



อินเวอร์เตอร์สำหรับระบบปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด

HYBRID SOLAR PUMP INVERTER

ชูเกียรติ นิธิโยธาน¹, ศุภโชค เตชะอุดมถาวร¹, อัมรินทร์ แยมพรายวงศ์¹, ภาณุวัฒน์ จันทร์บำรุง^{1*} และ เพ็ญภา ไพโรจน์อมรชัย¹

¹วิศวกรรมฝ่ายวิจัยและพัฒนา, บริษัท เอ.พี.เอนจิเนียริง จำกัด

*Corresponding author, E-Mail: rd@apyeng.com

บทคัดย่อ

บทความนี้จะนำเสนอการออกแบบอินเวอร์เตอร์สำหรับปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เพื่อทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้า ระบบปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดเป็นระบบที่รับพลังงานได้ทั้งจากพลังงานไฟฟ้าและพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบดังกล่าวจึงสามารถใช้ในพื้นที่ที่ไฟฟ้าเข้าไม่ถึง เช่น ในไร่สวนหรือพื้นที่ห่างไกลได้ และในกรณีที่ใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ปั๊มน้ำสามารถทำงานได้ตลอดเวลาตามที่ต้องการ โดยช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลง และหากเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ ปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดสามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์ทำงานต่อเนื่องได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของปั๊ม อินเวอร์เตอร์สำหรับปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดที่ออกแบบ ผู้วิจัยได้พัฒนาให้สามารถใช้งานกับปั๊มน้ำชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส และ 3 เฟส โดยมีฟังก์ชันการทำงานที่สำคัญเพื่อให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ ได้แก่ การตรวจหาจุดกำลังสูงสุดของแผงโซลาร์เซลล์ (MPPT) การควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PFC) สำหรับกระแสค่านเข้า นอกจากนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนโหมดการใช้พลังงานได้ 3 โหมดตามความเหมาะสม ได้แก่ โหมดกริด (Grid Mode) ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว, โหมดไฮบริด (Hybrid Mode) ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกัน และโหมดอิสระ (Stand-Alone Mode) ที่ใช้พลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์; แผงโซลาร์เซลล์; โหมดกริด; โหมดไฮบริด; โหมดอิสระ

ABSTRACT

This paper presents the design of a hybrid solar water pump inverter which is an alternative for the use of solar energy as a substitute for electric power. The hybrid solar water pump inverter is a system that uses both electricity and solar energy. Therefore, this system can be used in areas where electricity is not accessible, such as in a farm, garden, or remote area. And in the case of using of electric energy and solar energy together, the hybrid solar water pump inverter can be work all the time as needed and reduce electricity consumption. In the event of a power failure, the hybrid solar water pump can use the solar energy and run continuously without stopping the pump. The designed hybrid solar water pump is developed to be compatible both with 1-phase and 3-phase induction motor pump. It has important functions for using efficiently including Maximum Power Point Tracking (MPPT) for solar panel and Power Factor Correction (PFC) for AC input current. In addition, three power modes can be adjusted as appropriate: Grid mode that uses electricity only, Hybrid mode that uses electricity and solar energy together, and Stand-Alone mode that uses solar energy only.

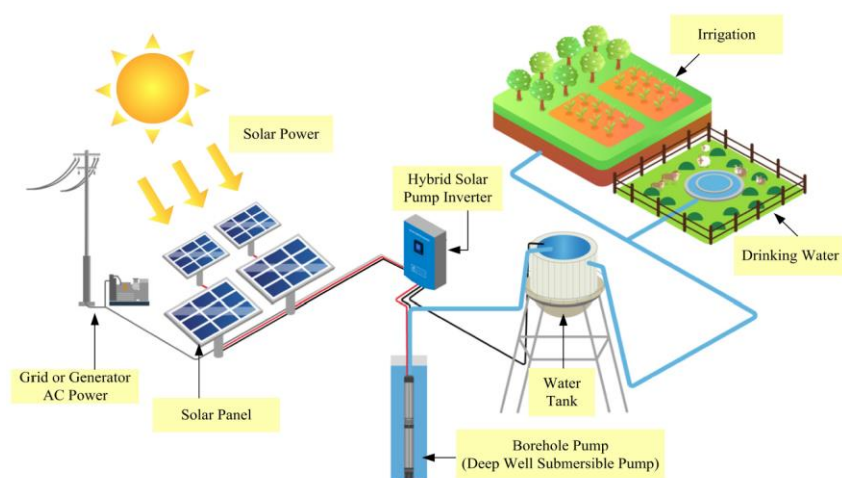
KEYWORDS: Inverter; Solar Cell; Grid Mode; Hybrid Mode; Stand-Alone Mode

Chukait Nitayotan¹, Supachoke Techadomtaworn¹, Aummarin Yampraywong¹, Panuwat Janbamroong^{1*} and Pennapa Pirodamonchai¹

¹R&D Engineer, A.P.Y. Engineering CO., LTD, Thailand.

1. บทนำ

ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ติดตั้งได้ง่าย และต้องการการบำรุงรักษาน้อย บทบาทการใช้ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องจากประเทศไทยมีภูมิอากาศที่เหมาะสม ผลการตรวจวัดข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทย ปีพ.ศ. 2563 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $4.807 \text{ kWh/m}^2\text{-day}$ [1] การใช้พลังงานแสงอาทิตย์สำหรับระบบชลประทานในภาคการเกษตรกลายเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ดังจะเห็นได้ว่ามีงานวิจัยหลายบทความแสดงถึงความเป็นไปได้ของการใช้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ขับเคลื่อนปั้มน้ำและเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการใช้พลังงานแบบอื่นๆ [2- 5] เสนอการออกแบบระบบสำหรับปั้มน้ำชนิดมอเตอร์กระแสตรง และ [6] เสนอการออกแบบระบบสำหรับปั้มน้ำชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส อย่างไรก็ตามการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวอาจมีข้อจำกัดในการใช้งาน เช่น ในขณะฝนตกหรือตอนกลางคืน การออกแบบให้ปั้มน้ำสามารถรับพลังงานได้ทั้งจากแหล่งจ่ายไฟและแสงอาทิตย์จะช่วยลดข้อจำกัดนี้ได้ [7] ที่เสนอการออกแบบระบบปั้มน้ำเชื่อมต่อกริดแบบ 3 เฟส อย่างไรก็ตามเพื่อให้สอดคล้องกับระบบกริดของประเทศไทยที่ส่วนใหญ่เป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส และปั้มน้ำที่นิยมใช้ก็มีหลากหลายชนิด บทความนี้จะนำเสนออินเวอร์เตอร์สำหรับปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด ซึ่งรับพลังงานได้จาก 2 แหล่งได้แก่ พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟและพลังงานแสงอาทิตย์จากแผงโซลาร์เซลล์ กรณีที่ใช้พลังงานจากทั้ง 2 แหล่งพร้อมกัน ตัวอินเวอร์เตอร์จะดึงพลังงานจากแสงอาทิตย์ก่อนเป็นลำดับแรก โดยใช้อัลกอริทึมการตรวจหาจุดกำลังงานสูงสุด (MPPT) [8] มาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยดึงพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตามถ้าพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อการจ่ายโหลดปั้มน้ำขณะนั้น อินเวอร์เตอร์จะดึงพลังงานจากกริดเข้ามาเสริม ทำให้ช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าลง เป็นการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ผู้วิจัยได้พัฒนาอินเวอร์เตอร์สำหรับปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ที่ออกแบบสามารถใช้งานกับปั้มน้ำชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำรุ่น 220V 1 เฟส และ 3 เฟส ซึ่งมีใช้อยู่ในปั้มน้ำหลากหลายประเภทได้แก่ ปั้มน้ำหอยโข่ง (Centrifugal Pump), ปั้มน้ำบาดาล (Submersible Borehole Pump) นอกจากนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนโหมดการใช้พลังงานได้ 3 โหมดตามความเหมาะสมได้แก่ 1) โหมดกริด (Grid mode) ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ทำให้สามารถใช้งานในช่วงไม่มีแสงอาทิตย์ได้ 2) โหมดไฮบริด (Hybrid mode) ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกัน สำหรับให้ปั้มน้ำทำงานต่อเนื่องแบบประหยัดพลังงาน และ 3) โหมดอิสระ (Stand Alone mode) สำหรับพื้นที่ห่างไกลที่ไม่มีไฟฟ้าใช้



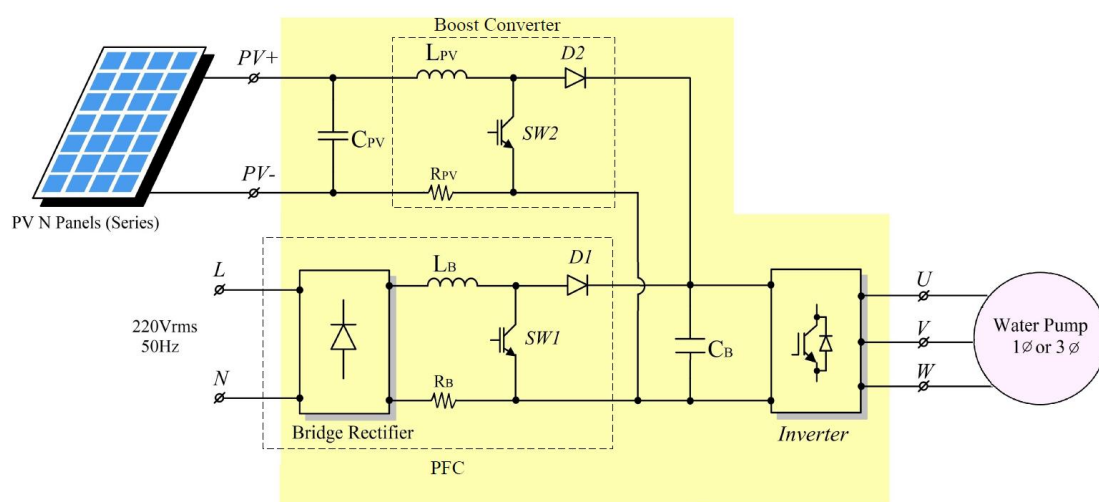
รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบปั้มน้ำบาดาลที่ใช้ปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด

2. ระบบปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด

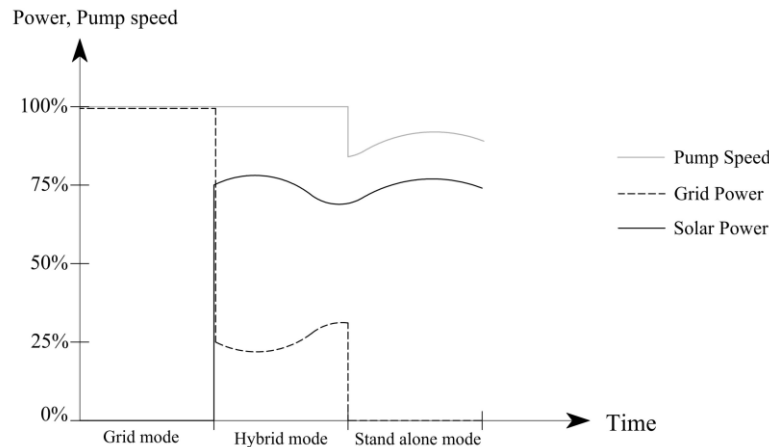
ระบบปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดดังรูปที่ 1 เป็นการใช้อินเวอร์เตอร์ไฮบริดสำหรับขับเคลื่อนปั๊มน้ำเข้ามาเก็บสะสมที่แท็งก์น้ำเพื่อใช้ในการเกษตรทั้งการเพาะปลูกและเลี้ยงสัตว์ แหล่งพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนปั๊มน้ำรับจากทั้งพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้า โดยแผงโซลาร์เซลล์เป็นตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์และเปลี่ยนให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และมีการเชื่อมต่อกรีดเพื่อรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220Vrms 50Hz แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายจากแหล่งพลังงานทั้ง 2 แหล่งที่แตกต่างกันทั้งชนิดและขนาดจะมีการเชื่อมต่อกันภายในเครื่องอินเวอร์เตอร์ไฮบริดสำหรับขับเคลื่อนปั๊มน้ำ

อินเวอร์เตอร์สำหรับปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด มีโครงสร้างภายในดังรูปที่ 2 จะเห็นว่าวงจรส่วนรับพลังงานไฟฟ้าและวงจรส่วนรับพลังงานแสงอาทิตย์จะเชื่อมต่อกันที่บัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ วงจรทั้ง 2 ส่วนเป็นวงจรที่แยกอิสระต่อกัน ทำให้กรณีใช้พลังงานจากทั้ง 2 แหล่งแต่ละวงจรสามารถทำงานได้อย่างอิสระเต็มประสิทธิภาพ ในส่วนรับพลังงานไฟฟ้าจะรับไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 220Vrms 50Hz ผ่านวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง (PFC) ทำให้สามารถควบคุมตัวประกอบกำลังด้านเข้าให้มีค่าใกล้เคียง 1 ในส่วนรับพลังงานแสงอาทิตย์จะผ่านวงจรทบทระดับ (Boost Converter) เพื่อดึงพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ไปรวมกับพลังงานจากกริดที่บัสไฟตรงโดยใช้อัลกอริทึมการตรวจหาจุดกำลังงานสูงสุดจากแผงโซลาร์เซลล์ (MPPT) หลังจากนั้นภาคอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟตรงให้เป็นแรงดันไฟสลับความถี่ต่างๆ เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ปั๊มน้ำ จุดเด่นของอินเวอร์เตอร์สำหรับปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดนี้คือ แม้จะมีการเชื่อมต่อกรีดแต่จะไม่กระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า เนื่องจากสามารถป้องกันการไหลย้อนกลับของพลังงานจากแสงอาทิตย์ไปที่กริดได้ จากโครงสร้างของวงจรแก้ไขตัวประกอบกำลัง PFC ที่จะบังคับให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียว

ดังที่ได้กล่าวไว้อินเวอร์เตอร์แบบไฮบริดสามารถทำงานได้ 3 โหมด ถ้าการทำงานอยู่ในโหมดกริดหรือโหมดไฮบริด ปั๊มน้ำจะสามารถทำงานได้เต็มพิกัด 100% ตามความต้องการของผู้ใช้งาน ส่วนโหมดอิสระที่มีเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ ความเร็วของปั๊มน้ำจะถูกจำกัดให้แปรผันตามพลังงานแสงอาทิตย์ในขณะนั้นๆ ดังรูปที่ 3 การออกแบบฟังก์ชันการควบคุมที่สำคัญของโหมดต่างๆ จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์สำหรับปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด



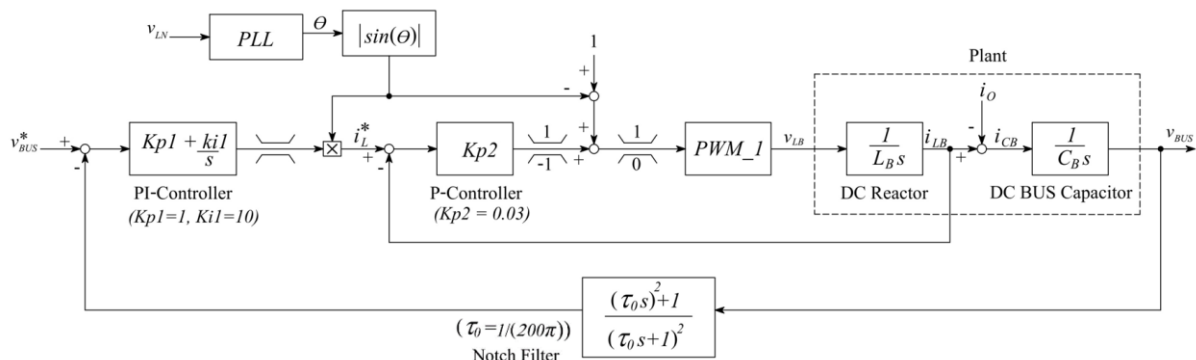
รูปที่ 3 ไดอะแกรมการเปลี่ยนแปลงของความเร็วปั้มน้ำในแต่ละโหมดการทำงาน

3. โหมดกริด (Grid mode) ที่ใช้พลังงานจากกริดเพียงอย่างเดียว

ในโหมดนี้มีฟังก์ชันการทำงานที่สำคัญ คือ การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้มีค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึงกระแสด้านเข้าต้องมีรูปคลื่นใกล้เคียงสัญญาณไซน์และมีเฟสตรงกับแรงดันกริด เราจะใช้วิธีควบคุมการสวิตช์ของ SW1 ในวงจร PFC ดังรูปที่ 2 โดยจะทำการควบคุมขนาดกระแสด้านเข้าผ่านลูปควบคุมแรงดันบัสไฟตรง และควบคุมมุมเฟสของกระแสด้านเข้าจากการทำเฟสล็อก (PLL) กับแรงดันกริด (v_{LN}) ดังบล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมในรูปที่ 4

ในการควบคุมแรงดันบัสไฟตรง เพื่อให้ค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวเป็นศูนย์ เราได้เลือกใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI-controller) $K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s}$ โดยสัญญาณแรงดันบัสไฟตรงที่ป้อนกลับจะผ่านวงจรกรองเฉพาะช่วงความถี่ (Notch filter) $\frac{(\tau_0 s)^2 + 1}{(\tau_0 s + 1)^2}$ เพื่อกรองระลอกแรงดันบัสไฟตรงที่ความถี่ 100Hz กระแสคำสั่งสำหรับควบคุม i_L^* ที่ด้านออกของตัวควบคุมพีไอและกระแสป้อนกลับ i_{LB} ซึ่งได้จากการตรวจจับจากตำแหน่ง R_B จะเป็นค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณไซน์ $|\sin \theta|$ โดยมุม θ ได้จากการทำเฟสล็อกกับแรงดันด้านเข้า v_{LN} ในลูปควบคุมกระแสเราเลือกใช้ตัวควบคุมพี (P-Controller) K_{p2} ร่วมกับการป้อนไปหน้า (Feedforward) สัญญาณ $(1 - |\sin \theta|)$ เพื่อใช้สร้างสัญญาณ PWM ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (1)

$$d(t) = 1 - \frac{V_{LN} |\sin \theta|}{V_{BUS}}, \quad V_{LN} = \text{ขนาดของแรงดันด้านเข้า} \quad (1)$$



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมลูปควบคุมกระแสด้านเข้าและแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ในการควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง (PFC)

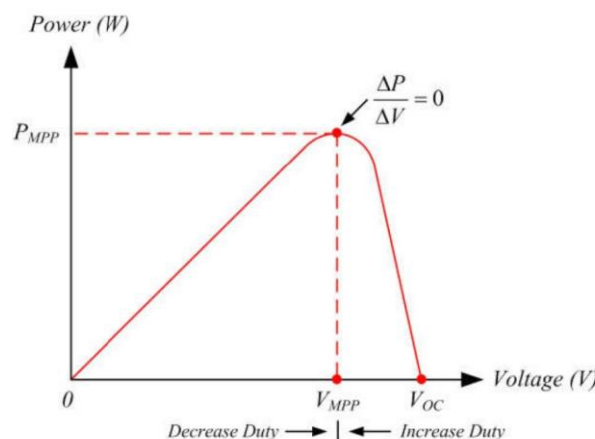
การออกแบบอินเวอร์เตอร์สำหรับปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด ขนาดพิกัด 3 Hp มีพารามิเตอร์ของวงจรส่วน PFC ดังนี้ตัวเหนี่ยวนำ $L_B = 5\text{mH}$, ตัวเก็บประจุสัฟไฟตรง $C_B = 1880\mu\text{F}$ และความถี่การสวิตช์ $f_{sw} = 10\text{kHz}$ ตัวควบคุม $K_{p1} = 0.8$, $K_{i1} = 8$ และ $K_{p2} = 0.03$ การทำงานของรูปควบคุมกระแสและรูปควบคุมแรงดันบัฟไฟตรงจะคำนวณทุกๆ 250 μs กำหนดค่าตั้งแรงดันบัฟไฟที่ $V_{BUS}^* = 350\text{V}$ กรณีใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และ $V_{BUS}^* = 400\text{V}$ กรณีใช้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส (เพื่อให้เพียงพอในการสร้างแรงดันด้านออกที่มีความต่างเฟส 90°)

4. โหมดไฮบริด (Hybrid mode) ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์

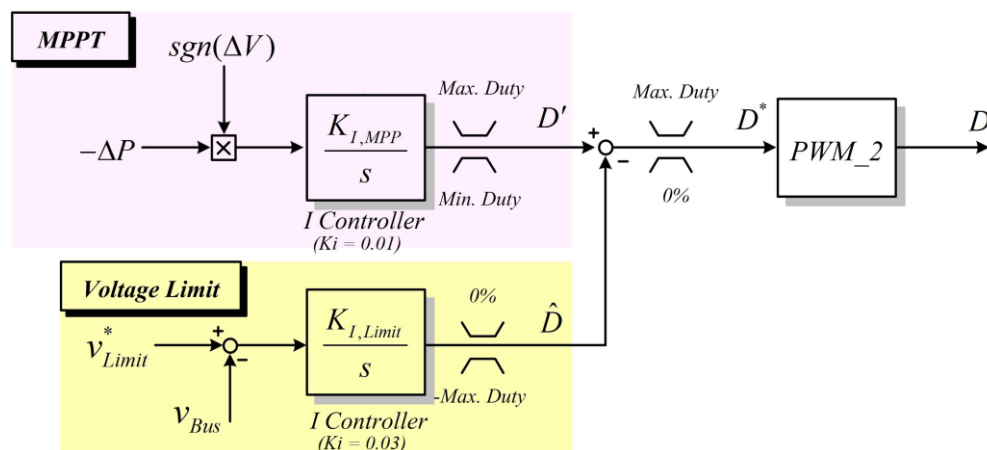
ฟังก์ชันการทำงานที่สำคัญในโหมดนี้ได้แก่ การควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และการตรวจหาจุดทำงานสูงสุดของแผงโซลาร์เซลล์ (Maximum Power Point Tracking) หรือ MPPT ทั้ง 2 โหมดจะทำงานประสานกันเพื่อให้สามารถจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดตลอดเวลา โดยลำดับแรกอินเวอร์เตอร์จะดึงพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์มาใช้ให้มากที่สุดก่อนตามวิธีการ MPPT หากพลังงานไม่พอจะดึงจากกริดเข้ามาเสริมทำให้ช่วยประหยัดค่าไฟลงโดยปั้มน้ำยังสามารถทำงานได้เต็มพิกัด และหากพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าโหลดของปั้มน้ำ อินเวอร์เตอร์สำหรับระบบปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดจะออกจากจุดกำลังงานสูงสุดของแผงโซลาร์เซลล์ไปยังจุดสมดุลของพลังงานใหม่โดยอัตโนมัติและหยุดดึงพลังงานจากกริด

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการตรวจหาจุดทำงานสูงสุดของแผงโซลาร์เซลล์ MPPT ฟังก์ชันดังกล่าวควบคุมโดยอาศัยการปรับความกว้างพัลส์ D ของสวิตช์ SW2 (ในวงจรทบทระดับรูปที่ 2) โดยพิจารณาจากค่าอนุพันธ์ของกำลังเทียบกับแรงดันของแผงโซลาร์เซลล์ $\Delta P / \Delta V$ ดังรูปที่ 5 เมื่อ P_{MPP} คือ ค่ากำลังสูงสุดของแผงโซลาร์เซลล์ V_{MPP} คือแรงดันที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด และ V_{OC} คือแรงดันที่แผงโซลาร์เซลล์จะเปิดวงจร จะเห็นว่ากำลังสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อ $\Delta P / \Delta V = 0$ ในการทำ MPPT หากตรวจพบค่า $\Delta P / \Delta V > 0$ แสดงว่าจุดทำงานอยู่ด้านซ้ายของจุดกำลังงานสูงสุด ให้ปรับลดความกว้างพัลส์ D ลง แรงดันและกำลังงานของแผงโซลาร์เซลล์จะเพิ่มขึ้น หากตรวจพบค่า $\Delta P / \Delta V < 0$ แสดงว่าจุดทำงานอยู่ด้านขวาของจุดกำลังงานสูงสุดให้ปรับเพิ่มความกว้างพัลส์ขึ้น แรงดันจะลดลงแต่กำลังงานจะสูงขึ้น การปรับค่า D จะเกิดขึ้นจนกว่าจะพบค่า $\Delta P / \Delta V = 0$ แสดงว่าระบบอยู่ที่จุดกำลังงานสูงสุดแล้ว ซึ่งค่าความกว้างพัลส์ที่ตรวจหาได้คือค่าความกว้างพัลส์ที่ค่ากำลังงานสูงสุด D_{MPP} คำนวณได้ดังสมการที่ (2)

$$D_{MPP} = 1 - \frac{V_{MPP}}{V_{BUS}} \quad (2)$$



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมการทำ MPPT และการจำกัดค่าแรงดันบัสไฟตรงของวงจรส่วนรับพลังงานแสงอาทิตย์ บุสคอนเวอร์เตอร์

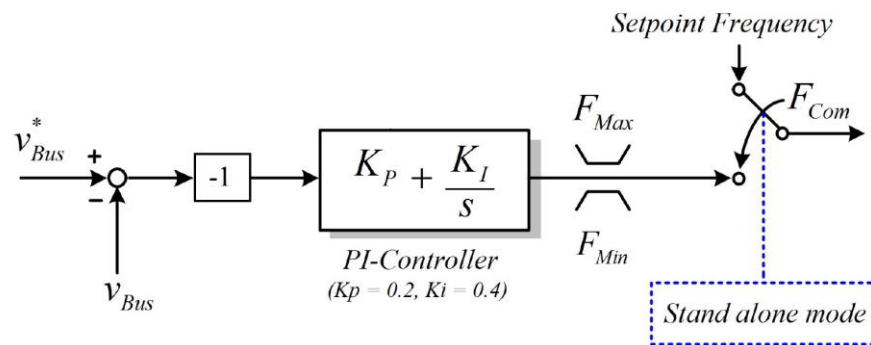
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวควบคุมอินทิเกรเตอร์ (I-Controller) สำหรับหาค่าความกว้างพัลส์ D' ดังในรูปที่ 6 โดยควบคุมให้ $\Delta P / \Delta V = 0$ อย่างไรก็ตามเพื่อหลีกเลี่ยงตัวหารที่เป็นศูนย์เราจะคำนวณโดยใช้เครื่องหมาย $\text{sgn}(\Delta V)$ แทนการใช้ขนาด ΔV โดยตรง ดังนั้นเทอมความผิดพลาดก่อนเข้าตัวควบคุมจะอยู่ในรูป $\text{error} = -\text{sgn}(\Delta V) \cdot \Delta P$

ในกรณีที่พลังงานแสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าโหลดของปั้มน้ำ $P_{\text{SOLAR}} > P_{\text{LOAD}}$ การตรึงสถานะการทำงานของระบบที่จุดกำลังงานสูงสุดจะทำให้พลังงานส่วนเกินไหลเข้ามาชาร์จประจุที่ตัวเก็บประจุบัสไฟตรง C_B จนแรงดันบัสไฟตรงสูงเกินพิกัดได้ ดังนั้นระบบจำเป็นต้องออกจากจุดกำลังสูงสุดเพื่อลดค่า P_{SOLAR} ขึ้นตอนนี้เราออกแบบโดยอาศัยการจำกัดค่าแรงดันบัสไฟตรง (Voltage Limit) ในรูปที่ 6 โดยกำหนดให้ค่าแรงดันลิมิตสูงกว่าค่ากำลังแรงดันบัสไฟตรงเท่ากับ 25 V, $V_{\text{Limit}} = V_{\text{BUS}}^* + 25 \text{ V}$ ในรูปจำกัดค่าแรงดันบัสไฟตรงเราใช้ตัวควบคุมอินทิเกรเตอร์เช่นเดียวกัน กรณีที่แรงดันบัสไฟตรงมีค่าสูงกว่าลิมิต ตัวควบคุมจะสร้างสัญญาณมาหักลบกับความกว้างพัลส์ในส่วน MPPT เพื่อลดความกว้างพัลส์ลง จุดทำงานจะเลื่อนมาอยู่ด้านขวาของจุดกำลังงานสูงสุดในรูปแบบที่ 5 กรณีนี้จะไม่ดึงพลังงานจากกริดมาใช้เลย

5. โหมดอิสระ (Stand Alone mode) ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว

ในโหมดนี้มีฟังก์ชันการทำงานที่สำคัญได้แก่ การตรวจหาจุดทำงานสูงสุดของแผงโซลาร์เซลล์ (MPPT) (ซึ่งได้กล่าวไปในหัวข้อโหมดไฮบริด) และการควบคุมความเร็วรอบของปั้มน้ำให้สอดคล้องกับพลังงานแสงอาทิตย์ ในโหมดนี้พลังงานแสงอาทิตย์จะไม่คงที่แต่เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาและสภาพอากาศ เราจึงต้องควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์ให้เปลี่ยนตามพลังงานที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์

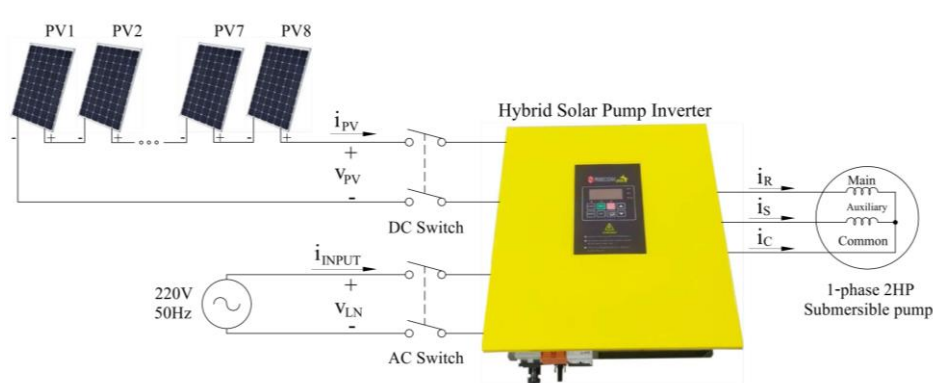
ในงานวิจัยนี้ออกแบบการควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์ด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI-Controller) ดังในรูปที่ 7 เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้น อัลกอริทึม MPPT จะส่งพลังงานเข้ามาชาร์จตัวเก็บประจุบัสไฟตรง C_B เพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันบัสไฟตรง V_{BUS} มีค่ามากกว่าค่าแรงดันคำสั่ง V_{BUS}^* ตัวควบคุมพีไอจะสั่งเพิ่มความถี่ของอินเวอร์เตอร์ (F_{Com}) ในสภาวะนี้ความเร็วรอบของปั้มน้ำจะสูงขึ้นและโหลดดึงพลังงานมากขึ้นทำให้เกิดการสมดุลของพลังงาน ในทางกลับกันเมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ลดลงตัวควบคุมพีไอจะปรับลดความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ความเร็วของปั้มน้ำก็จะลดลงตามค่าพลังงานแสงอาทิตย์ในขณะนั้น



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้าตรงในโหมดอิสระ

6. ผลการทดสอบ

ระบบสำหรับทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดแสดงดังรูปที่ 8 (ก) โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาด 320W จำนวน 8 แผงต่ออนุกรมกัน มีพิกัดแรงดันรวม $V_{OC} = 370V$, $V_{MPP} = 290V$ และกระแส $I_{MPP} = 8.6A$ ระบบกริดจากการไฟฟ้า 220Vrms 50Hz มีสวิตช์ควบคุมการเปิด-ปิดการรับพลังงานจากแหล่งจ่ายทั้ง 2 แหล่ง เพื่อจำลองสภาวะการทำงานในโหมดต่างๆ ได้แก่ โหมดกริด, โหมดไฮบริด และโหมดอิสระ ปั๊มน้ำที่ใช้ทดสอบเป็นปั๊มน้ำบาดาลชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส ขนาด 2HP ทำงานเต็มกำลังที่ความถี่ 50 Hz ต่อตรงเข้ากับอินเวอร์เตอร์แบบไม่มีคาปาซิเตอร์รัน (Capacitor Run) แต่ใช้วิธีการควบคุมให้กระแสที่ขดลวดช่วย (auxiliary winding) i_s มีเฟสหน้าน้ำกระแสที่ขดลวดหลัก (main winding) i_r เท่ากับ 90° เพื่อให้มอเตอร์มีแรงบิดสูง โหลดของปั๊มน้ำติดตั้งโดยให้ปั๊มน้ำสูบลบและปล่อยน้ำวนภายในถังถังขนาด 200 ลิตร ดังรูปที่ 8 (ข) ขณะทดสอบ ควบคุมอินเวอร์เตอร์สำหรับปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดให้มีแรงดันดันไฟฟ้าตรง $v_{BUS}^* = 400V$ ความถี่การสวิตช์ $f_{sw} = 4kHz$ ให้ผลการทดสอบขณะทำงานในโหมดต่าง ๆ ดังนี้



(ก) โครงสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด

(ข) ระบบโหลดปั๊มน้ำบาดาล

รูปที่ 8 โครงสร้างวงจรสำหรับการทดสอบอินเวอร์เตอร์ปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด และระบบโหลดปั๊มน้ำบาดาล

6.1 ผลการทดสอบการทำงานในโหมดกริด

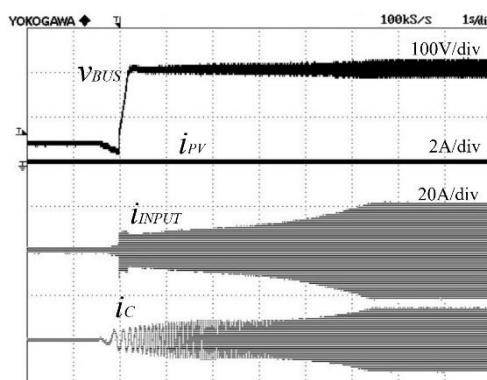
เมื่อเครื่องเริ่มทำงานในโหมดกริด อินเวอร์เตอร์ปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดจะเริ่มออกตัวจากความถี่ 0.5 Hz ไปยังความถี่คำสั่งด้วยอัตราการเร่งความเร็วที่กำหนดไว้ ซึ่งในการทดลองนี้เราใช้ค่าความถี่คำสั่ง 60 Hz อัตราการเร่ง 10 Hz/sec ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 9 (ก) จะเห็นว่ากระแสด้านเข้าจากกริด i_{input} และกระแสมอเตอร์ปั้มน้ำ i_c มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของปั้มน้ำที่เพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่เมื่อถึงความถี่ 60 Hz โดยในโหมดนี้กระแสจากแผงโซลาร์เซลล์ i_{pv} มีค่าเป็นศูนย์ ในส่วนของการควบคุมบัลไฟตรงพบว่าสามารถควบคุมแรงดันบัสให้มีค่าคงที่เท่ากับ 400 V ได้ภายในเวลา 200 msec หลังจากฟังก์ชัน PFC เริ่มทำงาน

เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) หากพิจารณาที่ด้านเข้าของระบบ (จุดเชื่อมต่อกริด) ฟังก์ชัน PFC สามารถควบคุมให้กระแสด้านเข้า i_{input} มีรูปคลื่นใกล้เคียงสัญญาณไซน์และมีเฟสตรงกับแรงดันกริด v_{LN} ดังรูปที่ 9 (ข) ดังนั้นที่ด้านเข้าของระบบจะมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเข้าใกล้ 1 และเมื่อพิจารณาที่โหลดมอเตอร์ปั้มน้ำ กระแสที่ขดลวดช่วย i_s และกระแสที่ขดลวดหลัก i_r มีเฟสต่างกัน 90° แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมให้มอเตอร์มีสมรรถนะที่ดีให้แรงบิดสูงตลอดทุกย่านความถี่ไม่ต่างจากการต่อคาปาซิเตอร์รันที่ความถี่พิกัด 50 Hz

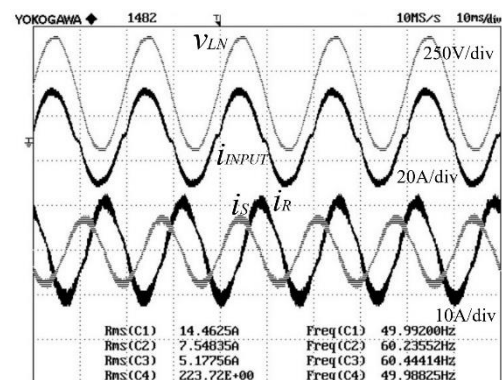
6.2 ผลการทดสอบการทำงานในโหมดไฮบริด

ในโหมดไฮบริดนี้จะทดสอบทั้งกรณีที่กำลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ (P_{SOLAR}) มีค่ามากกว่าและน้อยกว่ากำลังงานที่โหลดปั้มน้ำ (P_{Load}) ต้องการ โดยอาศัยการปรับค่าความถี่ของปั้มน้ำที่ 40 Hz และ 60 Hz ตามลำดับ ดังในรูปที่ 10 (ก) ขณะปั้มน้ำทำงานที่ความถี่ 40 Hz $P_{SOLAR} > P_{Load}$ อินเวอร์เตอร์จะดึงพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้เพียงแหล่งเดียว (จุดทำงานของแผงโซลาร์เซลล์ไม่อยู่ที่จุดกำลังสูงสุด $P_{SOLAR} \neq P_{mpp}$) ซึ่งขณะนั้นกระแสที่ดึงจากแผงโซลาร์เซลล์อยู่ที่ $i_{pv} = 4.5A$ และไม่มีการใช้พลังงานจากกริดรวม ทั้งไม่มีพลังงานไหลย้อนกลับกระแสด้านเข้า i_{input} จึงเป็นศูนย์ เมื่อเพิ่มความถี่เป็น 60 Hz ทำให้ $P_{SOLAR} < P_{Load}$ อินเวอร์เตอร์จะดึงพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้อย่างเต็มที่ (จุดทำงานของแผงโซลาร์เซลล์จะอยู่ที่จุดกำลังสูงสุด $P_{SOLAR} = P_{mpp}$) กระแสที่ดึงจากแผงโซลาร์เซลล์เพิ่มเป็น $i_{pv} = 7.7A$ โดยพลังงานส่วนที่ขาดจะดึงจากกริดเข้ามาเสริมจะมีกระแสด้านเข้า $i_{input} = 7A$

รูปที่ 10 (ข) แสดงรูปคลื่นกระแสที่ตำแหน่งต่างๆของเครื่องในสภาวะอยู่ตัว ที่ความเข้มแสงค่าหนึ่งและปั้มน้ำทำงานที่ความถี่ 60 Hz ในขณะนั้นที่จุดกำลังงานสูงสุด กระแสไฟตรงจากแผงโซลาร์เซลล์มีค่าเท่ากับ $i_{pv} = 7.12A$ กระแสไฟสลับด้านเข้า i_{input} มีค่าเท่ากับ 7.36 A ลดลงจากค่า 14.46 A ตามรูปที่ 9 (ข) ที่โหลดเท่ากันกระแสมอเตอร์ปั้มน้ำยังคงเท่าเดิม นั่นหมายถึงโหมดการทำงานแบบไฮบริดสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีนัย

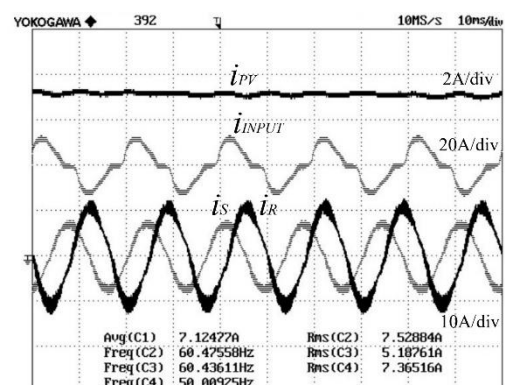
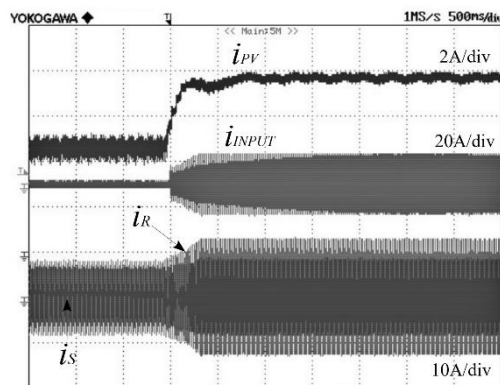


(ก) สภาวะการเริ่มทำงานของเครื่อง



(ข) รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันของเครื่องที่สภาวะอยู่ตัว

รูปที่ 9 การทำงานในโหมดกริดของอินเวอร์เตอร์สำหรับปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด



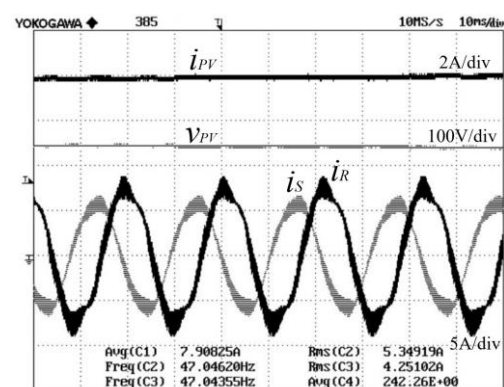
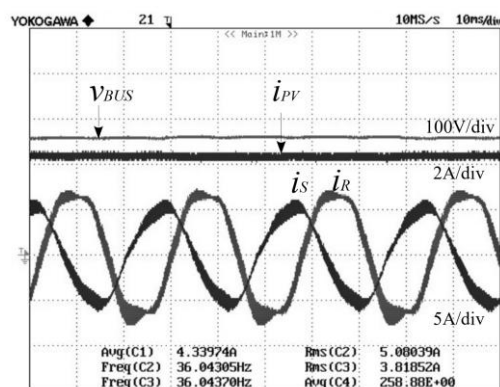
(ก) การทำงานเมื่อเปลี่ยนความถี่ปั้มน้ำจาก 40Hz เป็น 60Hz (ข) รูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันของเครื่องที่สภาวะอยู่ตัว
รูปที่ 10 การทำงานในโหมดไฮบริดของอินเวอร์เตอร์สำหรับปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด

6.3 ผลการทดสอบการทำงานในโหมดอิสระ

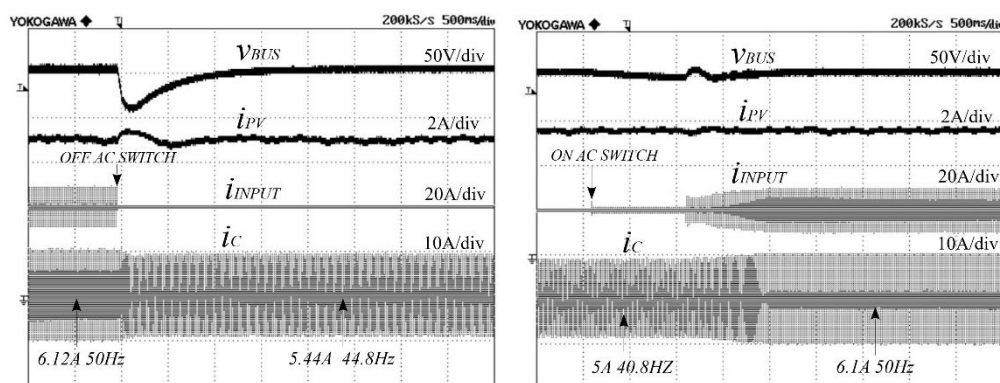
ในโหมดอิสระจะทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ความเข้มแสงต่างกัน เพื่อดูผลการควบคุมความเร็วรอบของปั้มน้ำให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของพลังงานแสงอาทิตย์ ดังตัวอย่างในรูปที่ 11 (ก) เป็นผลการทดสอบกรณีแดดอ่อน กระแสและแรงดันของแผงโซลาร์เซลล์มีค่า $i_{PV} = 4.3A$, $v_{PV} = 258.9V$ คิดเป็น $P_{SOLAR} = 1,1283.5W$ ปั้มน้ำถูกควบคุมให้มีความเร็วรอบต่ำด้วยความถี่ 36 Hz กระแสที่โหลดมอเตอร์ปั้มน้ำ $i_R = 5.0A$, $i_S = 3.8A$ และรูป 11 (ข) เป็นผลการทดสอบเมื่อแดดแรงขึ้น กระแสและแรงดันของแผงโซลาร์เซลล์มีค่า $i_{PV} = 7.9A$, $v_{PV} = 247.3V$ คิดเป็น $P_{SOLAR} = 1,916.3W$ โหลดปั้มน้ำถูกควบคุมให้มีความเร็วรอบสูงขึ้นเป็น 47 Hz โดยอัตโนมัติ โหลดมอเตอร์ปั้มน้ำเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากค่ากระแสที่สูงขึ้น $i_R = 5.3A$, $i_S = 4.3A$

6.4 ผลการทดสอบสถานะการทำงานเมื่อสับเปลี่ยนโหมดการทำงาน

อินเวอร์เตอร์สำหรับปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดถูกออกแบบให้ในสภาวะทั่วไปมีการทำงานเริ่มต้นอยู่ในโหมดไฮบริด แต่สามารถปรับเปลี่ยนโหมดการทำงานได้โดยอัตโนมัติ เพื่อให้สอดคล้องกับปริมาณพลังงานจากแหล่งพลังงานทั้งสองส่วน เช่น ขณะปั้มน้ำทำงานเกิดแล้วเกิดไฟฟ้าดับ จะเกิดการสับเปลี่ยนโหมดจากโหมดไฮบริดไปเป็นโหมดอิสระและเมื่อไฟฟ้ากลับคืนมาเครื่องจะกลับเข้าสู่โหมดไฮบริดอีกครั้ง ในหัวข้อนี้จะแสดงการทำงานระหว่างเปลี่ยนโหมดดังนี้



(ก) รูปคลื่นกระแสและแรงดันของเครื่องในสภาวะแดดอ่อน (ข) รูปคลื่นกระแสและแรงดันของเครื่องในสภาวะแดดแรง
รูปที่ 11 การทำงานในโหมดอิสระของอินเวอร์เตอร์สำหรับปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด



(ก) การสับเปลี่ยนจากโหมดไฮบริดไปสู่โหมดอิสระ (ข) การสับเปลี่ยนจากโหมดอิสระไปสู่โหมดไฮบริด

รูปที่ 12 การสับเปลี่ยนโหมดการทำงานระหว่างโหมดไฮบริดและโหมดอิสระ

6.4.1 การสับเปลี่ยนโหมดระหว่างโหมดไฮบริดและโหมดอิสระ

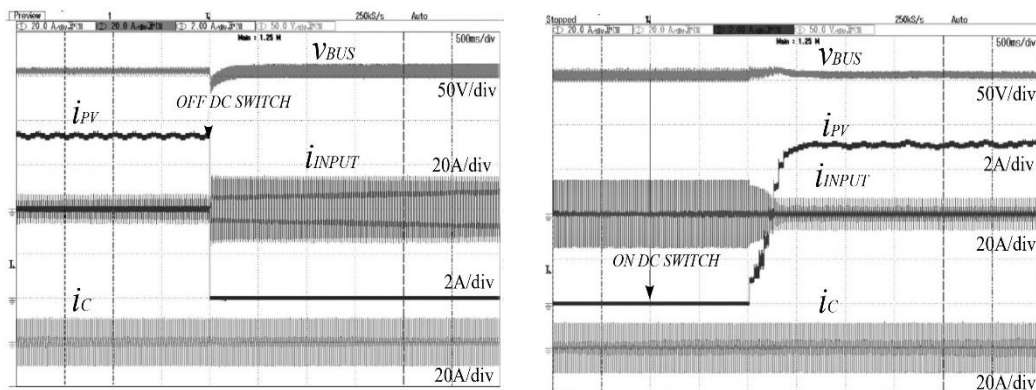
ทำการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับโดยตัดสวิตช์ด้านไฟสลับ AC switch ในรูปที่ 8 (ก) เมื่ออินเวอร์เตอร์ตรวจพบว่าแรงดันจากริดหายไป ตัวเครื่องจะออกจากโหมดไฮบริดโดยหยุดทำฟังก์ชัน PFC และเปลี่ยนมาทำงานในโหมดอิสระทันที ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 12 (ก) จะเห็นว่าขณะปลดการเชื่อมต่อกับกริด กระแสด้านเข้า i_{input} มีค่าเป็นศูนย์ ขณะนั้นแรงดันบัสไฟตรงลดลงเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อการจ่ายโหลดปั๊มน้ำชั่วคราว แต่หลังจากที่ฟังก์ชันการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในโหมดอิสระเริ่มทำงาน เครื่องจะปรับลดความถี่ลงอย่างรวดเร็วจากค่าที่ตั้งที่ 50Hz ลดลงเหลือ 44.8Hz แรงดันบัสไฟตรงกลับมาควบคุมได้ที่ 400V ภายในเวลาประมาณ 1.5 วินาที

เมื่อต่อสวิตช์ด้านไฟสลับ AC switch เพื่อจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้ากลับคืนมา เมื่ออินเวอร์เตอร์ตรวจพบว่ามีแรงดันจากกริดกลับมา ตัวเครื่องจะเชื่อมต่อกับกริดแบบซิงโครไนซ์ (synchronize) โดยทำเฟสล็อกกับแรงดันด้านเข้า (PLL) ช่วงเวลาหนึ่ง ก่อนจะมาทำงานในโหมดไฮบริดอย่างอัตโนมัติ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 12 (ข) จะเห็นว่าหลังจากเชื่อมต่อกับกริดเป็นเวลา 1 วินาที เครื่องจะกลับเข้ามาในโหมดไฮบริด โดยสังเกตจากกระแสด้านเข้า i_{input} มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเวลาเดียวกันกับที่มอเตอร์ปั๊มน้ำเร่งความเร็วกลับไปทีค่าที่ตั้ง 50Hz

6.4.2 การสับเปลี่ยนโหมดระหว่างโหมดไฮบริดและโหมดกริด

ทำการจำลองเหตุการณ์เงาบังแผงโซลาร์เซลล์ ด้วยการตัดสวิตช์ด้านไฟตรง DC switch ในรูปที่ 8 (ก) เมื่ออินเวอร์เตอร์ตรวจพบว่าแรงดันจากแผงโซลาร์เซลล์หายไป ตัวเครื่องจะออกจากโหมดไฮบริดโดยหยุดทำฟังก์ชัน MPPT และเปลี่ยนมาทำงานในโหมดกริดทันที ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 13 (ก) จะเห็นว่าขณะปลดการเชื่อมต่อกับแผงโซลาร์เซลล์ กระแส $i_{pv} = 0$ แรงดันบัสไฟตรงจะลดลงเพียงช่วงเวลาสั้นๆ เนื่องจากฟังก์ชันการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงในโหมดกริดจะสั่งเพิ่มกระแสด้านเข้าจาก 2.7A เป็น 9.8A แบบทันทีทันใด โดยความเร็วของปั๊มน้ำยังเท่าเดิมตามค่าตั้งความถี่ที่ 50Hz

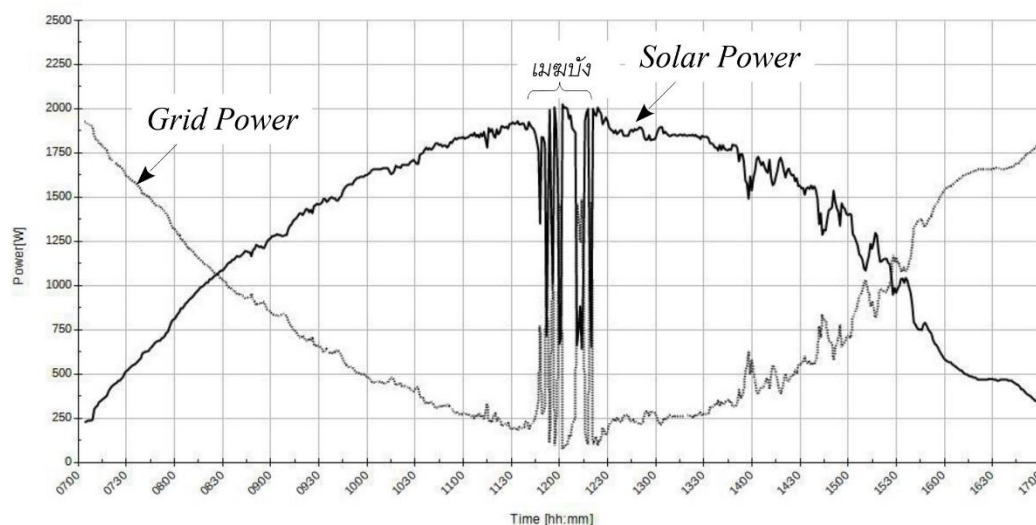
ทำการจำลองเหตุการณ์เงาบังแผงโซลาร์เซลล์ ด้วยการต่อสวิตช์ด้านไฟตรง DC switch ในรูปที่ 8 (ก) เมื่ออินเวอร์เตอร์ตรวจพบว่าแรงดันจากแผงโซลาร์เซลล์กลับมาช่วงเวลาหนึ่ง ตัวเครื่องจะกลับมาทำงานในโหมดไฮบริดแบบอัตโนมัติ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 13 (ข) จะเห็นว่าหลังการเชื่อมต่อแผงโซลาร์เซลล์เป็นเวลา 1 วินาที ตัวเครื่องจะเริ่มทำงานในโหมดไฮบริด ฟังก์ชัน MPPT จะช่วยให้อินเวอร์เตอร์รับพลังงานแสงอาทิตย์ได้เต็มประสิทธิภาพอย่างรวดเร็ว โดยพิจารณาจากกระแส i_{pv} ที่เพิ่มขึ้นเป็น 7.1A ภายในเวลาน้อยกว่า 0.5 วินาที เมื่อพิจารณากระแสด้านเข้า i_{input} ในขณะนั้นมีค่าลดลงจาก 9.8A เป็น 2.9A แสดงให้เห็นว่าอินเวอร์เตอร์ดึงพลังงานจากกริดลดลงเมื่อมีพลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยร่วมจ่ายพลังงานให้กับโหลดปั๊มน้ำ



การสับเปลี่ยนจากโหมดไฮบริดไปสู่โหมดกริด (ข) การสับเปลี่ยนจากโหมดกริดไปสู่โหมดไฮบริด
รูปที่ 13 การสับเปลี่ยนโหมดการทำงานระหว่างโหมดไฮบริดและโหมดอิสระ

6.5 การทดสอบการทำงานในโหมดไฮบริดแบบต่อเนื่อง

ผลการทดสอบการทำงานแบบต่อเนื่องของอินเวอร์เตอร์ปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดขนาด 3HP กับปั้มน้ำ 1 เฟส ขนาด 2HP (กำลังด้านออก) ทำงานที่ความถี่ 50Hz แสดงดังรูปที่ 14 โดยทำการเก็บข้อมูลกำลังงานไฟฟ้าที่ใช้และกำลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ ในวันที่ 23 เมษายน 2564 ช่วงเวลา 7.00-17.00น. จากรูปจะเห็นได้ว่าในช่วงเช้ามืดก่อน 8.30น.และช่วงเย็นหลัง 15.30น. เป็นช่วงที่ความเข้มแสงต่ำ อินเวอร์เตอร์ใช้พลังงานจากกริดเป็นหลัก และดึงพลังงานจากแสงอาทิตย์มาเสริมเพื่อจ่ายโหลดปั้มน้ำ ในระหว่างเวลา 8.30-15.30น. ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้มีค่ามากกว่าพลังงานจากกริด ในช่วงเวลานี้สามารถลดการใช้ไฟฟ้าลงได้อย่างมาก มีเพียงเฉพาะช่วง 11.45-12.20 น. ที่พบว่ามีความเข้มแสงสูง แต่เครื่องก็ยังสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องไม่พบปัญหา เมื่อรวมกำลังงานจากทั้ง 2 แหล่งพบว่ามีค่าเท่ากับ 2.12kW คงที่ตลอดตามโหลดปั้มน้ำ 50Hz ถ้าพิจารณาเป็นพลังงานที่ใช้ตลอดการทดสอบพบว่า เราใช้ไฟจากกริด 8.12หน่วยและได้พลังงานจากแสงอาทิตย์ 13.08 หน่วย ดังนั้นการใช้ อินเวอร์เตอร์ปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 60%



รูปที่ 14 การทำงานในโหมดไฮบริดแบบต่อเนื่องของอินเวอร์เตอร์สำหรับปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด

7. สรุป

อินเวอร์เตอร์สำหรับปั้มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดที่ออกแบบสามารถดึงพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นลำดับแรกก่อนที่จะดึงพลังงานไฟฟ้าเข้ามาเสริมในกรณีที่พลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอกับโหลดปั้มน้ำ อินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบนี้มีข้อดีคือใช้งานได้ง่ายสามารถปรับเปลี่ยนโหมดการทำงานระหว่างโหมดได้อย่างอัตโนมัติ ทั้งระหว่างโหมดไฮบริดกับโหมดกริด และระหว่างโหมดไฮบริดกับโหมดอิสระ การเลือกปรับเปลี่ยนโหมดเพื่อให้สอดคล้องกับสถานะแวดล้อมในขณะนั้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานกับปั้มน้ำชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำทั้งรุ่น 1 เฟส และ 3 เฟส ซึ่งมีให้อยู่ในปั้มน้ำหลากหลายประเภทโดยไม่ต้องดัดแปลงปั้มน้ำ ผลการทดสอบแสดงสมรรถนะการทำงานของเครื่อง พบว่าในอินเวอร์เตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีผลตอบสนองที่รวดเร็ว ทั้งการตรวจหาจุดกำลังงานสูงสุดของแผงโซลาร์เซลล์และการควบคุมตัวประกอบกำลังของกระแสด้านเข้า ด้วยโครงสร้างของเครื่องทำให้มั่นใจได้ว่าจะไม่มีพลังงานไหลย้อนกลับเข้าไปที่กริดในทุกๆกรณี และจากการทดสอบการทำงานในโหมดไฮบริดแบบต่อเนื่องจะเห็นได้ว่าเครื่องอินเวอร์เตอร์สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 60%

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, *สรุปผลการตรวจวัดข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทย พ.ศ. 2563*, https://www.dede.go.th/main.php?filename=solar_intensity.
- [2] Maida Saputra, Ahmad Syuhada, and Ratna Sary, Study of Solar and Wind Energy Using as Water Pump Drive-Land for Agricultural Irrigation, in: *4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, Aug 2018, DOI: 10.1109/ICSTC.2018.8528643.
- [3] Md. Tareek- Al-Islam Khan, Suvasish Sarkar, Shakhawat Hossain, Ahsan Uddin Ahmed, and Bishwajit Banik Pathik, The feasibility study of solar irrigation: Economical comparison between diesel and photovoltaic water pumping systems for different crops, In: *2013 International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)*, Feb 2014, DOI: 10.1109/EICT.2014.6777844.
- [4] Sujoy Ranjan and Nath Ratan Mandal, some studies on performance analysis of two different laboratory scale solar photovoltaic water pumping in irrigation systems, In: *21st Century Energy Needs - Materials, Systems and Applications (ICTFCEN)*, Nov 2016, DOI: 10.1109/ICTFCEN.2016.8052739.
- [5] Md Tanvir Arafat Khan, Md Rishad Ahmed, Sina Ibne Ahmed, and Shahidul Islam Khan, Design and performance analysis of water pumping using solar PV, In: *2nd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET 2012)*, Jan 2012.
- [6] Saurabh Shukla, and Bhim Singh, Solar PV array fed speed sensorless vector control of induction motor drive for water pumping, In: *7th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Nov 2016, DOI: 10.1109/IICPE.2016.8079443.
- [7] Utkarsh Sharma, Chinmay Jain, and Bhim Singh, three phase grid interfaced solar water pumping system, In: *2017 National Power Electronics Conference (NPEC)*, Dec. 2017, DOI: 10.1109/NPEC.2017.8310425.
- [8] Mojtaba Kordestani, Alireza Mirzaee, Ali Akbar Safavi, and Mehrdad Saif, Maximum Power Point Tracker (MPPT) for Photovoltaic Power Systems-A Systematic Literature Review, In: *2018 European Control Conference (ECC)*, June 2018, DOI: 10.23919/ECC.2018.8550117.