



อินเวอร์เตอร์สามเฟส สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 3-phase Inverter for Solar Panel

บูรินทร์ ยอดวงศ์^{1,2} วัฒนา แก้วมณี^{1,2} สุวัฒน์ สิกบุตร¹ อมร บุญเส็ง¹ พงษ์ศิริ มุ่งพร¹
เมธีพจน์ พัฒนศักดิ์^{1,2} พนาฤทธิ์ เศรษฐกุล^{1,2} ปฏิพัทธ์ ทวนทอง^{1,2}

¹ศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน สถาบันนวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
²ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
E-mail: buriny, wattanak, suwatsi, amornb, pongsirim, pht@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 1.2 kW ซึ่งมีแรงดันขาเข้าสามารถเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 100 ถึง 200 V โดยเมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงอาจทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์สามเฟสมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสร้างวงจรและทำการควบคุมแรงดันขาออกให้มีค่าใช้งานคงที่เท่ากับ 80 V ซึ่งจะถูกลดให้มีความถี่สูงขึ้นโดยหม้อแปลงไฟฟ้าต่อไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการควบคุมทำโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM เป็นตัวประมวลผล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้มีแรงดันขาออกให้มีระดับคงที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์, อินเวอร์เตอร์, ควบคุม

Abstract

This paper proposes a 3-phase inverter for 1.2 kW solar cell panels, where the input voltage can be varied from 100 V to 200 V. In general, the varied of the input voltage may affect the output, thus, we regulate the rms output voltage to be constant at 80V, and then, step-up to the 380 V by a transformer. The implemented inverter used ARM microprocessor as a controller. The experimental result showed a constant and stable output voltage of the inverter, although, the input voltage varied from 100V to 200V.

Keyword: Solar cell, Inverter, Control.

1. บทนำ

ไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตและการพัฒนาในงานอุตสาหกรรมต่างๆ และความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แหล่งวัตถุดิบหลักในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันจะมาจากซากทับถมดึกดำบรรพ์ (Fossil) เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และ ก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก แต่แหล่งวัตถุดิบที่กล่าวมานั้นมีปริมาณจำกัดและสร้างขึ้นมาทดแทนใหม่ได้ยาก จึงทำให้ราคาของวัตถุดิบมีราคาสูงมากขึ้นเรื่อยๆ รวมถึงอาจจะหมดไปในอนาคตอันใกล้นี้ นอกจากนี้การเผาไหม้ของพลังงานจากซากดึกดำบรรพ์ยังก่อให้เกิดมลพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอีกด้วย [1]

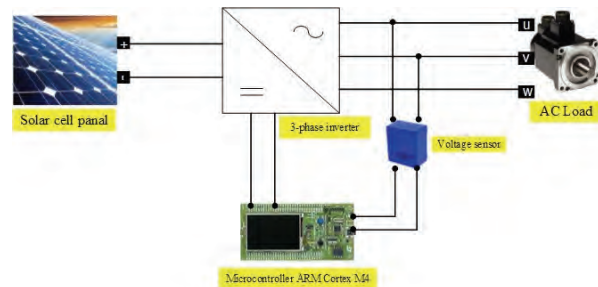
เพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมานักวิทยาศาสตร์จึงได้คิดค้นการนำแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วไม่มีวันหมดหรือใช้แล้วสามารถกลับมาเติมเต็มได้ใหม่ตามธรรมชาติ (Renewable) ซึ่งเรียกกลุ่มพลังงานชนิดนี้ว่าพลังงานทดแทน (Renewable Energy) เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) พลังงานลม (Wind Energy) พลังงานจากชีวมวล (Biomass Energy) มาทดแทนพลังงานจากซากทับถมดึกดำบรรพ์ [2], [3], [4]

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่เกิดจากสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ ปัจจุบันนิยมใช้กันมากและหาซื้อได้ง่าย เมื่อได้รับแสงจากดวงอาทิตย์หรือแสงจากหลอดไฟ เซลล์แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งยังไม่สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าตามบ้านหรือโรงงานต่างๆ ได้โดยตรง แต่จำเป็นต้องแปลงระดับแรงดันและชนิดของไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดเหมาะสมเสียก่อนจึงจะสามารถใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไปได้ โดยการแปลงจะใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC-to-AC Inverter) และในกรณีในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการเข้าร่วมโครงการ Solar Roof Top อาจมีความต้องการนำพลังงานไฟฟ้าไปต่อกับโหลดชนิดสามเฟสหรือใช้ต่อกับระบบส่งจ่ายชนิดสามเฟส ทำให้มีความจำเป็นที่ต้องทำการแปลงไฟฟ้าที่ได้ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดสามเฟส [5], [6], [7]

อย่างไรก็ดีอินเวอร์เตอร์สำหรับใช้ต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์จะมีคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่แตกต่างจากอินเวอร์เตอร์ทั่วไปซึ่งก็คือความสามารถในการรักษาระดับแรงดันขาออกให้คงที่แม้แรงดันขาเข้าจะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่ค่อนข้างกว้างงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการสร้างอินเวอร์เตอร์ราคาประหยัดสำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดสามเฟสและการควบคุมสำหรับใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาต่อไป

2. ระบบของ อินเวอร์เตอร์สามเฟส สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.1 โครงสร้างของระบบ อินเวอร์เตอร์สามเฟส สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์



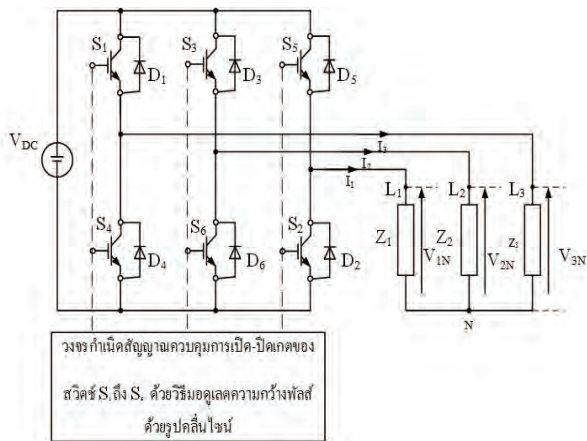
ภาพที่ 1 นำเสนอระบบ อินเวอร์เตอร์สามเฟส สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีวงจรรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ สามเฟส ให้มีค่าคงที่

โดยทั่วไปกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงวันจะมีค่าไม่เท่ากัน การเปลี่ยนแปลงของแรงดันจะขึ้นอยู่กับโหลดที่ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และปริมาณแสงแดดที่ได้รับ กรณีที่ต้องการป้อนกระแสไฟฟ้ากลับเข้าระบบส่งจ่ายของการไฟฟ้า หรือทำการเก็บไว้ในแหล่งเก็บพลังงานเช่นแบตเตอรี่เราสามารถทำได้โดยการจัดระบบให้จ่ายกำลังที่ค่าสูงสุดเสมอ แต่ในกรณีที่น่าไปต่อใช้กับโหลดทั่วไปการควบคุมจะมุ่งเน้นที่การรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่

ในการสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้มีแรงดันเอาต์พุตคงที่ได้นั้นจำเป็นจะต้องจัดวงจรให้เป็นระบบป้อนกลับซึ่งมีการตรวจวัดและส่วนควบคุมดังภาพที่ 1 ซึ่งรายละเอียดแต่ละส่วนจะถูกกล่าวถึงในลำดับถัดไป

2.2 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส และวงจรขับนำเกต

ส่วนประกอบที่สำคัญของอินเวอร์เตอร์สามเฟส คือส่วนสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ส่วนเซ็นเซอร์และระบบควบคุม ส่วนวงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะประกอบด้วยสวิตช์ 6 ตัว คือ สวิตช์ S_1 และ S_4 ต่ออยู่กับเอาต์พุตเฟสที่ 1 (L_1) สวิตช์ S_3 และ S_6 ต่ออยู่กับเอาต์พุตของเฟสที่ 2 (L_2) และสวิตช์ S_2 และ S_5 ต่อกับเอาต์พุตเฟสที่ 3 (L_3) ดังภาพที่ 2



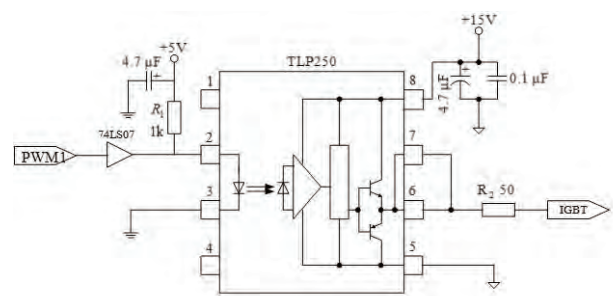
ภาพที่ 2 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยคลื่นไซน์

สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นิยมนำมาใช้ในงานประเภทนี้คือ ไอจีบีที โดยข้อดีของไอจีบีทีคือมีขาควบคุมแบบมอสเฟต และมีขาจ่ายกำลังแบบทรานซิสเตอร์ทำให้มีความสะดวกในการสร้างวงจรขับนำและสามารถจ่ายกำลังได้สูงกว่ามอสเฟต

การควบคุม ไอจีบีทีให้นำกระแสหรือหยุดนำกระแสสามารถทำได้โดยควบคุมแรงดันที่ตกคร่อมขาเกตและขาอีมีเตอร์ ซึ่งการเปลี่ยนสถานะในแต่ละครั้งจะมีการใช้กระแสจำนวนหนึ่งในการประจุหรือคายประจุตัวเก็บประจุแฝงที่อยู่ภายใน ไอจีบีที รวมถึงการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันที่ขาอีมีเตอร์ของ ไอจีบีที S_1 , S_3 และ S_5 ตามจังหวะการสวิตช์ทำให้ไม่สามารถต่อเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับขาเกตโดยตรงได้ และมีความจำเป็นต้องมีวงจรขับนำเกตที่เหมาะสมระหว่างเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์และขาเกตของ ไอจีบีที

วงจรขับนำเกตในงานนี้ใช้ ไอซีขับนำเกตเบอร์ TLP250 ซึ่งเป็น ไอซีขับนำเกตของบริษัทโตชิบาที่ได้ถูกออกแบบมา

สำหรับขับนำเกตของ ไอจีบีทีและมอสเฟตกำลัง ลักษณะโดยรวมเป็นวงจรสำเร็จรูปอยู่ในชิปเดียว ไอซี TLP250 นอกจากทำหน้าที่ขับเกตแล้วยังช่วยในเรื่องของการแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างฝั่งอินพุตและเอาต์พุตด้วยออปโตคัปเปอร์ ซึ่งอยู่ภายในตัว ไอซีทำให้ช่วยลดปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวน และระดับแรงดันที่แตกต่างกัน อีกทั้ง TLP250 ยังสามารถทำงานในย่านความถี่สูงได้

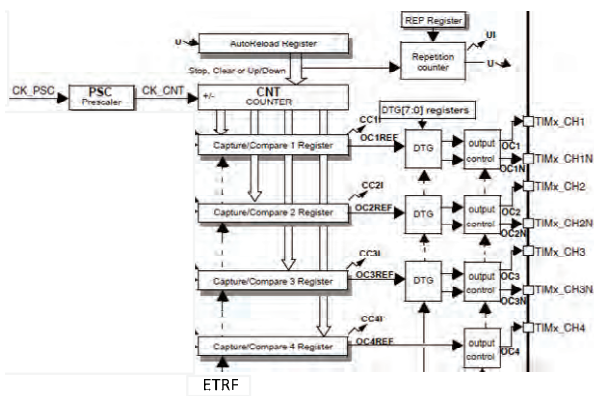


ภาพที่ 3 วงจรขับนำเกตด้วยไอซี TLP250

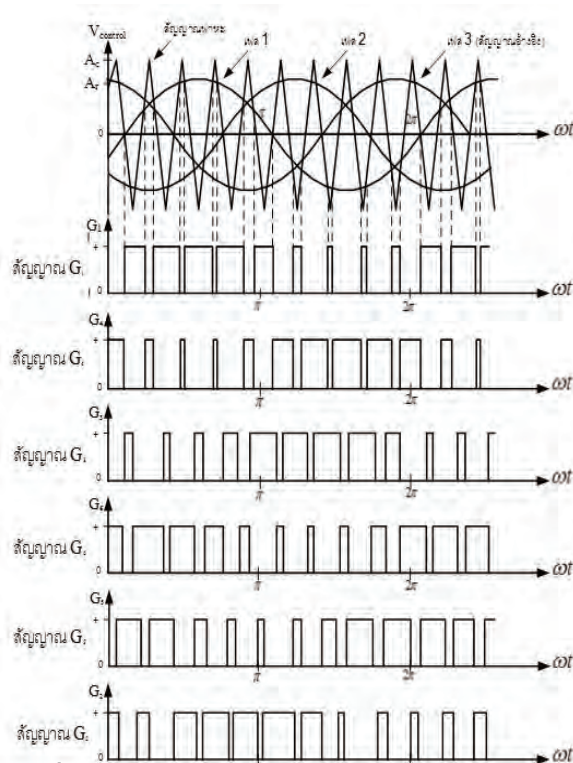
ในส่วนของการควบคุมการทำงานจะทำโดยผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F429 ซึ่งอยู่บนบอร์ดสำเร็จรูปดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้นี้มีประสิทธิภาพสูงกินพลังงานต่ำโดยภายในจะมีภาคแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) และไทม์เมอร์สำหรับสร้างสัญญาณ PWM ไว้ให้ใช้งานโดยสะดวก โค้ดแแกรมของไทม์เมอร์เฉพาะส่วนที่ใช้ในงานนี้แสดงไว้ในภาพที่ 5



ภาพที่ 4 บอร์ด STM32F4Discovery



ภาพที่ 5 Timer1 ใน STM32F429



ภาพที่ 6 การมอดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยคลื่นไซน์ สำหรับอินเวอร์เตอร์สามเฟส

ในการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์จะทำได้โดยการมอดูเลตความกว้างพัลส์ด้วยคลื่นไซน์ (SPWM) โดยกรณีอินเวอร์เตอร์สามเฟส ต้องใช้คลื่นไซน์ 3 สัญญาณที่แต่ละสัญญาณมีเฟสต่างกัน $\frac{2\pi}{3}$ เรเดียน เป็นสัญญาณอ้างอิง และสัญญาณพาหะซึ่งเป็นคลื่นสามเหลี่ยม การเปรียบเทียบของคลื่นไซน์ของเฟส 1 กับสัญญาณพาหะจะทำให้เกิดสัญญาณควบคุมเกตไอจีบีทีตัวที่ 1 และ 4 (G_1, G_4) ของวงจรอินเวอร์เตอร์ในทำนองเดียวกันคลื่นไซน์ของสัญญาณอ้างอิงเฟส 2 เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณ

พาหะจะทำให้เกิดสัญญาณควบคุมเกตไอจีบีทีตัวที่ 3 และ 6 (G_3, G_6) และคลื่นไซน์ของสัญญาณอ้างอิงเฟส 3 เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณพาหะจะทำให้เกิดสัญญาณควบคุมเกตไอจีบีทีตัวที่ 5 และ 2 (G_5, G_2) ของวงจรในภาพที่ 2 ตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 6

2.3 การควบคุมแรงดันเอาต์พุต

การเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์สามเฟส เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ลงในไมโครคอนโทรลเลอร์และใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับการควบคุมแบบบูรณาการ (PI Controller) ซึ่งสมการควบคุมเขียนได้โดย

$$M_n = K_p (e_n - e_{n-1}) + T_s K_i (e_n - e_{n-1}) + M_{n-1} \quad (1)$$

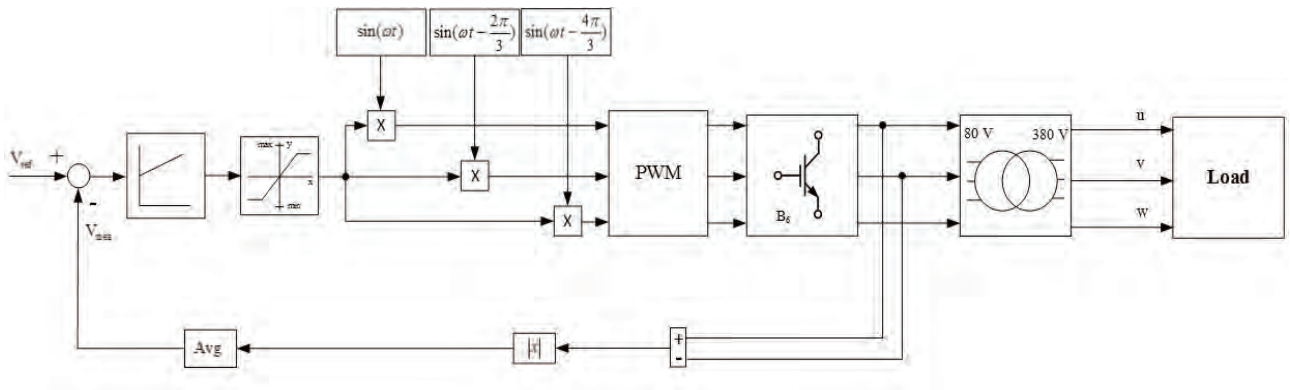
เมื่อกำหนดให้

- M คือสัญญาณคำสั่ง
- e_n คือค่าผิดพลาดของเอาต์พุตจากค่าอ้างอิง
- K_p คืออัตราขยายแบบสัดส่วน
- K_i คืออัตราขยายแบบบูรณาการ
- T_s คือคาบเวลา sampling period

2.3 การควบคุมระบบอินเวอร์เตอร์ สามเฟส สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากภาพที่ 7 แสดงระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์คงที่ 80 V

หลักการทำงาน จากภาพที่ 7 วัดแรงดัน V_{uv} ผ่านวงจรเรียงกระแสและวงจรลดทอนเพื่อลดระดับแรงดันโดยให้ค่าเอาต์พุตที่ต้องการก่อนเข้าห้อมแปลงซึ่งมีค่าเท่ากับ 80 V ถูกลดทอนให้มีค่าเท่ากับ 1 V เพื่อเป็นสัญญาณป้อนกลับไปเข้าภาค ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์และเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันอ้างอิงซึ่งกำหนดไว้ภายในซอฟต์แวร์ เมื่อได้ค่าความผิดพลาดส่งไปยังตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับการควบคุมแบบบูรณาการ เพื่อปรับค่าความผิดพลาด แล้วนำสัญญาณควบคุมไปคูณกับสัญญาณรูปไซน์ซอซอดอล์อ้างอิงสาม



ภาพที่ 7 ระบบควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟส

เฟส ที่มีมุมต่างกัน $\frac{2\pi}{3}$ เรเดียน จะได้สัญญาณควบคุมการมอดูเลตขึ้นแบบ Sinusoidal Pulse width modulation (SPWM) เมื่อได้สัญญาณ SPWM จำนวน 3 ชุดที่มี dead-time $2 \mu\text{s}$ เพื่อไปขับสวิตช์ที่ขาเกตของ IGBT ให้ได้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าคงที่ 80 V

3. ผลการทดลอง

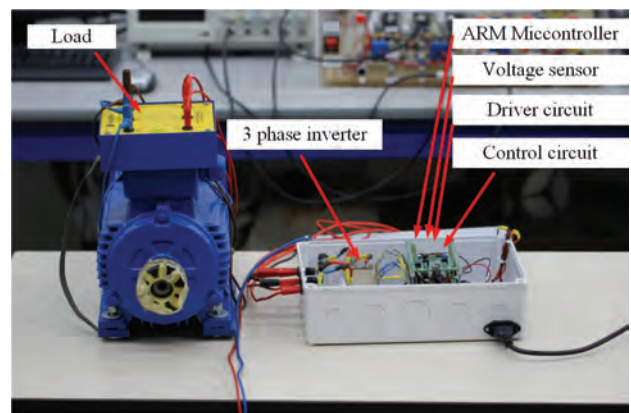
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีใช้ในศูนย์วิจัยพลังงานทดแทนมีขนาด 1.2 kW 150 V ดังภาพที่ 8 และอินเวอร์เตอร์สามเฟสสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สร้างขึ้นแสดงในภาพที่ 9 การทดลองอินเวอร์เตอร์ สามเฟสโดยการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจำลองเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้วปรับ V_{DC} ให้มีค่าเท่ากับ 100 V ทำให้แรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ (V_{uv}) มีค่าเท่ากับ 80 V ดังภาพที่ 10

เพื่อเป็นการทดสอบการรักษาระดับแรงดันจึงทำการทดลองเปลี่ยน V_{DC} จาก 150V เป็น 200 V จะเห็นว่า V_{uv} มีค่าคงที่เท่ากับ 80 V ดังภาพที่ 11

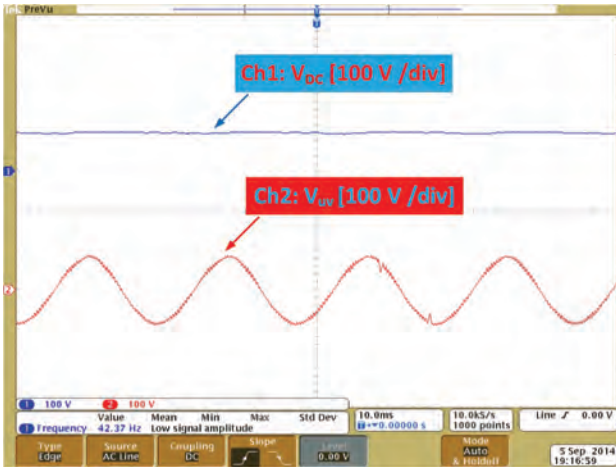
จากนั้นทำการทดสอบเปลี่ยน V_{DC} จาก 200 V เป็น 100V จะเห็นว่า V_{uv} ก็ยังมีค่าคงที่เท่ากับ 80 V ดังภาพที่ 12



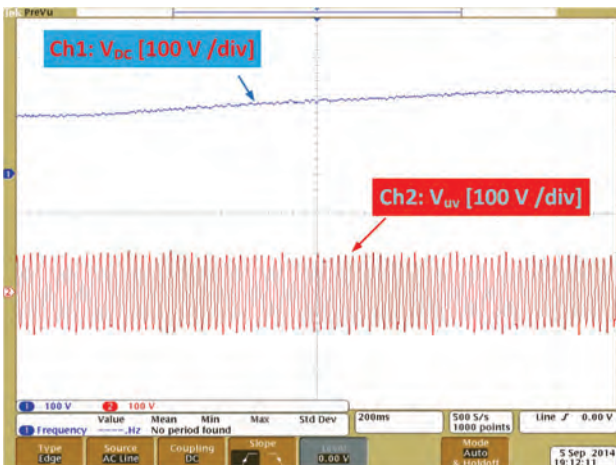
ภาพที่ 8 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 1.2 kW 150 V



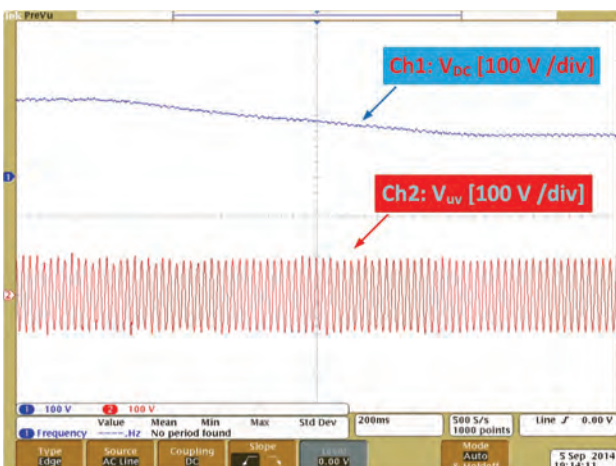
ภาพที่ 9 ระบบอินเวอร์เตอร์สามเฟส



ภาพที่ 10 แรงดันอินเอาต์พุต V_{uv} 80 V ที่แรงดัน V_{DC} คงที่ 100 V



ภาพที่ 11 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อแรงดันขาเข้าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 12 รูปคลื่นแรงดันขาออกเมื่อแรงดันขาเข้าลดลง

4. สรุป

การควบคุมอินเวอร์เตอร์ สามเฟสสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการควบคุมเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ ให้มีค่าแรงดันเอาต์พุตคงที่ 80 V โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F429 เป็นตัวควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ สามเฟส จากการทดลองพบว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ให้คงที่ แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันนวัตกรรมไทย-ฝรั่งเศส มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Thounthong, B. Davat, and S. Raël, "Drive friendly," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 6, no. 1, pp. 69–76, Jan./Feb. 2008.
- [2] A. F. Burke, "Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 806–820, April 2007.
- [3] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, B. Davat, and M. Hinaje, "Comparative Study of Fuel-Cell Vehicle Hybridization with Battery or Supercapacitor Storage Device," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.58, no. 8, pp. 3892–3904, Oct. 2009.
- [4] J. Bauman and M. Kazerani, "A comparative study of fuel-cell–battery, fuel-cell–ultracapacitor, and fuel-cell–battery–ultracapacitor," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 2, pp. 760–769, March 2008.
- [5] Zitao Wang, and Liuchen Chang, "A DC Voltage Monitoring and Control Method for Three-Phase Grid-Connected Wind Turbine Inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 3, pp. 1118–1125, May. 2008.
- [6] A. Houari, H. Renuadineau, J-P. Martin, S. Pierfederici, and F. Meibody-Tabar, "Flatness-Based Control of Three-Phase Inverter With Output LC Filter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.59, no.7, pp. 2890–2897, Jul. 2012.
- [7] Behrooz Mirafzal, Mahdi Saghaleini, and Ali Kashefi Kaviani, "An SVPWM-Based Switching Pattern for Stand-Alone and Grid-Connected Three-Phase Single-Stage Boost Inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 4, pp. 1102–1111, Apr. 2011.