวงจรต้นแบบดังนี้

4.1 ผลการจำลองการทำงาน

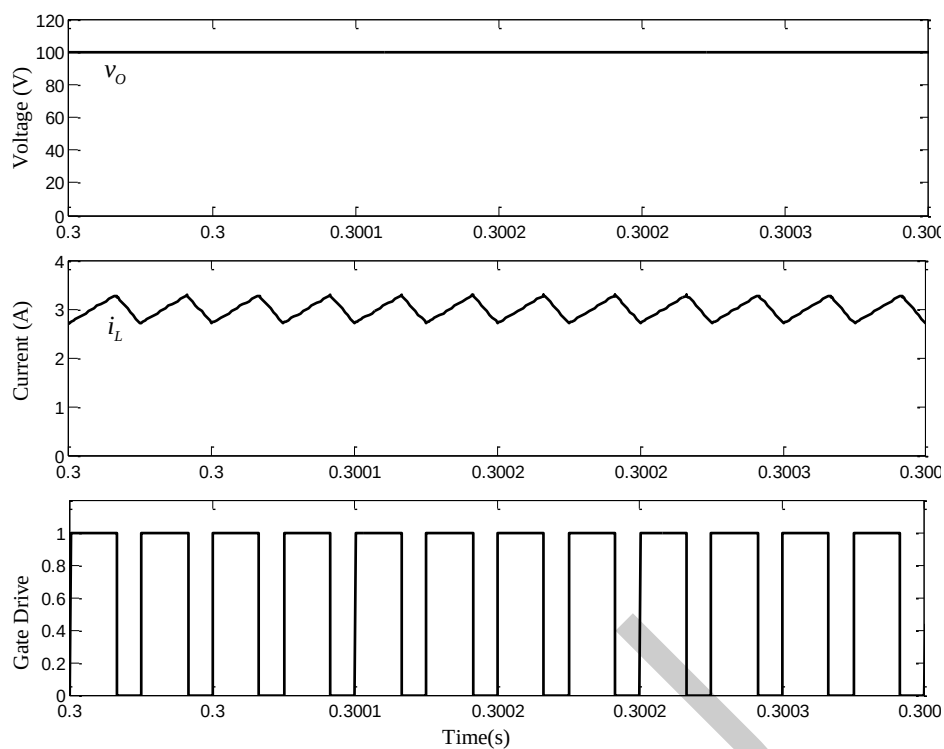
การจำลองการทำงานของวงจรแบ่งออกเป็นการจำลองการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ฟีด 250 W โดยการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ทางด้านออกให้มีขนาดคงที่ 100 V โดยแบ่งการทดลองออกเป็นดังนี้

4.1.1 ผลการจำลองการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์

การจำลองการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink โดยการควบคุมการทำงานแบบดิจิทัลเป็นไปดังรูป 4.1 เมื่อกำหนดให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ฟีด 250 W มีความเข้มแสงคงที่ที่ $1,000 \text{ W/m}^2$ ได้ผลการทำงานของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ และสัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟตเป็นไปตามรูปที่ 4.2

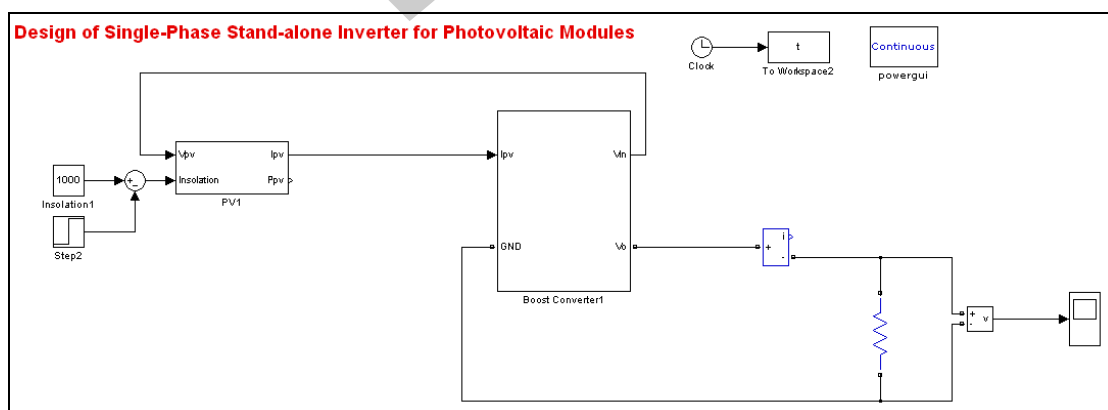


รูปที่ 4.1 การจำลองการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

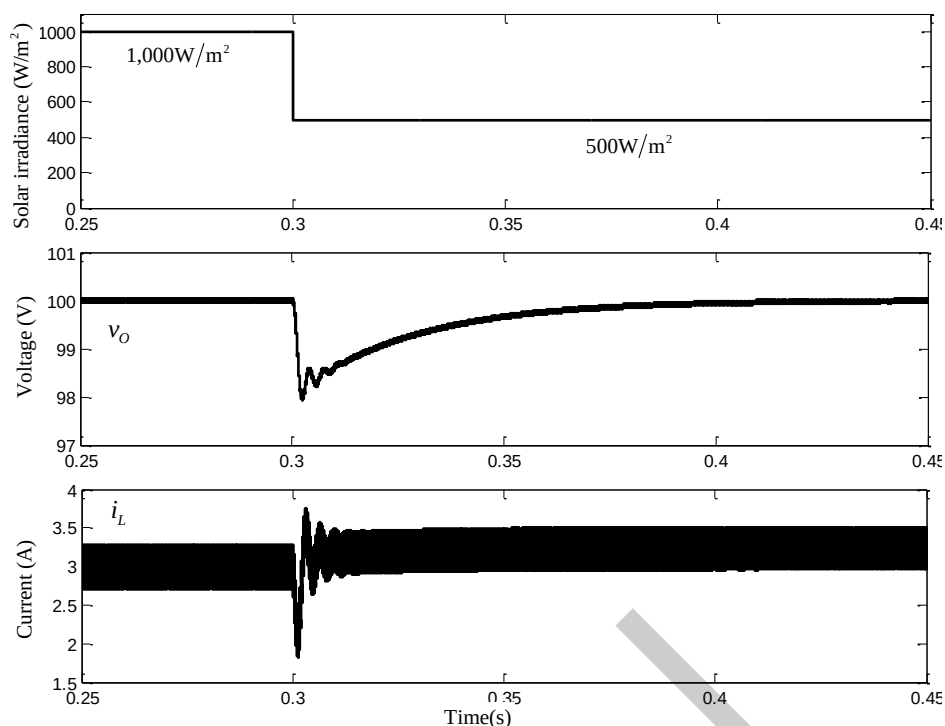


รูปที่ 4.2 ผลการจำลองการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ (บน) แรงดันไฟฟ้า v_o , (กลาง) กระแสไฟฟ้า i_L , (ล่าง) สัญญาณขับเคลื่อนของมอสเฟต v_g เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คงที่

เมื่อกำหนดให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 250 W มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงจาก $1,000 \text{ W/m}^2$ เป็น 500 W/m^2 ดังรูปที่ 4.3 เมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าลดลงประมาณ 2 V และวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบสามารถรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกให้กลับสู่สภาวะคงที่ได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 การจำลองการทำงานของวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง

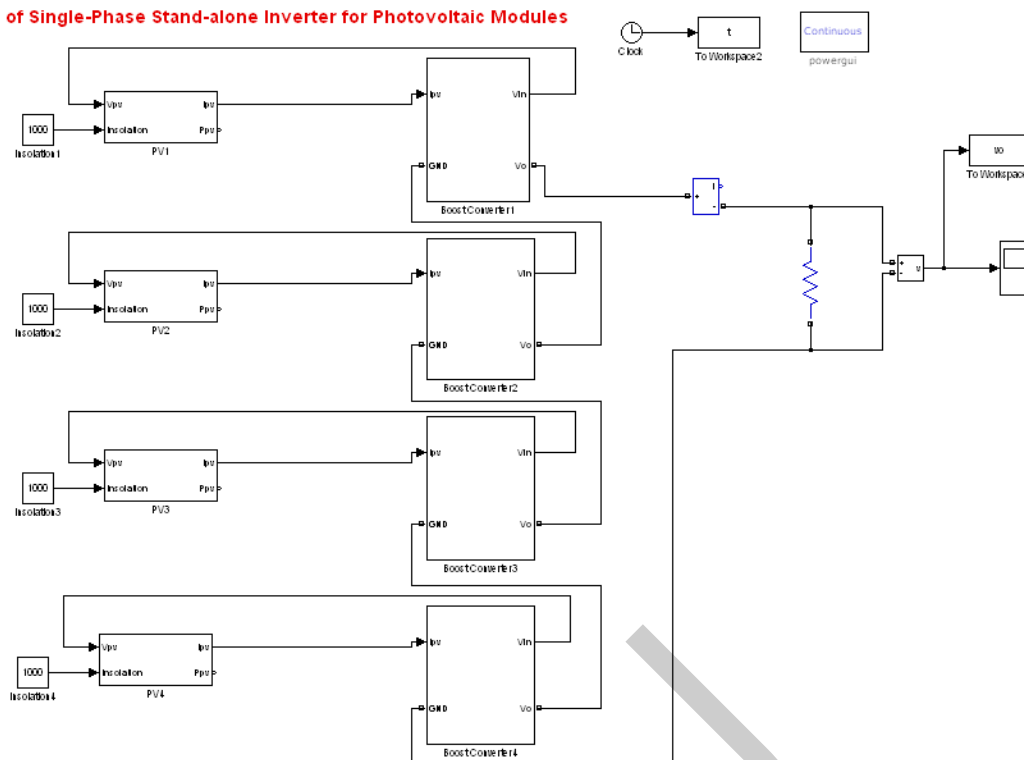


รูปที่ 4.4 ผลการจำลองการทำงานของวงจร buck คอนเวอร์เตอร์ (บน) ความเข้มแสง, (กลาง) แรงดันไฟฟ้า v_o , (ล่าง) กระแสไฟฟ้า i_L เมื่อความเข้มแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง

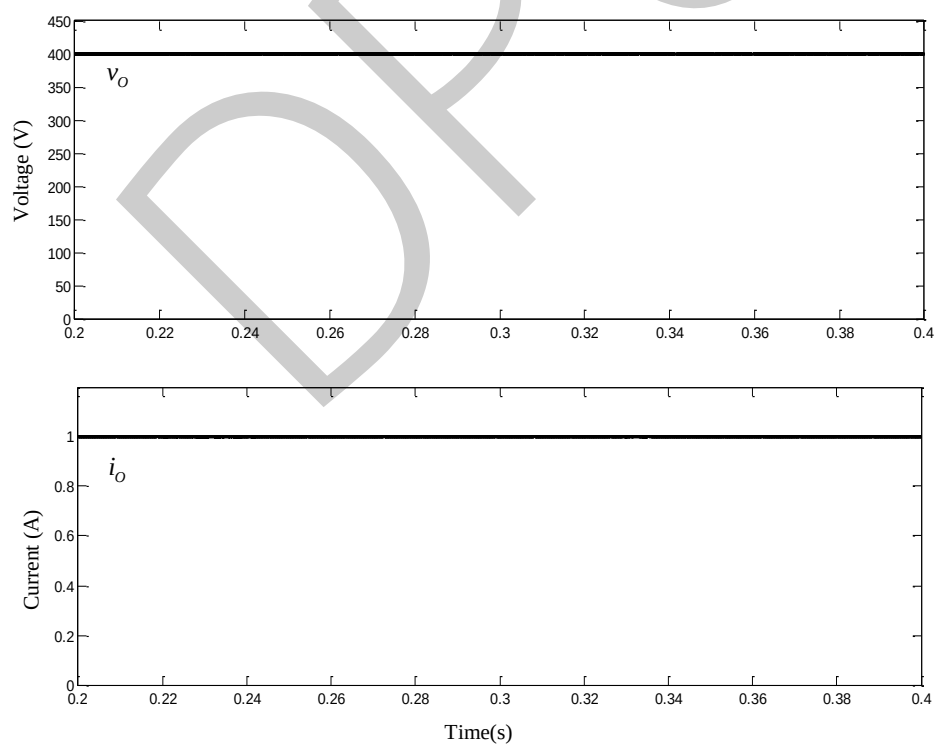
4.1.2 ผลการจำลองการเชื่อมต่อวงจร buck คอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม

วงจร buck คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 250 W จำนวนหนึ่งแผง ต่อหนึ่งวงจร สำหรับวงจรที่นำเสนอสามารถเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าเป็น 100 V ดังนั้นถ้าต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงขึ้นต้องทำการเชื่อมต่อวงจร buck คอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม จำนวนสี่วงจรดังรูปที่ 4.5 ทำให้ได้ระดับของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 400 V และกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรมีค่าเท่ากันเสมอตามรูปที่ 4.6

Design of Single-Phase Stand-alone Inverter for Photovoltaic Modules



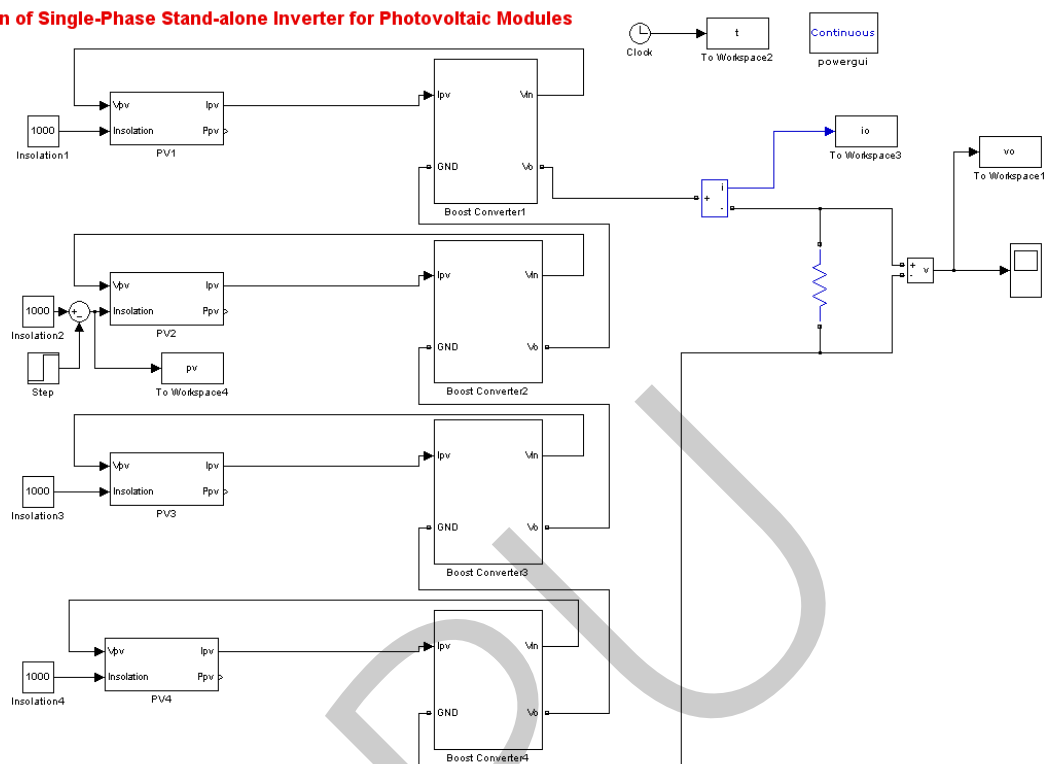
รูปที่ 4.5 การจำลองการเชื่อมต่อวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม



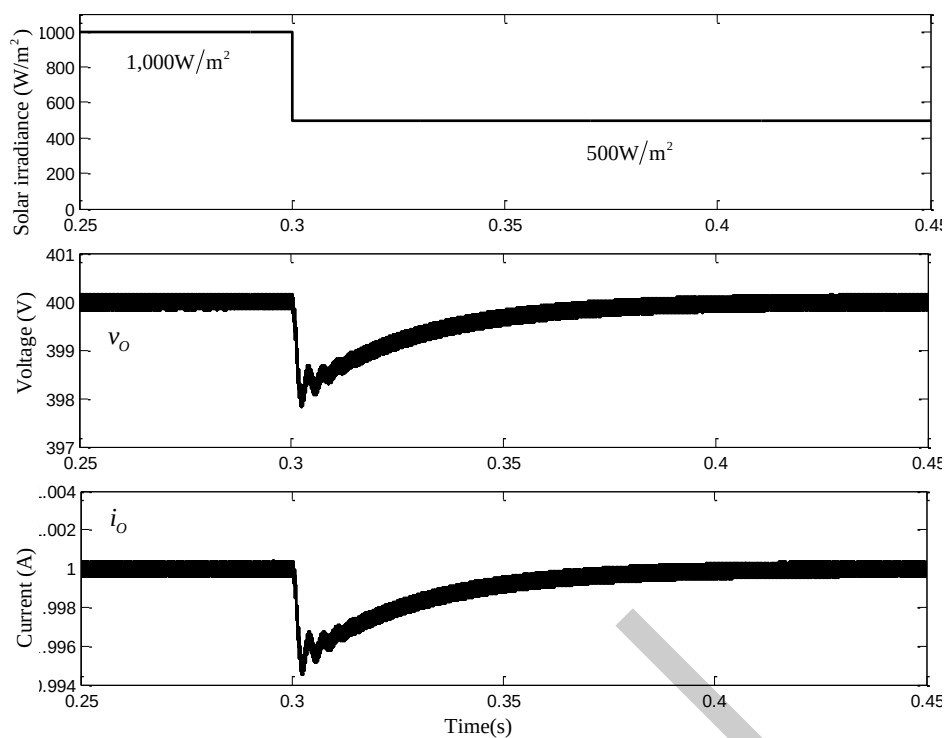
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองการเชื่อมต่อวงจรบูสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม (บน) แรงดันไฟฟ้า v_o และ (ล่าง) กระแสไฟฟ้า i_o เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คงที่

เมื่อจำลองการเชื่อมต่อวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรมจำนวนสี่วงจรดังรูปที่ 4.7 และเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงใดแผงหนึ่งเกิดสถานะเงาบังทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดน้อยลง วงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ทำการปรับเพื่อให้ได้ระดับของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกให้คงที่ดังรูป 4.8

Design of Single-Phase Stand-alone Inverter for Photovoltaic Modules



รูปที่ 4.7 การจำลองการเชื่อมต่อวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง

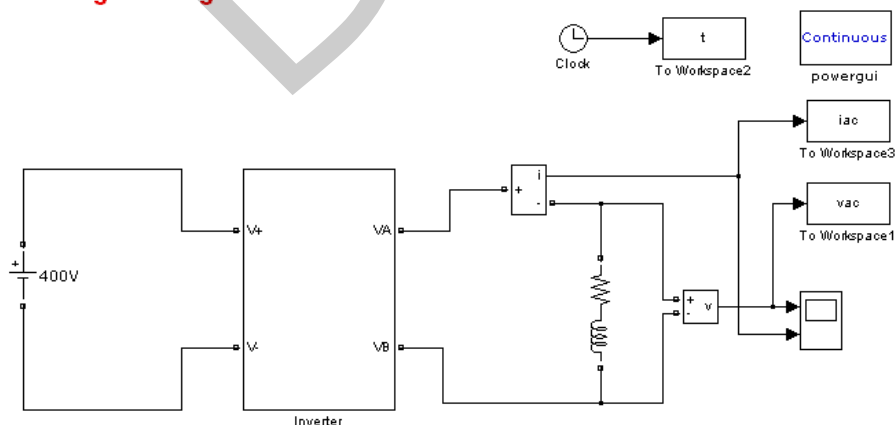


รูปที่ 4.8 ผลการจำลองการเชื่อมต่อวงจรชุดคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม (บน) แรงดันไฟฟ้า v_{PV} , (กลาง) แรงดันไฟฟ้า v_o , (ล่าง) กระแสไฟฟ้า i_o เมื่อแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง

4.1.3 ผลการจำลองทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

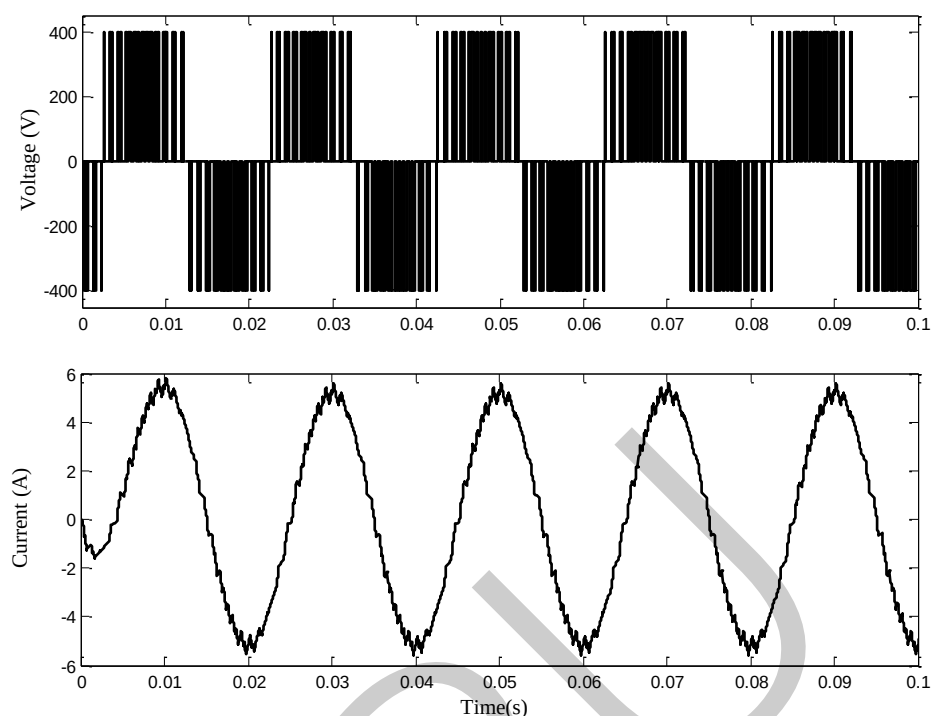
วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการออกแบบในงานวิจัยนี้สำหรับโหลดอินดักชันมอเตอร์พิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 1 HP ดังรูปที่ 4.9

Design of Single-Phase Stand-alone Inverter for Photovoltaic Modules



รูปที่ 4.9 การจำลองการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

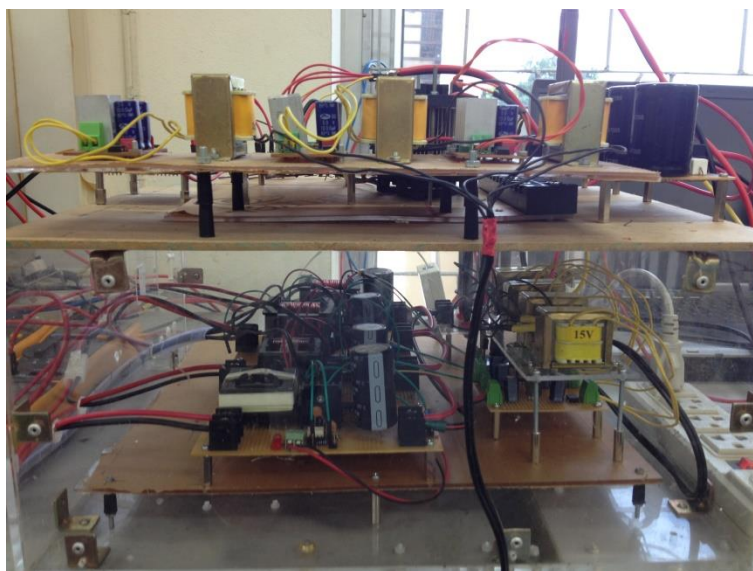
รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าชนิดการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์เป็นไป
ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าชนิดการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

4.2 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรต้นแบบ

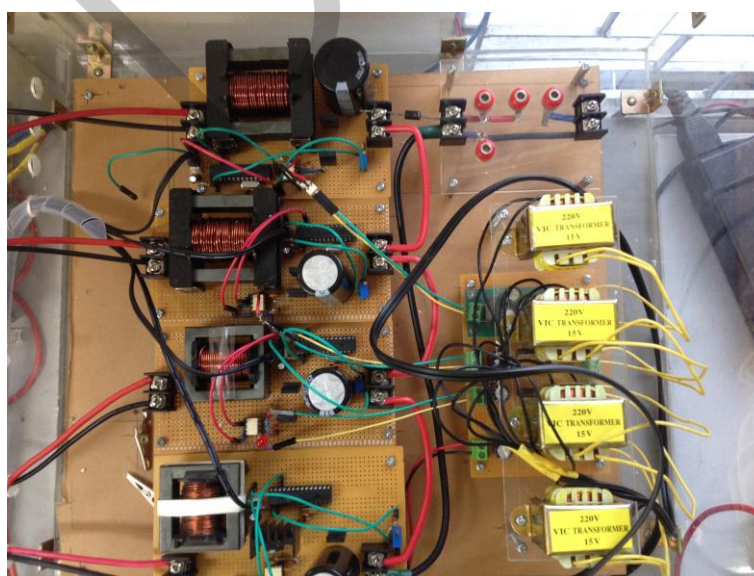
การทดสอบการทำงานของบูสคอนเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การทดสอบแบ่งออกเป็น การทดสอบการทำงานของบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 100 V ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F1010 และนำมาเชื่อมต่อแบบอนุกรมจำนวนสี่วงจรถวายเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 400 V เพื่อนำไปทดสอบกับอินเวอร์เตอร์ที่มีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก 220 V ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F1010 และใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์



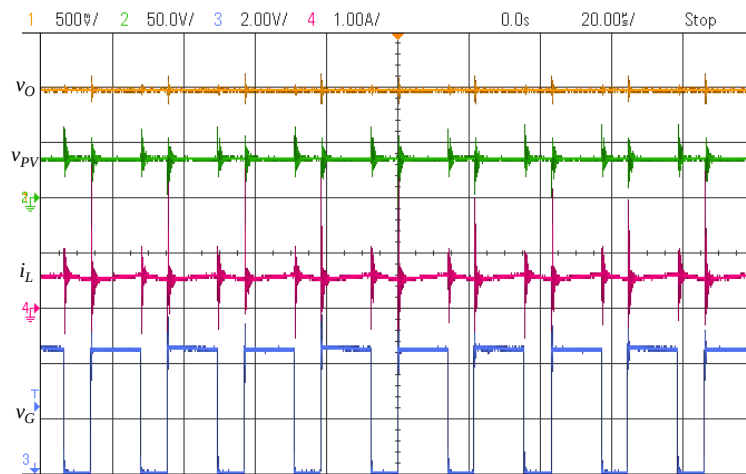
รูปที่ 4.11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.2.1 การเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอนุกรมเมื่อใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

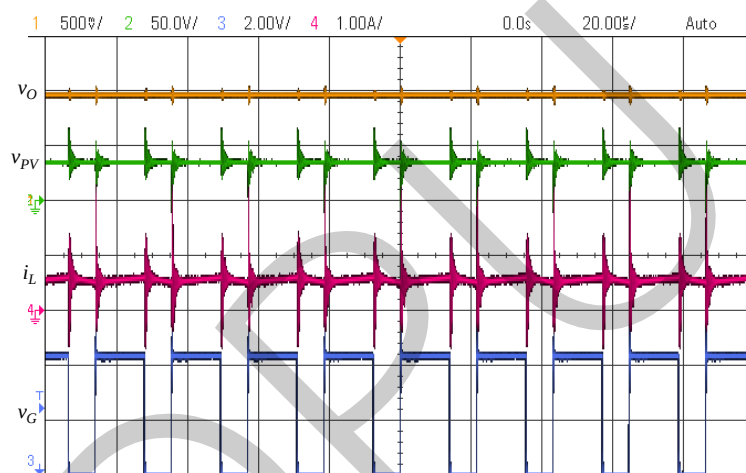
การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เมื่อใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจำนวนหนึ่งแผงต่อวงจรที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F1010 ทั้งสี่วงจรตามรูปที่ 4.12 ได้ผลการทำงานของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกคงที่ 100 V ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 20 V ถึง 40 V ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสง รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและสัญญาณขับสวิตช์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งสี่วงจรดังรูปที่ 4.13



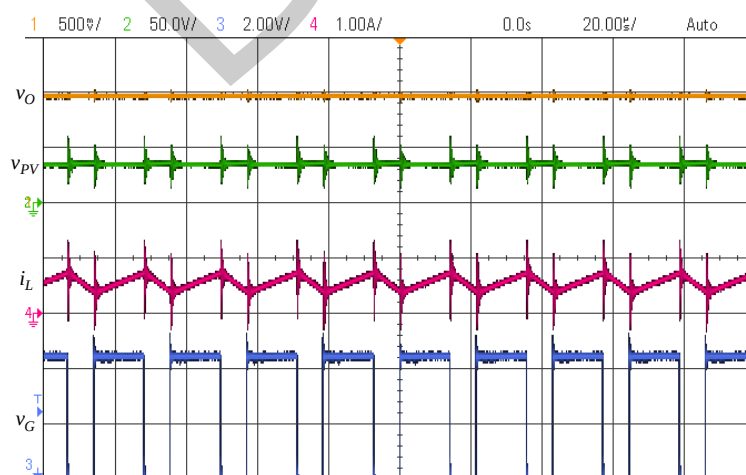
รูปที่ 4.12 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการทดสอบ



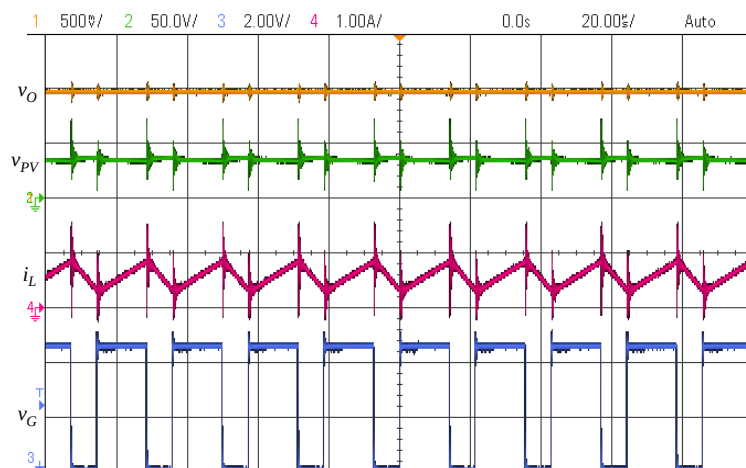
ก) บุกอนเวอร์เตอร์ 1 (PV1)



ข) บุกอนเวอร์เตอร์ 2 (PV2)



ค) บุกอนเวอร์เตอร์ 3 (PV3)



ง) บุกคอนเวอร์เตอร์ 4 (PV4)

รูปที่ 4.13 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) และ แกนของเวลา (20us/Div)

เมื่อพิจารณาการทำงานของบุกคอนเวอร์เตอร์แต่ละวงจรเมื่อวัดค่าของแรงดันไฟฟ้าและ กระแสไฟฟ้าที่ทางด้านเข้าและทางด้านออกของได้ผลตามตารางที่ 4.1 โดยมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ย ทั้งสี่วงจร 94.27 เปอร์เซ็นต์

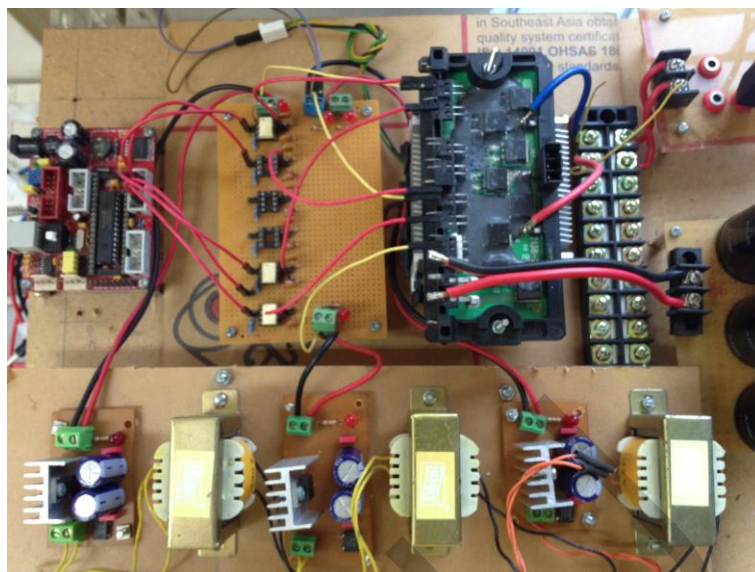
ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพการทำงานของบุกคอนเวอร์เตอร์

วงจร	แผงเซลล์แสงอาทิตย์			ด้านออก			η
	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

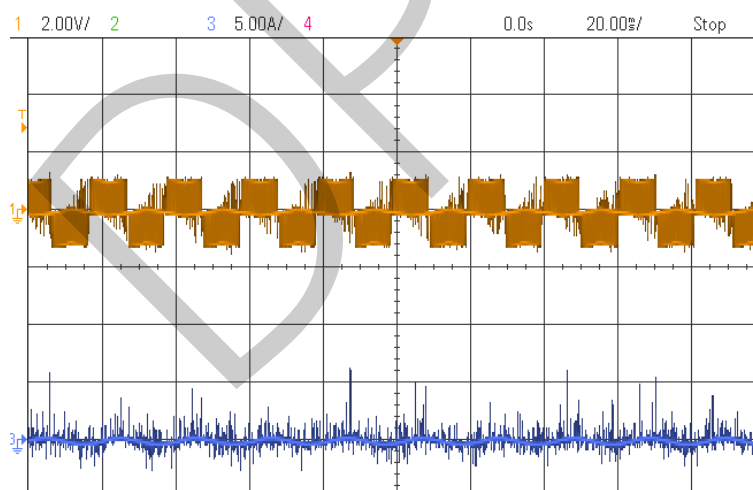
4.2.2 ผลการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

ในส่วนการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F1010 ในการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ (SW1-SW4) ดังรูปที่ 4.14 โดยอินเวอร์เตอร์ใช้ ไอจีบีทีเพาเวอร์โมดูล (IGBT 15J331 power module) พิกัด 15 A 600 V ได้ผลการทำงานของ

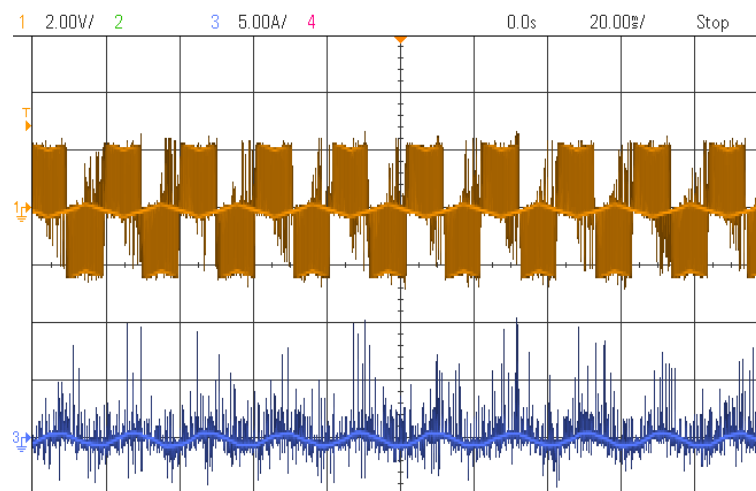
สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ทางด้านออกและกระแสไฟฟ้าที่ทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์
เมื่อมีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ 100 V, 200 V, 300
V และ 400 V ดังรูปที่ 4.15



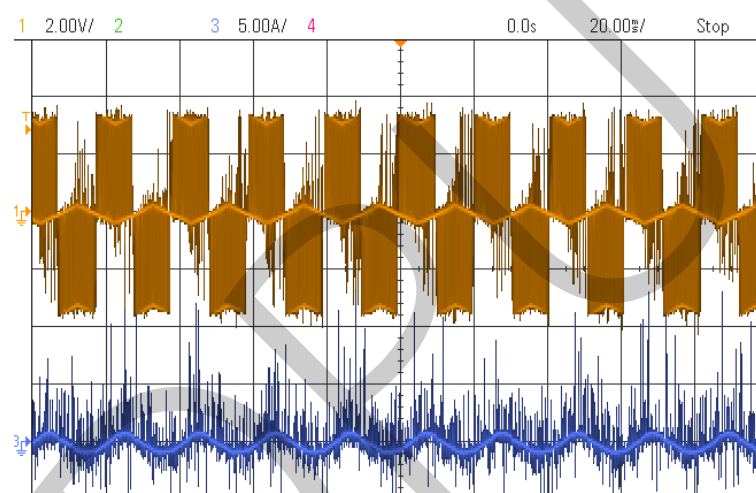
รูปที่ 4.14 วงจรอินเวอร์เตอร์



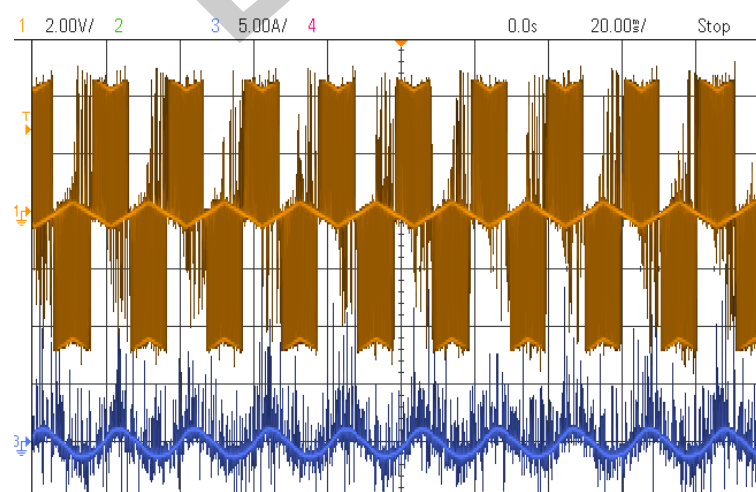
ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ 100 V



ข) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของบวมอเตอร์ที่ 200 V



ค) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของบวมอเตอร์ที่ 300 V



ง) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ 400 V

รูปที่ 4.15 ผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์ (CH1) แรงดันไฟฟ้า $v_{o,ac}$ (200 V/div), (CH2) กระแสไฟฟ้า $i_{o,ac}$ (5 A/div) และแกนของเวลา (20ms/Div)

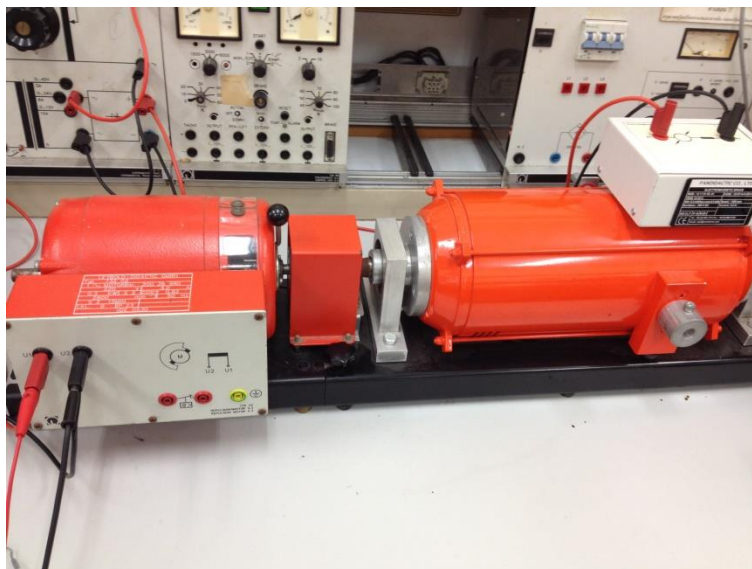
4.2.3 ผลการทำงานของระบบเมื่อใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์

เมื่อนำบูสคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อแบบอนุกรมสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ โดยการทดสอบการทำงานเมื่อทำการเชื่อมต่อบูสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรมทั้งสี่วงจรและทำการจ่ายพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ละวงจร โดยเริ่มจากหนึ่งวงจรได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 100 V และกระแสไฟฟ้า 0.04 A สองวงจรได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 200 V และกระแสไฟฟ้า 0.08 A สามวงจรได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 300 V และกระแสไฟฟ้า 0.13 A และสี่วงจรได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 400 V และกระแสไฟฟ้า 0.17 A ตามตารางที่ 4.2

เมื่อพิจารณาการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ดังรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อจ่ายพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับบูสคอนเวอร์เตอร์จำนวนหนึ่งวงจรมีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก 55 V และกระแสไฟฟ้า 0.2 A ทำให้มอเตอร์ยังไม่เริ่มหมุน และเมื่อจ่ายพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับบูสคอนเวอร์เตอร์จำนวนสองวงจรทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 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 4.3

ตารางที่ 4.2 การทำงานของการเชื่อมต่อบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จำนวนชุด	แผงเซลล์แสงอาทิตย์												ทางด้านออก		
	PV 1			PV 2			PV 3			PV 4					
	แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า
	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(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



รูปที่ 4.16 โหลดอินดักชันมอเตอร์

ตารางที่ 4.3 การทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ร่วมกับโหลดอินดักชันมอเตอร์

จำนวน ชุด	Input DC		Output AC		ความเร็ว รอบ (rpm)
	แรงดัน ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (A)	แรงดัน ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (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

4.3 บทสรุป

ผลการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งแผง ต่อวงจรเชื่อมต่อแบบอนุกรมมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ย 94.27 เปอร์เซ็นต์ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 400 V สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟส ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก 223 V ใช้ร่วมกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 1 HP และข้อดีคือแต่ละชุด วงจรการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์มีการควบคุมที่อิสระต่อกันทำให้เมื่อวงจรหรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชุดใดชุดหนึ่งเกิดความเสียหายหรือเกิดสภาวะเงาบังทำให้ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ วงจรที่เหลืออยู่ยังทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และรูปแบบของวงจรที่นำเสนอทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดหรือพิกัดเดียวกันต่อแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแส

ตรงที่สูงขึ้นสำหรับอินเวอร์เตอร์ และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับพลังงานทดแทนอื่นเช่น พลังงานลม หรือแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงอื่นๆได้ หรือใช้ร่วมกับพลังงานจากแบตเตอรี่เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพื่อรักษาเสถียรภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งแผงต่อวงจรเชื่อมต่อแบบอนุกรมมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ย 94.27 เปอร์เซ็นต์ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 400 V สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟส ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก 223 V ใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ขนาดพิกัดไม่เกิน 1 kW และข้อดีคือแต่ละชุดวงจรการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์มีการควบคุมที่อิสระต่อกันทำให้เมื่อวงจรหรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชุดใดชุดหนึ่งเกิดความเสียหายหรือเกิดสถานะเงาบังทำให้ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ วงจรที่เหลืออยู่ยังทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และรูปแบบของวงจรที่นำเสนอทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดหรือพิกัดเดียวกันต่อแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงขึ้นสำหรับอินเวอร์เตอร์ และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับพลังงานทดแทนอื่นเช่น พลังงานลม หรือแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงอื่นๆ ได้ หรือใช้ร่วมกับพลังงานจากแบตเตอรี่เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพื่อรักษาเสถียรภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งแผงต่อวงจรเชื่อมต่อแบบอนุกรม มีข้อที่ต้องพัฒนาต่อคือควรนำมาใช้กับการควบคุมแบบวิธีการควบคุมด้วยกำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power point tracking :MPPT) สำหรับควบคุมการทำงานในแต่ละวงจรของบัสคอนเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดและนำมาใช้งานร่วมกับวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทาง (Bidirectional Converter) เพื่อรักษาเสถียรภาพการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

บรรณานุกรม

- นภคณ ขวนไชยะกุล, และสุรัชชัย ไชยทัศนีย์. (2555). แบบจำลองระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดและการเปรียบเทียบกับการวัดจริง. ใน *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35* (น. 207-210). นครนายก: มหาวิทยาลัยกรุงเทพ.
- ปกครองวงศ์คุณ, และพิสิษฐ์ ลีวชนกุล. (2555). การสร้างแบบจำลองอะเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะงานคั้งโดยใช้ Embedded MATLAB Function. ใน *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35* (น. 425-428). นครนายก: มหาวิทยาลัยกรุงเทพ.
- มนทล นาวงษ์. (2558). การออกแบบวงจรตีชีทู้ชีค่อนเวอร์เตอร์เพื่อการประจุแบตเตอรี่โดยใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (รายงานผลการวิจัย). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.
- ไพศักดิ์ พูลผกา, และสมภพ ผลไม้. (2556). เทคนิคการมอดูเลตเชิงความกว้างพัลส์เพื่อควบคุมแรงดันโหมคร่วมของ PV อินเวอร์เตอร์ ชนิดเชื่อมต่อบบบไฟฟ้าแบบไร้หม้อแปลง. ใน *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 36* (น. 407-410). กาญจนบุรี: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Cupertino, A.F., de Resende, J.T., Pereira, H.A., & Seleme Junior, S.I. (2012). A Grid-Connected Photovoltaic System with a Maximum Power Point Tracker using Passivity-based Control Applied in a Boost Converter. In *10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications* (pp. 1-8), Brazil: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Geoffrey R.W. (2004). Cascaded DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(4), 1130-1139.
- Tanouti, J., Setti, M., Aziz, A., & Mamoun A.EI. (2012). Design and Implementation of a Digitally Controlled Photovoltaic System Using Series Connected Buck Converters. *Journal of Environmental Science and Engineering*, B(1), pp. 456-464.
- Aibadia, M.H., Abria, R.S. AI., Masouda, M.I., Saidib, K.H.AI., Busaidic, A.S.AI., Lawatid, A.AI., ... Farsie, I.AI. (2014). Design of a 50 kW Solar PV Rooftop System. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 3(4), 401-409.
- Kjaer, S.B., Pedersen, J.K., & Blaabjerg, F. (2005). A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(5), 1292-1306.

Erickson, R.W., & Maksimovic, D. (2005). *Fundamentals of Power Electronics*. University of Colorado, USA: Kluwer Academic Publishers.

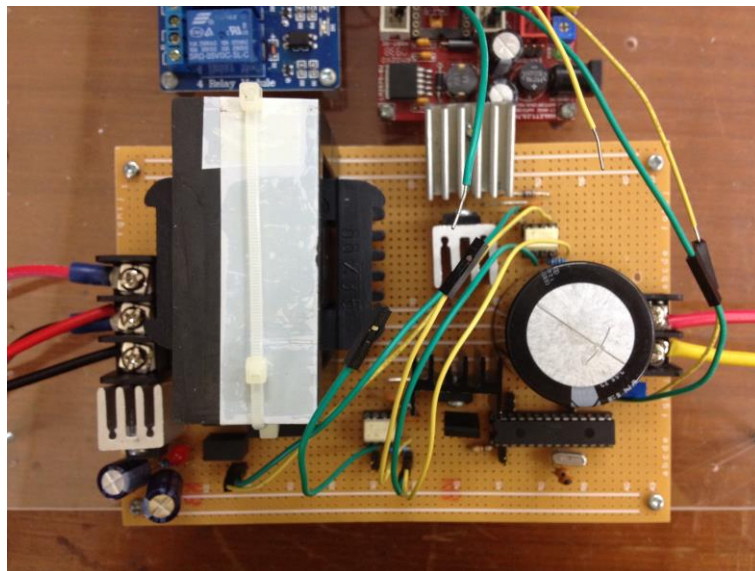
Sulaiman, D.R., Ameen, H.F., & Said, I.K. (2010). Design of High Efficiency DC-DC Converter for Photovoltaic Solar Home Applications. *Journal of Energy & Power Engineering*, 4(11), 43-51.

DRU

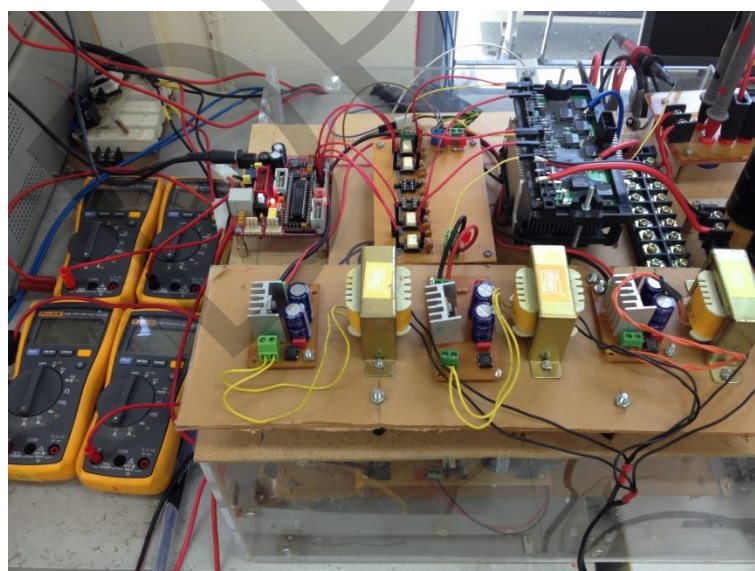
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

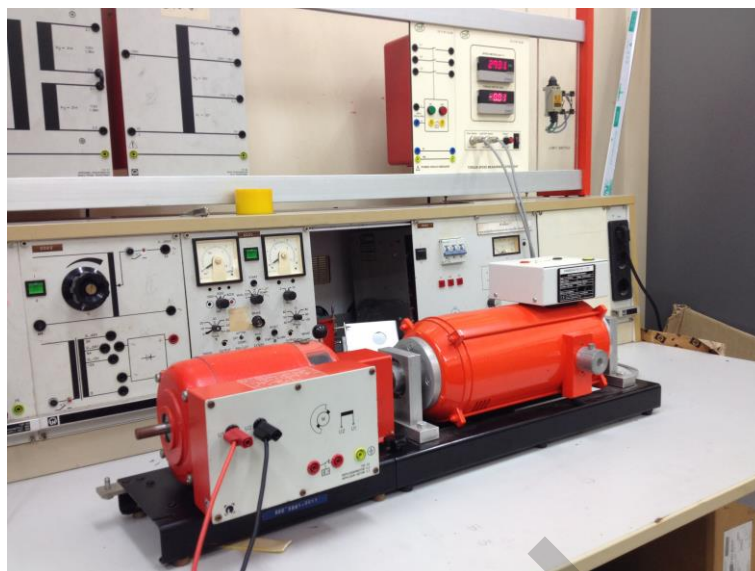
วงจรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก.1 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบ



รูปที่ ก.2 วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบ



รูปที่ ก.3 โหลดอินดักชันมอเตอร์ที่นำมาทดสอบการทำงาน

ภาคผนวก ข.

เอกสารกำกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

STP6-XXX/60 Series

STP6-260W, STP6-255W, STP6-250W,
STP6-245W, STP6-240W

Strengths

-  Tolerance
0~+5
-  High transmission, low Iron
Tempered Glass
-  Plug&Play
Connectors
-  Bypass Diodes
Protection
-  Salt Mist And Ammonia Resistance Test

Warranty

-  Manufacturing
12 Years
-  Power Production
90%:12years 80%:25years

Insurance

 Insured
By CHUBB

Certificates



Tested according to: IEC / EN 61215: 2005;
IEC 61730-1: 2004 / EN 61730-1: 2007;
IEC 61730-2: 2004 / EN 61730-2: 2007;
Registered No.: 44 780 13 406749 - 209

Three-Busbar Cell

Polycrystalline
photovoltaic
Module



www.schutten-solar.com
ADD(Quanjiao Factory): Weisan Road, Quanjiao Economy and Development
Area Chuzhou, Anhui, China
ADD(Thailand Factory): 333 Moo 3 Lardtakhian, Kabinburi, Prachinburi,
Thailand 25110



STP6-XXX/60 Series

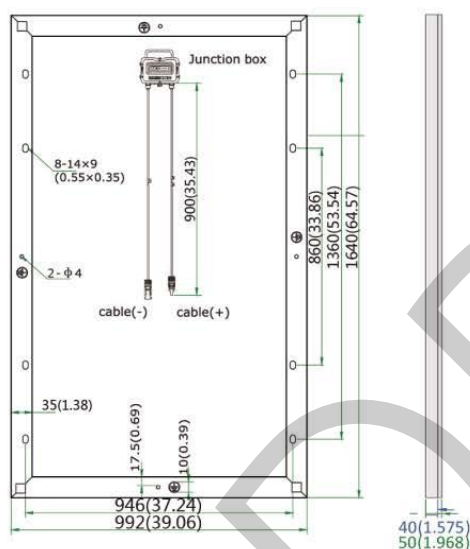
STP6-260W, STP6-255W, STP6-250W, STP6-245W, STP6-240W

Schutten^{solar}
blue sky . green life

Electrical Characteristics

Module Type	Unit	STP6-260/60	STP6-255/60	STP6-250/60	STP6-245/60	STP6-240/60
Rated Power at STC (P _{mp})	W	260	255	250	245	240
Power Tolerance	W	(0, +5)	(0, +5)	(0, +5)	(0, +5)	(0, +5)
Power Maximum at STC	W	265	260	255	250	245
Cell Efficiency (η _c)	%	18.3-18.6	18.0-18.3	17.7-18.0	17.3-17.6	17.0-17.3
Minimum Module Efficiency (η _m)	%	16.5-16.9	16.1-16.4	15.4-15.7	15.0-15.4	14.7-15.0
Open Circuit Voltage (V _{oc})	V	37.3	37.2	37.1	37.0	36.9
Short Circuit Current (I _{sc})	A	9.30	9.11	8.92	8.78	8.65
Maximum Power Voltage (V _{mp})	V	30.1	30.0	29.9	29.9	29.8
Maximum Power Current (I _{mp})	A	8.58	8.46	8.35	8.21	8.05
Maximum System Voltage	V	1000 (TUV), 600 (UL)				
Maximum Series Fuse Rating	A	15				

STC: Irradiance 1000W/m², module temperature 25°C, AM=1.5;



- All Dimensions in mm (inch)
- The above drawing is a graphical representation of the product. For engineering quality drawings please contact **SCHUTTEN**

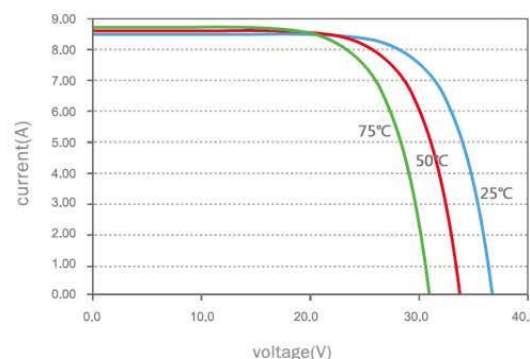
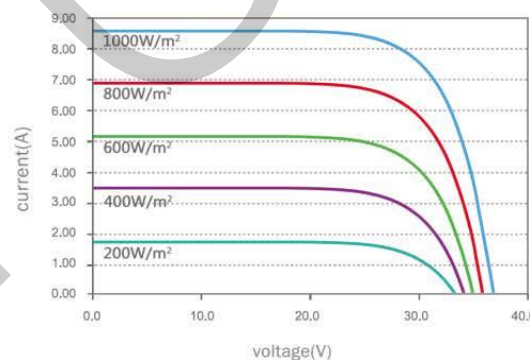
Temperature Characteristics

P _{max} Temperature Coefficient	%/°C	-0.47
V _{oc} Temperature Coefficient	%/°C	-0.32
I _{sc} Temperature Coefficient	%/°C	+0.04
Operating Temperature	°C	-40 ~ +85
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	°C	45±2

Mechanical Specifications

External Dimensions	1640 × 992 × 35 mm
Weight	19.0kg
Solar Cells	Polycrystalline 156 × 156mm (60pcs)
Front glass	3.2 mm tempered glass, low iron
Frame	Anodized/ Electrophoretic aluminum alloy
Junction Box	IP65 /IP67
Output Cables	4.0 mm ² , symmetrical lengths 900mm
Connector	MC4 Compatible
Maximum Snow Load	550kg/m ²
Maximum Wind Load	200km/h
Hailstone Impact Test	80km/h for 25mm ice ball

Current-Voltage & Power-Voltage Curve (STP6-250/60)



Dealer information:

© 2014 Schutten Solar Energy Co., Ltd
Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

blue sky . green life



Schutten Solar
<http://www.schutten-solar.com>



dsPIC30F1010/202X

Data Sheet

28/44-Pin High-Performance
Switch Mode Power Supply
Digital Signal Controllers



dsPIC30F1010/202X

28/44-pin dsPIC30F1010/202X Enhanced Flash SMPS 16-bit Digital Signal Controller

Note: This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the "dsPIC30F Family Reference Manual" (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the "dsPIC30F/33F Programmer's Reference Manual" (DS70157).

High-Performance Modified RISC CPU:

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction set architecture
- 83 base instructions with flexible addressing modes
- 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path
- 12 Kbytes on-chip Flash program space
- 512 bytes on-chip data RAM
- 16 x 16-bit working register array
- Up to 30 MIPS operation:
 - Dual Internal RC 9.7 and 14.55 MHz ($\pm 1\%$)
 - 32X PLL with 480 MHz VCO
 - PLL inputs $\pm 3\%$
 - External EC clock 9.7 and 14.55 MHz
 - HS Crystal mode 9.7 and 14.55 MHz
- 32 interrupt sources
- Three external interrupt sources
- 8 user-selectable priority levels for each interrupt
- 4 processor exceptions and software traps

DSP Engine Features:

- Modulo and Bit-Reversed modes
- Two 40-bit wide accumulators with optional saturation logic
- 17-bit x 17-bit single-cycle hardware fractional/integer multiplier
- Single-cycle Multiply-Accumulate (MAC) operation
- 40-stage Barrel Shifter
- Dual data fetch

Peripheral Features:

- High-current sink/source I/O pins: 25 mA/25 mA
- Three 16-bit timers/counters; optionally pair up 16-bit timers into 32-bit timer modules
- Four 16-bit Capture input functions
- Two 16-bit Compare/PWM output functions
 - Dual Compare mode available
- 3-wire SPI modules (supports 4 Frame modes)
- I²C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing
- UART Module:
 - Supports RS-232, RS-485 and LIN 1.2
 - Supports IrDA® with on-chip hardware endec
 - Auto wake-up on Start bit
 - Auto-Baud Detect
 - 4-level FIFO buffer

SMPS PWM Module Features:

- Four PWM generators with 8 outputs
- Each PWM generator has independent time base and duty cycle
- Duty cycle resolution of 1.1 ns at 30 MIPS
- Individual dead time for each PWM generator:
 - Dead-time resolution 4.2 ns at 30 MIPS
 - Dead time for rising and falling edges
- Phase-shift resolution of 4.2 ns @ 30 MIPS
- Frequency resolution of 8.4 ns @ 30 MIPS
- PWM modes supported:
 - Complementary
 - Push-Pull
 - Multi-Phase
 - Variable Phase
 - Current Reset
 - Current-Limit
- Independent Current-Limit and Fault Inputs
- Output Override Control
- Special Event Trigger
- PWM generated ADC Trigger

dsPIC30F1010/202X

Analog Features:

ADC

- 10-bit resolution
- 2000 Ksps conversion rate
- Up to 12 input channels
- "Conversion pairing" allows simultaneous conversion of two inputs (i.e., current and voltage) with a single trigger
- PWM control loop:
 - Up to six conversion pairs available
 - Each conversion pair has up to four PWM and seven other selectable trigger sources
- Interrupt hardware supports up to 1M interrupts per second

COMPARATOR

- Four Analog Comparators:
 - 20 ns response time
 - 10-bit DAC reference generator
 - Programmable output polarity
 - Selectable input source
 - ADC sample and convert capable
- PWM module interface
 - PWM Duty Cycle Control
 - PWM Period Control
 - PWM Fault Detect
- Special Event Trigger
- PWM-generated ADC Trigger

Special Microcontroller Features:

- Enhanced Flash program memory:
 - 10,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 100k (typical)
- Self-reprogrammable under software control
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Flexible Watchdog Timer (WDT) with on-chip low power RC oscillator for reliable operation
- Fail-Safe clock monitor operation
- Detects clock failure and switches to on-chip low power RC oscillator
- Programmable code protection
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)
- Selectable Power Management modes
 - Sleep, Idle and Alternate Clock modes

CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash technology
- 3.0V and 5.0V operation ($\pm 10\%$)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low power consumption

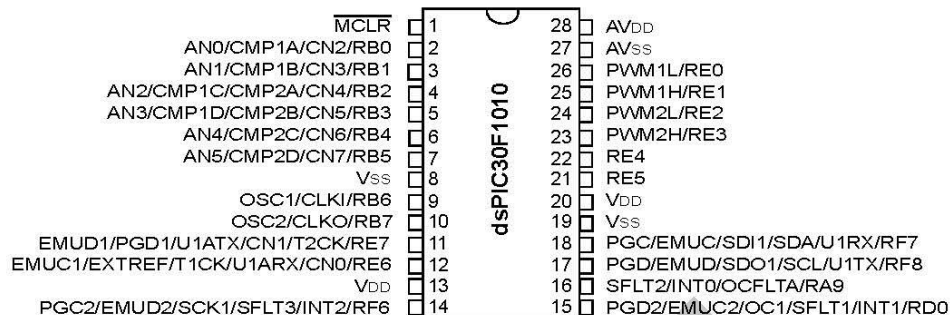
dsPIC30F SWITCH MODE POWER SUPPLY FAMILY:

Product	Pins	Packaging	Program Memory (Bytes)	Data SRAM (Bytes)	Timers	Capture	Compare	UART	SPI	I ² C™	PWM	ADCs	S & H	A/D Inputs	Analog Comparators
dsPIC30F1010	28	SDIP	6K	256	2	0	1	1	1	1	2x2	1	2	6 ch	2
dsPIC30F1010	28	SOIC	6K	256	2	0	1	1	1	1	2x2	1	2	6 ch	2
dsPIC30F1010	28	QFN	6K	256	2	0	1	1	1	1	2x2	1	2	6 ch	2
dsPIC30F2020	28	SDIP	12K	512	3	1	2	1	1	1	4x2	1	4	8 ch	4
dsPIC30F2020	28	SOIC	12K	512	3	1	2	1	1	1	4x2	1	4	8 ch	4
dsPIC30F2020	28	QFN	12K	512	3	1	2	1	1	1	4x2	1	4	8 ch	4
dsPIC30F2023	44	QFN	12K	512	3	1	2	1	1	1	4x2	1	4	12 ch	4
dsPIC30F2023	44	TQFP	12K	512	3	1	2	1	1	1	4x2	1	4	12 ch	4

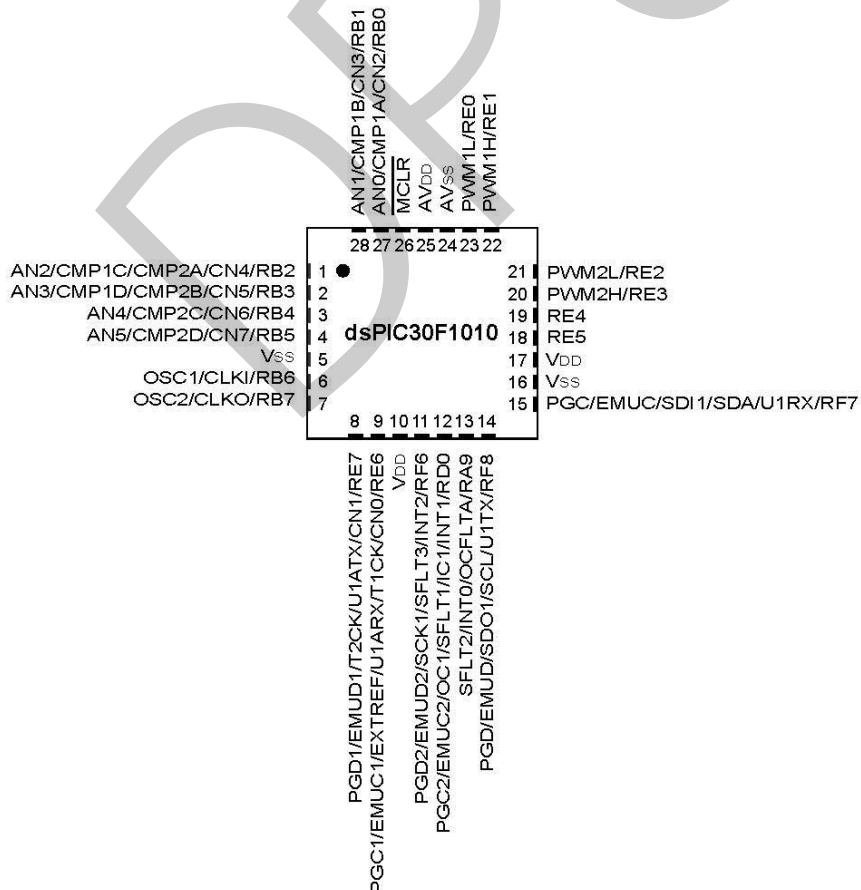
dsPIC30F1010/202X

Pin Diagrams

28-Pin SDIP and SOIC



28-Pin QFN



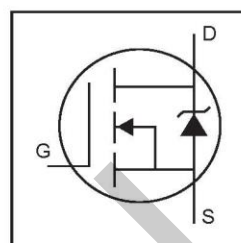
International
IR Rectifier

PD - 94053

IRFZ44N

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated



$V_{DS} = 55V$
 $R_{DS(on)} = 17.5m\Omega$
 $I_D = 49A$

Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



TO-220AB

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	49	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	35	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	160	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	94	W
	Linear Derating Factor	0.63	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current ①	25	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	9.4	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds		
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	300 (1.6mm from case) 10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.5	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

www.irf.com

1

01/03/01

IRFZ44N

International
IR Rectifier

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.058	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to 25°C , $I_D = 1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	17.5	m Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 25A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	19	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 25A$ ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	63	nC	$I_D = 25A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	14		$V_{DS} = 44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	23		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	12	—	ns	$V_{DD} = 28V$
t_r	Rise Time	—	60	—		$I_D = 25A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	44	—		$R_G = 12\Omega$
t_f	Fall Time	—	45	—		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	1470	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	360	—		$V_{DS} = 25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	88	—		$f = 1.0\text{MHz}$, See Fig. 5
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	—	530 ⑤	150 ⑥		$I_{AS} = 25A, L = 0.47\text{mH}$



Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	49	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	160		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = 25A, V_{GS} = 0V$ ④
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	63	95	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_F = 25A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	170	260	nC	$di/dt = 100A/\mu s$ ④
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by $L_S + L_D$)				

Notes:

① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)

② Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 0.48\text{mH}$
 $R_G = 25\Omega$, $I_{AS} = 25A$. (See Figure 12)

③ $I_{SD} \leq 25A$, $di/dt \leq 230A/\mu s$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$,
 $T_J \leq 175^\circ\text{C}$

④ Pulse width $\leq 400\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.

⑤ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.

⑥ This is a calculated value limited to $T_J = 175^\circ\text{C}$.

MUR1605 thru MUR1660



Pb Free Plating Product

MUR1605 thru MUR1660



16.0 Amp.Glass Passivated Ultra Fast Recovery Rectifiers

Features

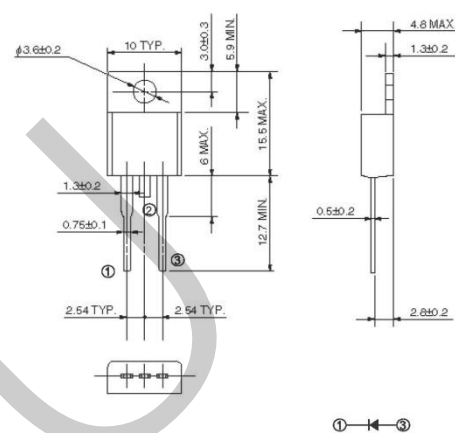
- * Fast switching for high efficiency
- * Low forward voltage drop
- * High current capability
- * Low reverse leakage current
- * High surge current capability

Mechanical Data

- * Case: Molded TO-220AC
- * Epoxy: UL 94V-0 rate flame retardant
- * Terminals: Solderable per MIL-STD-202 method 208
- * Polarity: Color band denotes cathode
- * Mounting position: Any
- * Weight: 2.03 grams

TO-220AC

Unit : inch (mm)



MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Rating at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

Single phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.

For capacitive load, derate current by 20%

CHARACTERISTICS	SYMBOL	MUR 1605	MUR 1610	MUR 1615	MUR 1620	MUR 1630	MUR 1640	MUR 1660	UNIT
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	VRRM	50	100	150	200	300	400	600	V
Maximum RMS Voltage	VRMS	35	70	105	140	210	280	420	V
Maximum DC Blocking Voltage	VDC	50	100	150	200	300	400	600	V
Maximum Average Forward Rectified Current @TA =75 °C	I(AV)	16.0							A
Peak Forward Surge Current 8.3ms Single Half Sine-Wave Super Imposed on Rated Load(JEDEC Method)	IFSM	300							A
Peak Forward Voltage at 16.0A DC	VF	0.95				1.3		1.7	V
Maximum DC Reverse Current @TJ=25°C	IR	10							μA
at Rated DC Blocking Voltage @TJ=100°C		150							
Maximum Reverse Recovery Time(Note1)	TRR	35							nS
Typical Junction Capacitance (Note2)	CJ	80							pF
Typical Thermal Resistance (Note3)	RθJA	2.5							°C/W
Operating and Storage Temperature Range	TJ,TSTG	-55 to + 150							°C

NOTES:1.Measured with I_F=0.5A,I_R=1A,I_{RR}=0.25A

2.Measured at 1.0 MHZ and applied reverse voltage of 4.0VDC.

3.Thermal resistance junction to ambient

MUR1605 thru MUR1660



RATING AND CHARACTERISTIC CURVES (MUR1605 thru MUR1660)

FIG.1- TYPICAL FORWARD CURRENT DERATING CURVE

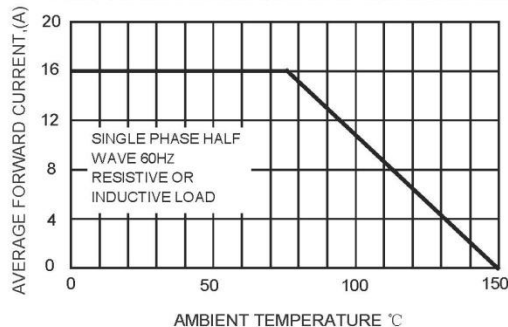


FIG.2-TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS

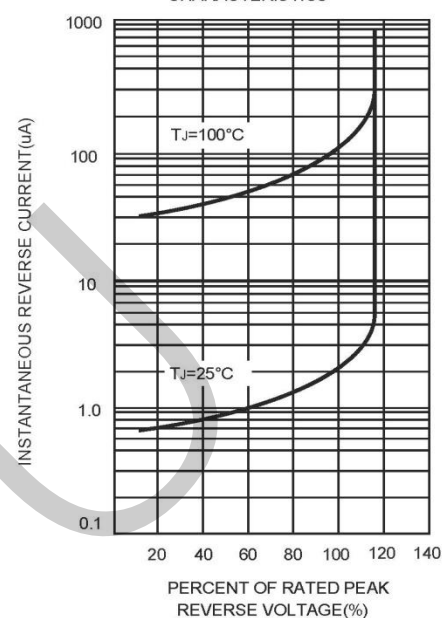


FIG.3-MAXIMUM NON-REPETITIVE FORWARD SURGE CURRENT

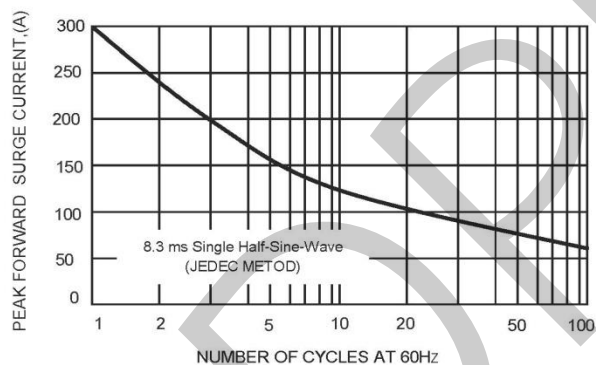


FIG.4-TYPICAL INSTANTANEOUS FORWARD CHARACTERISTICS

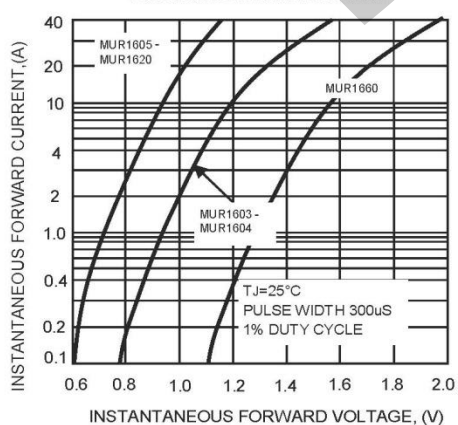
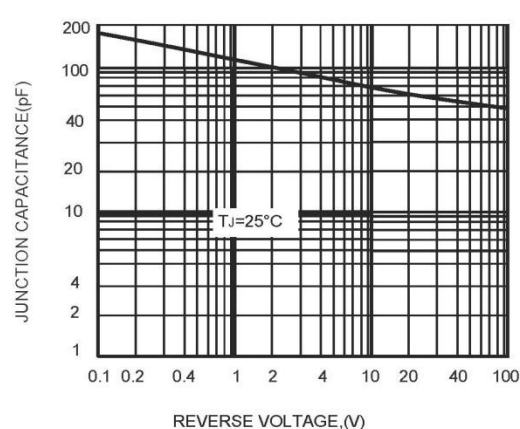


FIG.5-TYPICAL JUNCTION CAPACITANCE



TOSHIBA**GT15J331**

TOSHIBA Insulated Gate Bipolar Transistor Silicon N Channel IGBT

GT15J331

High Power Switching Applications Motor Control Applications

- Fourth-generation IGBT
- Enhancement mode type
- High speed: $t_f = 0.10 \mu s$ (typ.)
- Low saturation voltage: $V_{CE(sat)} = 1.75 V$ (typ.)
- FRD included between emitter and collector

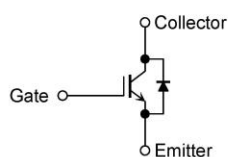
Absolute Maximum Ratings ($T_a = 25^\circ C$)

Characteristic	Symbol	Rating	Unit
Collector-emitter voltage	V_{CES}	600	V
Gate-emitter voltage	V_{GES}	± 20	V
Collector current	DC	I_C	15
	1 ms	I_{CP}	30
Emitter-collector forward current	DC	I_F	15
	1 ms	I_{FM}	30
Collector power dissipation ($T_c = 25^\circ C$)	P_C	70	W
Junction temperature	T_j	150	$^\circ C$
Storage temperature range	T_{stg}	$-55 \sim 150$	$^\circ C$

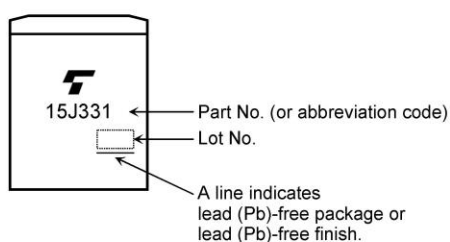
Note: Using continuously under heavy loads (e.g. the application of high temperature/current/voltage and the significant change in temperature, etc.) may cause this product to decrease in the reliability significantly even if the operating conditions (i.e. operating temperature/current/voltage, etc.) are within the absolute maximum ratings.

Please design the appropriate reliability upon reviewing the Toshiba Semiconductor Reliability Handbook ("Handling Precautions"/Derating Concept and Methods) and individual reliability data (i.e. reliability test report and estimated failure rate, etc.).

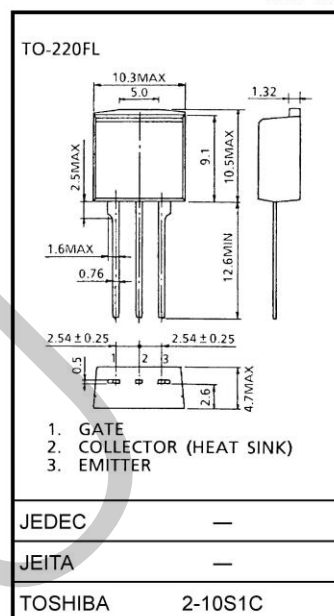
Equivalent Circuit



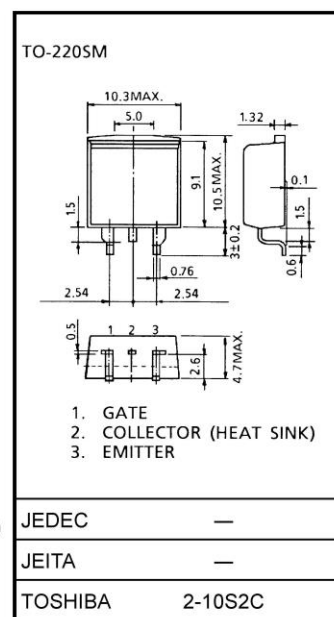
Marking



Unit: mm



Weight: 1.5 g



Weight: 1.4 g

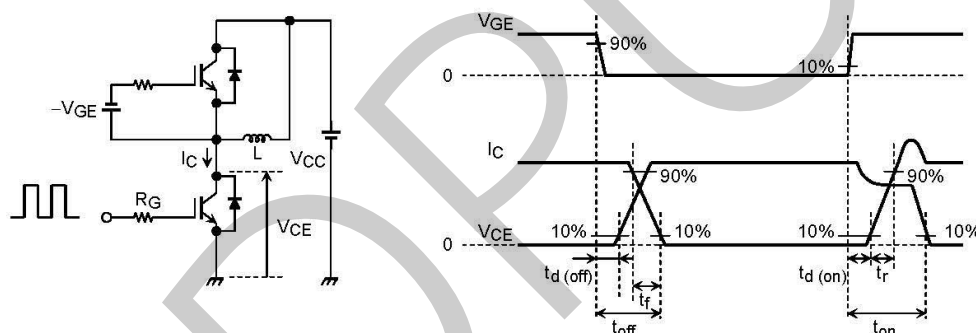
TOSHIBA

GT15J331

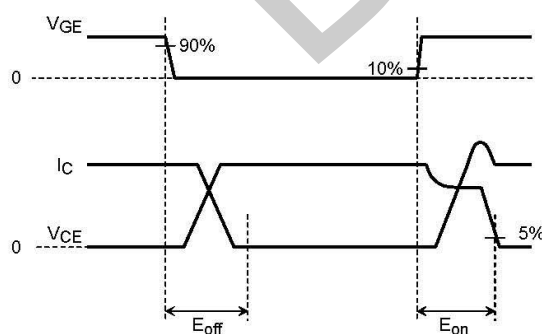
Electrical Characteristics (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Test Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Gate leakage current		I_{GES}	$V_{GE} = \pm 20 \text{ V}, V_{CE} = 0$	—	—	± 500	nA
Collector cut-off current		I_{CES}	$V_{CE} = 600 \text{ V}, V_{GE} = 0$	—	—	1.0	mA
Gate-emitter cut-off voltage		$V_{GE(OFF)}$	$I_C = 1.5 \text{ mA}, V_{CE} = 5 \text{ V}$	4.5	—	7.5	V
Collector-emitter saturation voltage		$V_{CE(sat)}$	$I_C = 15 \text{ A}, V_{GE} = 15 \text{ V}$	—	1.75	2.3	V
Input capacitance		C_{ies}	$V_{CE} = 20 \text{ V}, V_{GE} = 0, f = 1 \text{ MHz}$	—	2400	—	pF
Switching time	Rise time	t_r	Inductive Load $V_{CC} = 300 \text{ V}, I_C = 15 \text{ A}$ $V_{GG} = 15 \text{ V}, R_G = 43 \Omega$ (Note1)	—	0.04	—	μs
	Turn-on time	t_{on}		—	0.22	—	
	Fall time	t_f		—	0.10	0.23	
	Turn-off time	t_{off}		—	0.37	—	
Peak forward voltage		V_F	$I_F = 15 \text{ A}, V_{GE} = 0$	—	—	2.0	V
Reverse recovery time		t_{rr}	$I_F = 15 \text{ A}, di/dt = -100 \text{ A}/\mu\text{s}$	—	—	200	ns
Thermal resistance (IGBT)		$R_{th(j-c)}$	—	—	—	1.79	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
Thermal resistance (Diode)		$R_{th(j-c)}$	—	—	—	3.45	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$

Note1: Switching time measurement circuit and input/output waveforms



Note2: Switching loss measurement waveforms



TOSHIBA

TLP250

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC

TLP250

Transistor Inverter

Inverter For Air Conditionor

IGBT Gate Drive

Power MOS FET Gate Drive

The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.

This unit is 8-lead DIP package.

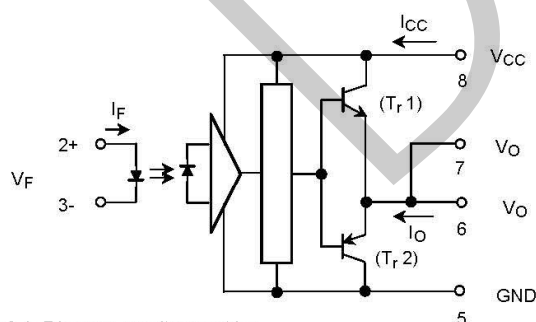
TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

- Input threshold current: $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current (I_{CC}): $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage (V_{CC}): $10\sim 35\text{V}$
- Output current (I_O): $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time (t_{pLH}/t_{pHL}): $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage: $2500\text{V}_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option (D4) type
 - VDE approved: DIN VDE0884/06.92,certificate No.76823
 - Maximum operating insulation voltage: 630V_{PK}
 - Highest permissible over voltage: 4000V_{PK}

(Note) When a VDE0884 approved type is needed,
please designate the "option (D4)"

- Creepage distance: $6.4\text{mm}(\text{min.})$
- Clearance: $6.4\text{mm}(\text{min.})$

Schematic

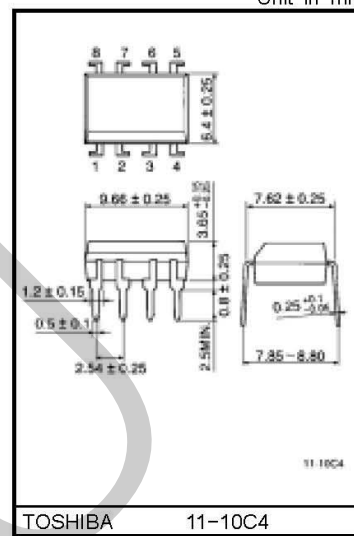


A $0.1\mu\text{F}$ bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

Truth Table

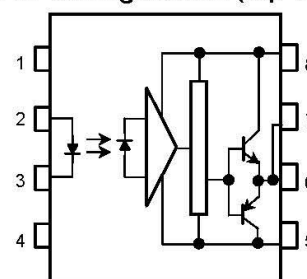
		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

Unit in mm



Weight: 0.54 g

Pin Configuration (top view)



- 1 : N.C.
- 2 : Anode
- 3 : Cathode
- 4 : N.C.
- 5 : GND
- 6 : V_O (Output)
- 7 : V_O
- 8 : V_{CC}

ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ดังนี้

- [1] มณฑล นาวงษ์ “การสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์” วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร ฉบับประจำเดือนมกราคม-มิถุนายน 2560 ปีที่ 12 ฉบับที่ 1.

การออกแบบบูสคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อแบบอนุกรมสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้
พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

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

มนทล นาวงษ์

Monthon Nawong

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต E-mail: monthon.naw@dpu.ac.th

บทคัดย่อ

อินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปใช้หลักการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงขึ้น บทความนี้นำเสนอการออกแบบบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งแผงต่อวงจรและนำวงจรมาเชื่อมต่อแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงขึ้นสำหรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ บูสคอนเวอร์เตอร์ใช้หลักการควบคุมแบบชนิดพีโอด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 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: บูสคอนเวอร์เตอร์ การควบคุมแบบชนิดพีโอ บูสคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อแบบอนุกรม อินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟส

Abstract

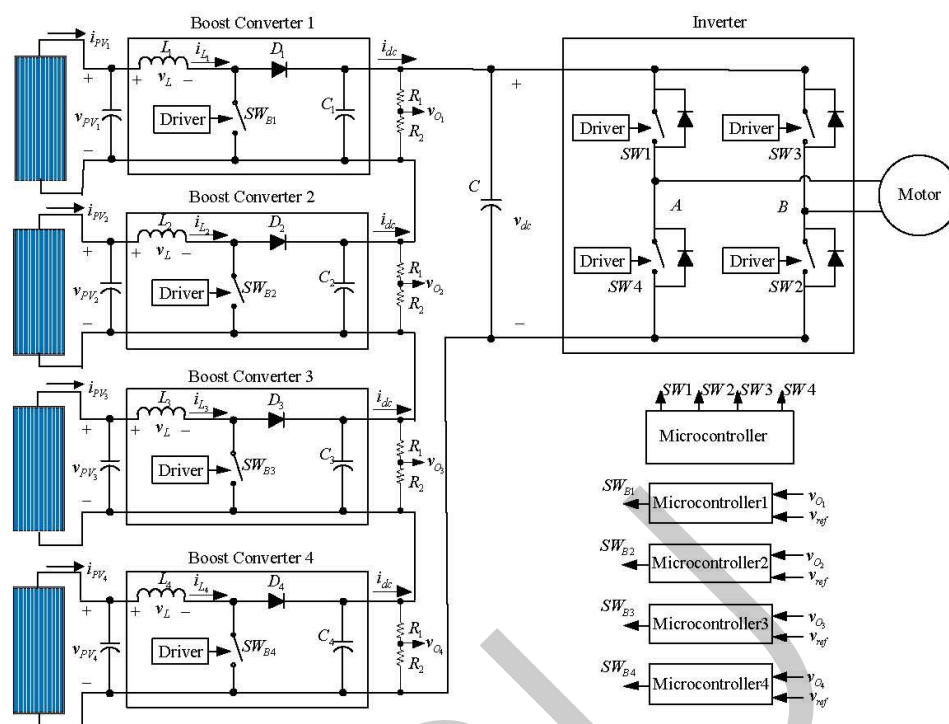
The single-phase stand-alone photovoltaic inverter commonly connects to series of photovoltaic panels for increasing higher voltage dc. This paper presents a design of boost converter connected with a photovoltaic panel and use this circuit connects in series to increase higher voltage dc source for 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

ดังนั้นพลังงานทดแทนจึงเป็นทางเลือกที่นำมาใช้งานทดแทนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากฟอสซิล เช่น พลังงานลม และพลังงานจากแสงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งเป็นพลังงานสะอาด มีอยู่ทั่วไป และไม่มีต้นทุนของวัตถุดิบ พลังงานจากแสงอาทิตย์ใช้อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell:PV) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงาน



รูปที่ 1 บูสคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อแบบอนุกรมสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงซึ่งมีระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำ ดังนั้นเมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานจึงต้องนำมาต่อเชื่อมเป็นวงจรแบบโมดูล (Module) หรือพาแนล (Panel) เรียกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module or PV Panel) พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและความเข้มแสง ดังนั้นวงจรคอนเวอร์เตอร์จึงถูกนำมาใช้งานในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น นำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงหรือนำมาประจุแบตเตอรี่โดยใช้วงจร buck converter หรือบูสคอนเวอร์เตอร์ (Boost converter) (Armstrong, Glavin, & Hurley 2008) และนำมาใช้สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับหรือเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าโดยใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) (Kjaer, Pedersen, & Blaabjerg 2005) อินเวอร์เตอร์ที่นำมาใช้งานในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งแบบชนิดหนึ่งเฟสและชนิดสามเฟส สามารถแบ่งตามประเภทการใช้งานได้เป็น 2 ประเภทคือ อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อบนระบบไฟฟ้า (Grid-connected inverter) (Cupertino, de Resende, Pereira, & Seleme 2012) และอินเวอร์เตอร์แบบอิสระ (Stand-alone inverters) (Sulaiman, Ameen, & Said 2010) โดยมีรูปแบบการทำงาน

โดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสมีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านออก 220 V ซึ่งต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเข้า 300 V ถึง 400 V แต่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ไม่เกิน 40 V ต่อแผงขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ของแผง ดังนั้นจึงต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 10 แผง ถึง 14 แผงต่อแบบอนุกรม เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงขึ้นเพื่อเป็นแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ (Yodwong et al., 2015) แต่การต่อแบบอนุกรมจำนวนหลายแผงทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดของทุกแผงมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นจึงต้องใช้ขนาดพื้นที่ของแผงที่เท่ากันและวางอยู่ตำแหน่งของการรับแสงที่เท่ากันด้วย เมื่อเกิดเงาบังที่แผงใดแผงหนึ่ง ทำให้แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ของทั้งระบบมีค่าลดลง (Vongkoon, & Liutanakul, 2012)

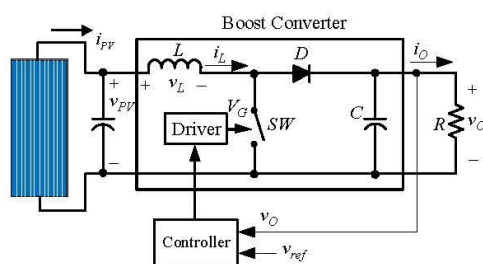
วงจร DC/DC คอนเวอร์เตอร์ (DC/DC converter) (Erickson, & Maksimovic, 2005) ถูกนำมาใช้ในการเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ทำให้ช่วย

ลดจำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อแบบอนุกรมโดยใช้วงจรตีชัตติชคอนเวอร์เตอร์ชนิดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ (Flyback converter) (Tamyurek, & Kirimer, 2013) ซึ่งมีหม้อแปลงเป็นส่วนประกอบหลักทำให้วงจรมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก บูสคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรตีชัตติชคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่ใช้หม้อแปลงเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นวงจรจึงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพสูงจึงเหมาะที่นำมาใช้สำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

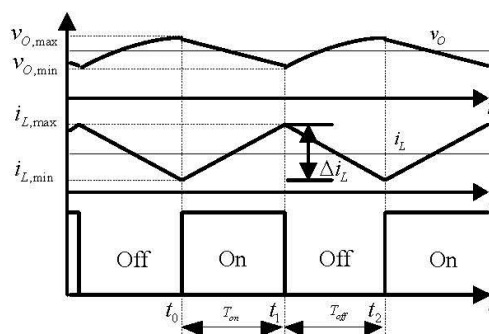
สำหรับงานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและเชื่อมต่อบูสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม โดยการเพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งแผงต่อวงจร ที่ขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 20 V ถึง 40 V ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามระดับความเข้มของแสงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 100 V ใช้การควบคุมแบบชนิดพีไอด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และนำบูสคอนเวอร์เตอร์มาเชื่อมต่อแบบอนุกรมจำนวนสี่วงจรเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 400 V สำหรับเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเข้าของอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้หลักการสวิตช์แบบพีดับเบิลยูเอ็มชนิดการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์เพื่อนำมาใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ขนาดพิกัด 0.3 kW ดังรูปที่ 1

2. การออกแบบบูสคอนเวอร์เตอร์

บูสคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เพิ่มระดับของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้า และสามารถรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกให้คงที่ โดยวงจรประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตช์ (SW) ไดโอด (D) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ดังรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรจากลักษณะการทำงานของสวิตช์เป็นแบบนำกระแสไฟฟ้าและเป็นแบบไม่นำกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดรูปแบบการทำงานของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก (v_o) และกระแสไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ (i_L) ขณะสวิตช์นำกระแสไฟฟ้าและไม่นำกระแสไฟฟ้างดังรูปที่ 3

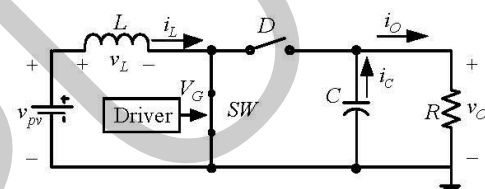


รูปที่ 2 บูสคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า v_o และกระแสไฟฟ้า i_L ขณะสวิตช์นำกระแสไฟฟ้าและไม่นำกระแสไฟฟ้า

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



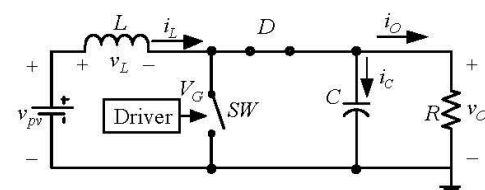
รูปที่ 4 บูสคอนเวอร์เตอร์ช่วงเวลาการทำงานที่ $t_0 < t < t_1$

เมื่อสวิตช์นำกระแสไฟฟ้าได้วงจรการทำงานดังรูป 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 สวิตช์ไม่นำกระแสไฟฟ้าและไดโอดนำกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 5 บูสคอนเวอร์เตอร์ช่วงเวลาการทำงานที่ $t_1 < t < t_2$

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

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

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

การออกแบบบัสคอนเวอร์เตอร์โดยใช้แหล่งพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้าทางเข้า (v_{PV}) ที่ผลิตได้มีค่าระหว่าง 20 V ถึง 40 V และแรงดันไฟฟ้าทางด้าออก (v_o) มีค่าคงที่ 100 V กระแสไฟฟ้าทางด้าออก (i_o) มีค่า 1 A ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ f_s มีค่า 40 kHz การออกแบบการทำงานของวงจรในโหมดกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง ดังนั้นค่าตัวใช้เคิลต่ำสุด (D_{min}) และค่าตัวใช้เคิลสูงสุด (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 (Δi_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

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

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

กำหนดให้ค่าระลอกคลื่นของแรงดันไฟฟ้าทางด้าออก (Δv_o) มีค่าไม่เกิน 1% ค่าตัวเก็บประจุตามสมการที่ (11)

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

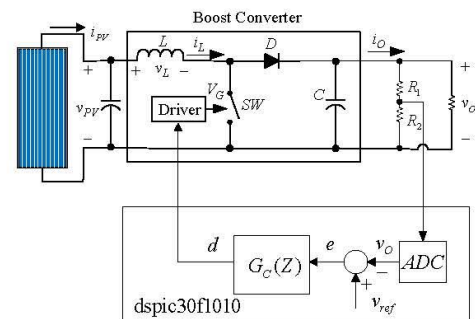
ค่าพารามิเตอร์ของบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ออกแบบทั้งหมดเป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของบัสคอนเวอร์เตอร์

พารามิเตอร์	พิกัด
แรงดันไฟฟ้าทางด้าเข้า (v_{PV})	20 V ถึง 40 V
แรงดันไฟฟ้าทางด้าออก (v_o)	100 V
ความถี่ที่ใช้ในการสวิตช์ (f_s)	40 kHz
ตัวเหนี่ยวนำ (L)	1.2mH
ตัวเก็บประจุ (C)	20μF

3. การควบคุมการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์

การควบคุมการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ โดยการออกแบบวงจรควบคุมให้สามารถรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าทางด้าออกให้คงที่ โดยการออกแบบวงจรควบคุมแบบพีไอ มีแผนภาพบล็อกการทำงานดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพบล็อกการทำงานของการควบคุมแบบดิจิทัล

การออกแบบวงจรควบคุมแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่โดยเริ่มจากการคำนวณหาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของบูสคอนเวอร์เตอร์ ($G_{vd}(s)$) 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 $D_o = 1-D$ สำหรับค่าของพารามิเตอร์ของบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเป็นไปตามตารางที่ 1 ทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของบูสคอนเวอร์เตอร์เป็นไปตามสมการที่ (13)

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

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

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

สำหรับการออกแบบวิธีควบคุมการทำงานของบูสคอนเวอร์เตอร์ให้สามารถรักษาระดับของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกได้ในงานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมชนิดพีไอ (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)

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

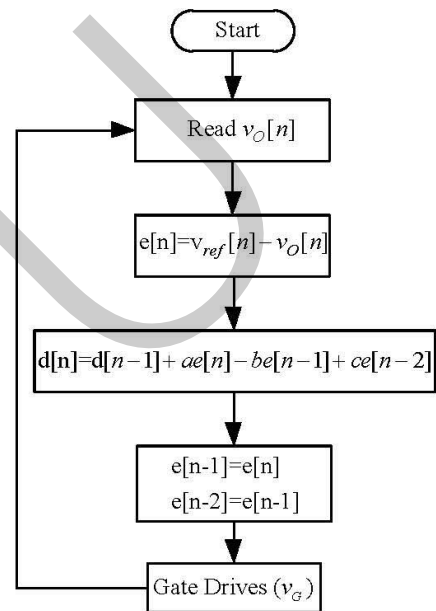
จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของบูสคอนเวอร์เตอร์ในสมการที่ (14) ทำให้ได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมได้ดังนี้

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

สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมตามสมการที่ (17) นำมาเขียนโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดังนี้

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

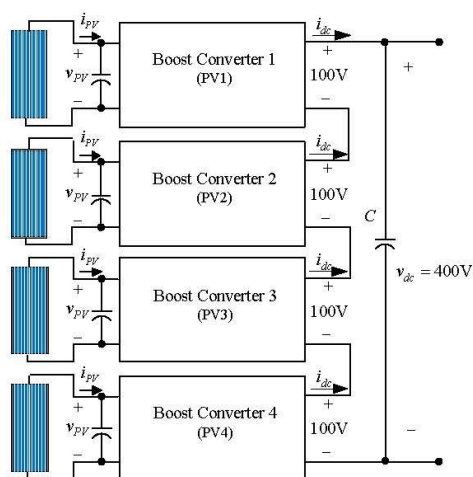
สามารถอธิบายการทำงานในรูปแบบของแผนผังการทำงานของวงจรควบคุมแบบดิจิทัลดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนผังการทำงานของวงจรควบคุมแบบดิจิทัล

4. การเชื่อมต่อบูสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรม

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



รูปที่ 8 บูสเตอร์คอนเวอร์เตอร์ที่มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม

5. การทำงานของอินเวอร์เตอร์

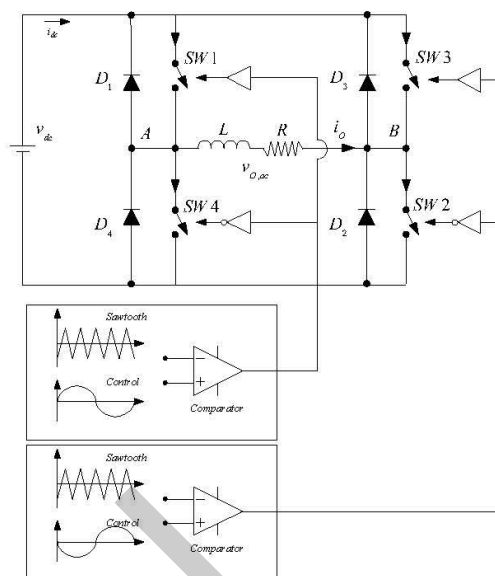
อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก ($v_{o,ac}$) และปรับค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก (f_o) โดยใช้หลักการสวิตชิงแบบที่ดับเบิ้ลยูเอ็มซีทีการสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์มีแรงดันไฟฟ้าทางด้านออกดังนี้

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

อัตราส่วนการมอดูเลตความถี่ m_f มีค่าตามสมการที่ (20) ทำให้ได้ค่าของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ตามลำดับของฮาร์โมนิกดังตารางที่ 2

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

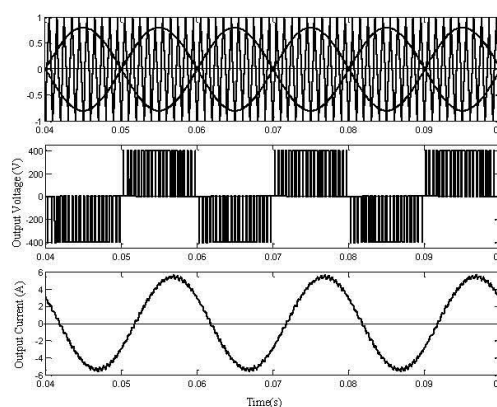
หลักการสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์ (SW1-SW4) สำหรับอินเวอร์เตอร์ชนิดหนึ่งเฟสแบบยูนิโพลาร์ โดยทั่วไปคือการนำสัญญาณฟันเลื่อยและสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ต่างเฟสกัน 180 องศา มาทำการเปรียบกันเพื่อให้ได้สัญญาณพีดับบิวเอ็ม (SPWM) รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์เมื่อใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ดังรูปที่ 10



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



รูปที่ 10 รูปคลื่นการมอดูเลตของสัญญาณควบคุม แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์

6. ผลการทดลองการทำงาน

การทดสอบการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อบนอุปกรณ์สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกเป็นการทดสอบการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 100 V ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F1010 ต่อยังรวมและนำมาเชื่อมต่อบนอุปกรณ์จำนวนสี่วงจรเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 400 V เพื่อนำไปทดสอบกับอินเวอร์เตอร์ที่มีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก 220 V ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F1010 และใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์

6.1 ผลการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์

การทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ทั้งสี่วงจรใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามรูปที่ 11 แต่ละวงจรมีการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F1010 และกำหนดค่าตัวตั้งโวลเทจของบัสคอนเวอร์เตอร์ให้มีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.8 เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตามที่ออกแบบ เมื่อทดสอบการทำงานของวงจรโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าจาก 0 V ถึง 40 V ทำให้ได้ผลของแรงดันไฟฟ้าด้านออกมีอัตราส่วนคงที่เมื่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้ามีค่าน้อยกว่าประมาณ 20V และเมื่อแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้ามีค่ามากกว่า 20V ทำให้ค่าตัวตั้งโวลเทจมีค่าน้อยกว่า 0.8 แรงดันไฟฟ้าทางด้านออกมีค่าคงที่ที่ 100 V โดยประสิทธิภาพการทำงาน (η) ของบัสคอนเวอร์เตอร์เป็นไปตามสมการที่ (21) ผลการทำงานของแรงดันไฟฟ้าด้านออกและประสิทธิภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าเป็นไปตามรูปที่ 12

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

เมื่อพิจารณาการทำงานของวงจรบัสคอนเวอร์เตอร์ในช่วงที่แรงดันไฟฟ้าทางด้านออกคงที่ 100 V ค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และค่าประสิทธิภาพการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ทั้งสี่วงจร (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

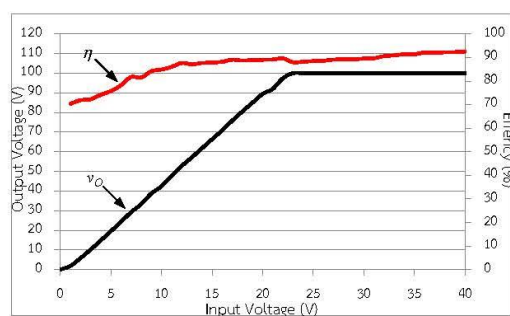


ก) แผงเซลล์แสงอาทิตย์



ข) บัสคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

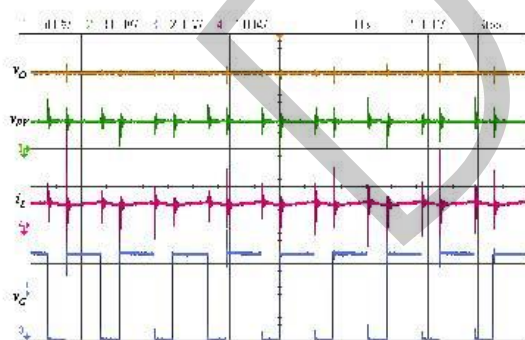


รูปที่ 12 ผลการทำงานของแรงดันไฟฟ้าด้านออกและประสิทธิภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าของบัสคอนเวอร์เตอร์

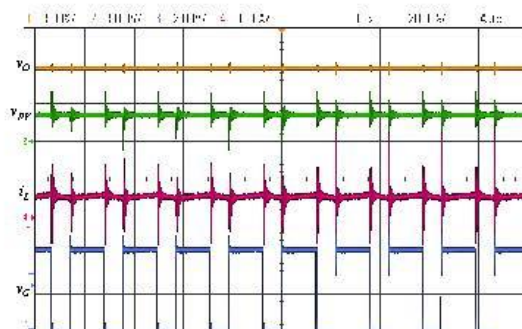
ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้า

วงจร	ด้านเข้า			ด้านออก			η
	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

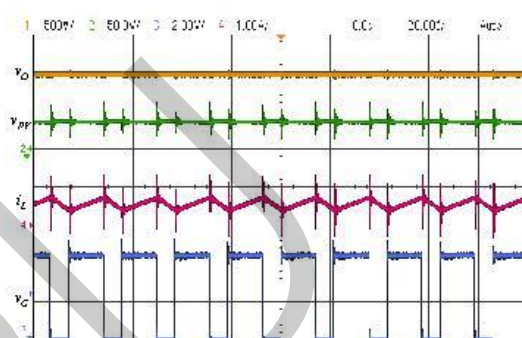
การทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์แต่ละวงจรที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจำนวนหนึ่งแผงต่อวงจรนำมาทดสอบกับสภาพภูมิอากาศจริงทำให้ได้รูปสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าทางด้านออก แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำและสัญญาณขับสวิตช์ของบัสคอนเวอร์เตอร์ทั้งสี่วงจรดังรูปที่ 13 และเมื่อวัดค่าของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ทางด้านเข้าและทางด้านออก ได้ผลตามตารางที่ 4 โดยมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยทั้งสี่วงจร 94.27 เปอร์เซ็นต์



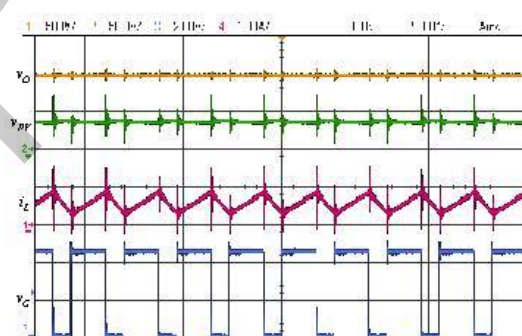
ก) บัสคอนเวอร์เตอร์ 1 (PV 1)



ข) บัสคอนเวอร์เตอร์ 2 (PV 2)



ค) บัสคอนเวอร์เตอร์ 3 (PV 3)



ง) บัสคอนเวอร์เตอร์ 4 (PV 4)

รูปที่ 13 ผลการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์ (CH1) แรงดันไฟฟ้า v_O (50 V/div), (CH2) แรงดันไฟฟ้า v_{PP} (50 V/div), (CH3) สัญญาณ v_G (2 V/div), (CH4) กระแสไฟฟ้า i_L (1 A/div) และแกนของเวลา (20 μ s/div)

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์เมื่อทดสอบกับสภาพภูมิอากาศจริง

วงจร	แผงเซลล์แสงอาทิตย์			ด้านออก			η
	แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า	
	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(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 ประสิทธิภาพการทำงานของบัสคอนเวอร์เตอร์เมื่อเกิดเกิดสภาวะเงาบังที่แผงใดแผงหนึ่ง

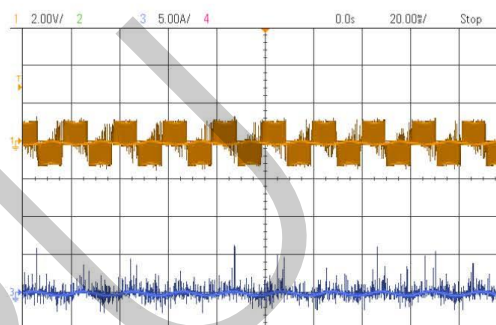
วงจร	แผงเซลล์แสงอาทิตย์			ด้านออก		
	แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า
	(V)	(A)	(W)	(V)	(A)	(W)
PV 1	36.90	0.563	20.77	354	0.2	70.8
PV 2	10.8	1.30	14.04			
PV 3	36.31	0.585	21.24			
PV 4	36.35	0.595	21.62			

จากค่าตามตารางที่ 5 เมื่อเกิดสภาวะเงาบังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แผงใดแผงหนึ่ง (PV2) ทำให้บัสคอนเวอร์เตอร์มีแรงดันไฟฟ้า 10.8 V และกระแสไฟฟ้า 1.30 A และอีกสามวงจรที่เหลืออยู่ยังคงทำงานได้ตามปกติ ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้ารวมทั้งหมดยังมีค่าลดลงตามแผงที่เกิดสภาวะเงาบัง

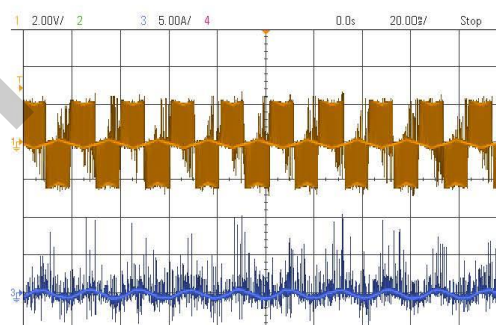
6.2 ผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์

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

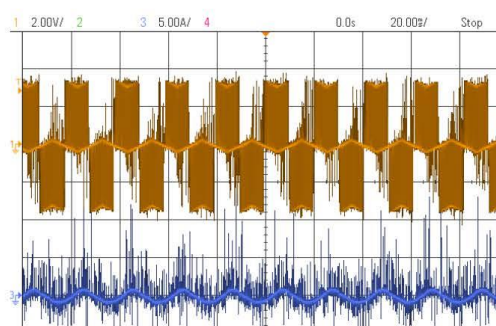
รูปที่ 14 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลอง



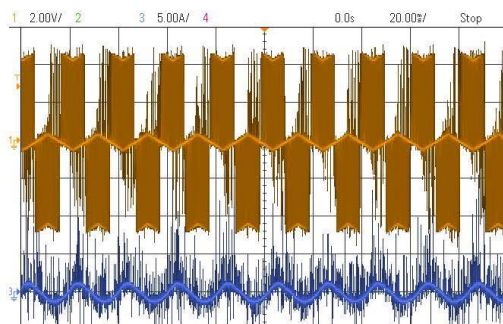
ก แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (100 V)



ข แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (200 V)



ค แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (300 V)



ง แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (400 V)

รูปที่ 15 ผลการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์ (CH1)

แรงดันไฟฟ้า $V_{o,ac}$ (200 V/div), (CH2) กระแสไฟฟ้า

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

6.3 ผลการทำงานของระบบเมื่อใช้งานกับโหลดอินดักชัน

มอเตอร์

เมื่อนำบูสคอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อแบบอนุกรมสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟสที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ขนาดพิกัด 0.3 kW โดยการทดสอบการทำงานเมื่อทำการเชื่อมต่อบูสคอนเวอร์เตอร์แบบอนุกรมทั้งสี่วงจรและทำการจ่ายพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ละวงจรโดยเริ่มจากหนึ่งวงจรได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 100 V และกระแสไฟฟ้า 0.04 A สองวงจรได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 200 V และกระแสไฟฟ้า 0.08 A สามวงจรได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 300 V และกระแสไฟฟ้า 0.13 A และสี่วงจรได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกคงที่ 400 V และกระแสไฟฟ้า 0.17 A ตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การทำงานของการเชื่อมต่อบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

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	8.21	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

เมื่อพิจารณาการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ขนาดพิกัด 0.3 kW ดังรูปที่ 16 พบว่าเมื่อจ่ายพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับบูสคอนเวอร์เตอร์จำนวนหนึ่งวงจรมีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก 55 V และกระแสไฟฟ้า 0.2 A ทำให้มอเตอร์ยังไม่เริ่มหมุนเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับบูสคอนเวอร์เตอร์จำนวนหนึ่งวงจรไม่เพียงพอกับโหลด และเมื่อจ่ายพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับบูสคอนเวอร์เตอร์จำนวนสองวงจรทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 110 V และกระแสไฟฟ้า 0.39 A ทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนที่ความเร็วรอบ 240 rpm และเมื่อจ่ายพลังงานที่สามวงจรและสี่วงจรทำให้มีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 164 V และ 223 V และกระแสไฟฟ้า 0.55 A และ 0.74 A ตามลำดับทำให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็ว

รอบ 1363 rpm และ 2408 rpm ได้ค่าตามตารางที่ 7



รูปที่ 16 โหลดอินดักชันมอเตอร์ขนาดพิกัด 0.3 kW

ตารางที่ 7 การทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์

จำนวน ชุด	Input DC		Output AC		ความเร็ว รอบ (rpm)
	แรงดัน ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (A)	แรงดัน ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (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

ผลการทำงานของบูสคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งแผงต่อวงจรเชื่อมต่อนับอนุกรมมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ย 94.27 เปอร์เซ็นต์ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 400 V สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบอิสระชนิดหนึ่งเฟส ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทางด้านออก 223 V ใช้งานกับโหลดอินดักชันมอเตอร์ขนาดพิกัด 0.3 kW และข้อดีคือแต่ละชุดวงจรการทำงานของบูสคอนเวอร์เตอร์มีการควบคุมที่อิสระต่อกันทำให้เมื่อวงจรหรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชุดใดชุดหนึ่งเกิดความเสียหายหรือเกิดสภาวะเงาบังทำให้ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ วงจรที่เหลืออยู่ยังทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และรูปแบบของวงจรที่นำเสนอทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดหรือพิกัดเดียวกันต่อนับอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สูงขึ้นสำหรับอินเวอร์เตอร์ และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับพลังงานทดแทนอื่นเช่น พลังงานลม หรือแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงอื่นๆได้ หรือใช้ร่วมกับพลังงานจากแบตเตอรี่เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพื่อรักษาเสถียรภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Armstrong, S., Glavin, M.E., & Hurley, W.G. (2008). Comparison of Battery Charging Algorithms for Stand Alone Photovoltaic Systems. In *IEEE Power Electronics Specialists Conference* (pp. 1469-1475), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- [2] Kjaer, S.B., Pedersen, J.K., & Blaabjerg, F. (2005). A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules. *IEEE Transactions on Industry applications*, 41(5), 1292-1306.
- [3] Cupertino, A.F., de Resende, J.T., Pereira, H.A., & Seleme, S.I. (2012). A Grid-Connected Photovoltaic System

with a Maximum Power Point Tracker using Passivity-based Control Applied in a Boost Converter. In *10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications* (pp. 1-8), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

- [4] Sulaiman, D.R., Ameen, H.F., & Said, I.K.. (2010). Design of High Efficiency DC-DC Converter for Photovoltaic Solar Home Applications. *Journal of Energy & Power Engineering*, 4(11), 43-51.
- [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.
- [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.
- [7] Erickson, R.W. & Maksimovic, D. (2005). Fundamentals of power electronics. University of Colorado, USA: Kluwer Academic Publishers.
- [8] Tamyurek, B., & Kirimer, B. (2013). An Interleaved Flyback Inverter for Residential Photovoltaic Applications. In *15th European Conference on Power Electronics and Applications* (pp. 1-10), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

9. ประวัติ



ดร.มนทล นาวงษ์ จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับ Power Electronics Applications, Switching Power Supply และ Renewable Energy

ภาคผนวก ง.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล ดร.มนทล นาวงษ์

วัน เดือน ปีเกิด 1 มกราคม 2519

ที่อยู่ 29/1 หมู่ 11 ตำบลบางลูกเสือ อำเภอองครักษ์
จังหวัดนครนายก 26120

ประวัติการศึกษา

- 2557 วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2546 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2542 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ประวัติการทำงาน

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

งานวิจัยที่สนใจ ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบควบคุมอัตโนมัติและด้านพลังงานทดแทน