

5ER-O03: การออกแบบวงจรสำหรับการสาธิตระบบเชื่อมต่อกิตแรงดันต่ำเฟสเดียว Circuit Designed for Demonstration Single-Phase Low-Voltage Grid-Connected System

บุญเรือง วังศิลาบัตร^{1*} และปณณวิชญ์ ภัทร์สรณ์ศิริ¹
Boonruang Wangsilabatra^{1*} and Punnavich Phatsornsiri¹

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบวงจรสำหรับการสาธิตระบบเชื่อมต่อกิตแรงดันต่ำเฟสเดียว ซึ่งลดระดับแรงดันไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย 220 โวลต์ ลงมาเป็น 45 โวลต์ ด้วยหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า ทำให้สามารถใช้อุปกรณ์สวิตชิ่งอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีพิกัดทนแรงดันไฟฟ้าต่ำมาสร้างอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกิตเข้าด้วยกันได้ สำหรับการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของระบบ จะใช้หลักการควบคุมทั้งขนาดและทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกิตโดยตรง โดยการควบคุมวงรอบกระแสฮิสเตอร์ซิส และใช้ตัวควบคุมแบบ พี-ไอ ในการควบคุมการทำงานของระบบ จากผลที่ได้จากการทดลอง สามารถทำการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของระบบได้ประมาณ 90 วัตต์ ทั้งสองทิศทาง และยังสามารถปรับความกว้างของวงรอบกระแสฮิสเตอร์ซิส เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบได้ด้วย และสามารถนำไปใช้ในการสาธิตเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของระบบเชื่อมต่อกิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองจะมีค่าประมาณ 96.5% ในขณะที่ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าให้กับภาระและกิตรวมกันเป็น 125.5 วัตต์

คำสำคัญ: การออกแบบวงจร การสาธิต ระบบเชื่อมต่อกิตแรงดันต่ำเฟสเดียว

Abstract

This paper presents a circuit design for a demonstration of a single-phase low-voltage grid-connected system. This reduced the voltage from the 220 volts distribution system down to 45 volts with a voltage transformer that makes it possible to use low-voltage rated power electronic switches to create an inverter for the grid-connected system. The principle of system power transfer will be using control both the magnitude and direction of the electric current flowing directly through the grid by controlling the current hysteresis loop and use a P-I controller to control the operation of the system. From the experiment results can be transferred the system power 90 watts approximately in both directions and it can also adjust the width of the current hysteresis loop to study the effects that can occur on the system as well. And it can be effectively used in the demonstration to study the behavior of the power transfer of the grid connected system. Moreover, the efficiency of the inverter that used in the experiment is 96.5% while transferred the power to load and grid is 125.5 watts.

Keywords: Circuit design, Demonstration, Single-phase low-voltage grid-connected system

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

¹ Faculty of Engineering Pathumwan Institute Technology

* Corresponding author. E-mail: boonruan@gmail.com

บทนำ

พลังงานไฟฟ้าถูกนำมาใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านเรือนและในภาคอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถแปลงเปลี่ยนไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่น ๆ ได้หลากหลาย เช่นแปลงเปลี่ยนไปเป็นพลังงานแสงสว่าง ด้วยหลอดไฟฟ้า แปลงเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนด้วยขดลวดทำความร้อน และแปลงเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกลด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งทราบกันดีอยู่แล้ว รูปแบบของกระแสไฟฟ้ามีด้วยกันอยู่สองรูปแบบ คือไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไป แต่ไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถนำไปใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระยะทางที่ไกล ๆ ได้ และการลดหรือเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะกระทำได้ยุ่งยากมาก โดยจำเป็นต้องนำอุปกรณ์และความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาทำการลดหรือเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้า สำหรับไฟฟ้ากระแสสลับจะมีข้อได้เปรียบมากกว่าไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปในระยะทางที่ไกล ๆ ได้ อีกทั้งยังสามารถทำการลดหรือเพิ่มขนาดของแรงดันไฟฟ้าได้ง่าย โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า

ในสถานการณ์ปัจจุบัน ประชากรโลกมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นเป็นอย่างมาก ในขณะที่โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าในระบบจำหน่ายเกิดขึ้นไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้กระแสไฟฟ้าของประชากรที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้ายังมีมูลค่าสูงมากขึ้น เนื่องจากการสร้างเขื่อนกักเก็บพลังงานน้ำมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้ามีจำกัดและไม่สามารถจะเพิ่มกำลังการผลิตให้สูงขึ้นได้ อีกทั้งการสร้างเขื่อนยังมีผลกระทบต่อระบบนิเวศของพื้นที่โดยรอบเขื่อน ดังนั้นจึงต้องผลิตกระแสไฟฟ้าจากฟอสซิล ที่เกิดจากการทับถมของซากพืชและซากสัตว์มาเป็นเวลานาน [1] อันได้แก่น้ำมันและถ่านหิน ซึ่งทั้งน้ำมันและถ่านหินก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศอย่างรุนแรง อีกทั้งปริมาณของน้ำมันและถ่านหินของโลกกำลังลดลงและอาจจะไม่เพียงพอต่อการบริโภคในอนาคต ถึงแม้ว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้พลังงานนิวเคลียร์จะเป็นทางเลือกที่ทำให้ต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าถูกลง แต่การเลือกพื้นที่ในการจัดตั้งโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา เนื่องจากจะต้องอยู่ใกล้กับแหล่งน้ำขนาดใหญ่ที่ต้องใช้ในการหล่อเย็นให้กับเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ นอกจากนั้นรังสีที่เกิดจากกากของสารกัมมันตภาพรังสี ยังจะต้องถูกจัดเก็บเป็นอย่างดีในพื้นที่ที่ถูกจัดไว้โดยเฉพาะ ซึ่งถ้าเกิดการรั่วออกมา จะมีรังสีแพร่ออกไปเป็นบริเวณกว้าง และจะตกค้างอยู่ที่พื้นผิวเป็นเวลาหลายสิบปี ทำลายสภาพแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในพื้นที่นั้น ๆ และจะเห็นว่าการต่อต้านของประชาชน จากกรณีที่ต้องการจะสร้างโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานนิวเคลียร์ตามที่เป็นข่าวอยู่เสมอ

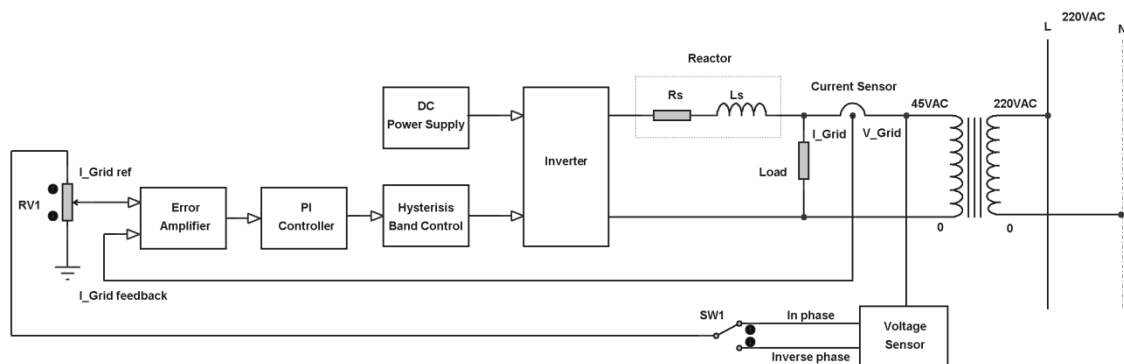
จากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นเป็นอย่างมาก และพลังงานที่ใช้ในการผลิตที่ได้จากฟอสซิลกำลังลดลง ทำให้จำเป็นต้องหาพลังงานที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าทดแทน ซึ่งได้แก่พลังงานจากแรงลม และพลังงานจากแสงอาทิตย์ ซึ่งในปัจจุบัน พลังงานจากแสงอาทิตย์กำลังเป็นที่สนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและไม่ก่อให้เกิดมลภาวะที่ทำให้ระบบนิเวศเสียหายแต่อย่างใด ประกอบกับแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในการแปลงเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ที่ผลิตขึ้นใช้ในปัจจุบัน มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเป็นอย่างมากและมีราคาถูกลง แต่เนื่องจากการแปลงพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์นั้น จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งไม่สามารถใช้ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหรือเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายได้โดยตรง เนื่องจากในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงเปลี่ยนรูปแบบของกระแสไฟฟ้าด้วยอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่ทำหน้าที่แปลงเปลี่ยนรูปแบบของไฟฟ้ากระแสตรงให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยเฉพาะ ต่อจากนั้นจึงสามารถส่งจ่าย

กำลังไฟฟ้าหรือนำไปเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ซึ่งเรียกกันว่า “กริด” โดยกำลังไฟฟ้าสามารถถ่ายโอนกันไป-มา ระหว่างอินเวอร์เตอร์และกริดที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบวงจรสำหรับการสาธิตระบบเชื่อมต่องริตแรงดันต่ำเฟสเดียว โดยที่แรงดันไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า 220 โวลต์ จะถูกลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงมาเป็น 45 โวลต์ โดยการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแยกระบบกราวนด์ (Isolation ground transformer) ทำให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ใช้ขณะทำการสาธิต ทั้งนี้เพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายโอนของกำลังไฟฟ้าไป-มา ระหว่างอินเวอร์เตอร์และกริด ซึ่งจะเกิดกรณีศึกษาเป็น 3 กรณี อันได้แก่ กรณีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากกริดไปยังอินเวอร์เตอร์ กรณีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ไปยังกริด และกรณีการร่วมจ่ายกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์และจากกริดไปยังภาระ และสามารถใช้อุปกรณ์สวิตช์ในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทนแรงดันต่ำ มาสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์ได้ ทำให้ต้นทุนในการสร้างวงจรสำหรับการสาธิตระบบเชื่อมต่องริตถูกลง

วิธีการศึกษา

รูปที่ 1 เป็นบล็อกไดอะแกรมซึ่งจะนำมาใช้สำหรับการออกแบบวงจรในการสาธิตระบบเชื่อมต่องริตแรงดันต่ำเฟสเดียวที่นำเสนอในบทความฉบับนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า 220 โวลต์ ให้ลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงมาเป็น 45 โวลต์ และกำหนดให้เป็นแรงดันกริด (V_Grid) โดยมีตัวตรวจจับแรงดัน (Voltage Sensor) ที่สามารถให้สัญญาณทางเอาต์พุตเป็นการร่วมเฟสกัน (In phase) ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดที่ตรวจจับด้วยตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า (Current Sensor) และสัญญาณทางเอาต์พุตเป็นการกลับเฟสกัน (Inverse phase) ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริด โดยแรงดันที่กริดจะนำไปใช้เป็นกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ไหลผ่านกริด (I_Grid ref) โดยทิศทางของกระแสอ้างอิงนี้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสวิตช์ (SW1)

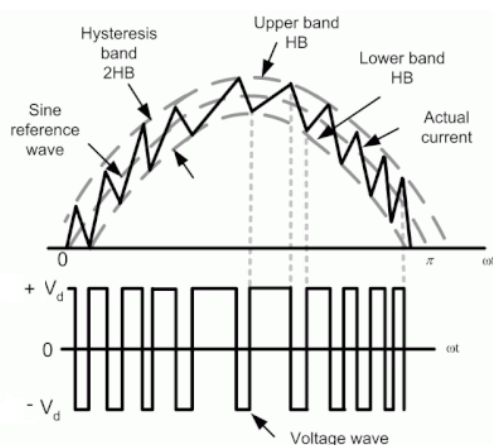


รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของระบบเชื่อมต่องริตแรงดันต่ำเฟสเดียว

โดยถ้าตำแหน่งของสวิตช์อยู่ตำแหน่งการร่วมเฟส จะเป็นการบังคับให้กระแสที่ผ่านกริดมีเฟสร่วมกันกับแรงดันไฟฟ้าที่กริด ทำให้กำลังไฟฟ้าที่เกิดจากผลคูณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดและแรงดันไฟฟ้าที่กริดมีค่าเป็นบวก ซึ่งเป็นผลให้ กริด จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระ (Load) ถ้าถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าส่วนเกินไปให้กับอินเวอร์เตอร์ แต่ตำแหน่งของสวิตช์อยู่ตำแหน่งการกลับเฟส จะเป็นการบังคับให้กระแสที่ผ่านกริดมีเฟสกลับกันกับแรงดันไฟฟ้าที่กริด ทำให้กำลังไฟฟ้าที่กริดมีค่าเป็นลบ ซึ่งเป็นผลให้ อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระ (Load) และถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าส่วนเกินไปให้กับกริด [2] โดยที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ไหลผ่านกริด สามารถปรับได้ด้วยตัวต้านทาน RV1 ทั้งกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ไหลผ่านกริดและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ที่กริดจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเพื่อหา

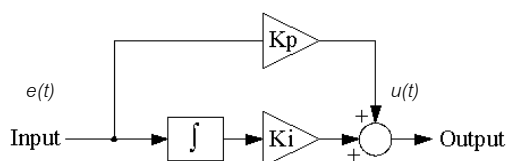
ความผิดพลาดด้วยวงจรรขยายค่าความผิดพลาด (Error Amplifier) ต่อจากนั้นจะถูกปรับแต่งสัญญาณด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (PI-Controller) ก่อนที่เข้าสู่การควบคุมวงรอบกระแสฮิสเตอร์รีซิส ซึ่งสามารถปรับความกว้างของแถบวงรอบกระแสฮิสเตอร์รีซิสได้ (Hysteresis band control) และสุดท้ายจะส่งเข้าไปขับอุปกรณ์สวิตซ์กำลังภายในอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กลายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ [3] โดยมีตัวรีแอคเตอร์ (Reactor) ต่อขึ้นกลางระหว่างอินเวอร์เตอร์และกริด โดยที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง อาจจะมาจกแบตเตอรี่ หรือแผงโซลาร์เซลล์ (Photo Voltaic cell, PV) [4][5][6] หรือสร้างขึ้นจากวงจรเรียงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ไดโอด และทำการกรองแรงดันไฟฟ้าให้เรียบด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีการสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในบทความฉบับนี้

สำหรับการควบคุมวงรอบกระแสฮิสเตอร์รีซิส และเป็นวิธีการควบคุมที่ใช้ในบทความนี้ แสดงดังในรูปที่ 2 ซึ่งก็คือผลต่างของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดอ้างอิง (Sine reference wave) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากรูปคลื่นไซน์ซึ่งมาจากแรงดันไฟฟ้าที่กริดกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริด ซึ่งจะถูกลบบังคับให้ไหลอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด (Hysteresis band) ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดจริง (Actual current) อยู่ภายในขอบเขตคงที่ (2HB) หรือภายในขอบเขตด้านบน (Upper band) และขอบเขตด้านล่าง (Lower band) และผลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ภายในขอบเขตคงที่ จะมีความสัมพันธ์กับสัญญาณที่ใช้ในการขับนำอุปกรณ์สวิตซ์ในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ในรูปแบบของการผสมสัญญาณตามความกว้างรูปคลื่นไซน์ (Sine wave Pulse Width Modulation, SPWM) [7]



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ถูกบังคับให้อยู่ในขอบเขตคงที่

สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอเป็นตัวควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมร่วมกันอันได้แก่ตัวควบคุมแบบพี (Proportional Controller, P Controller) และ ตัวควบคุมแบบไอ (Integral Controller, I Controller) ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ใช้กันแบบดั้งเดิม (Conventional Controller) สามารถที่จะทำให้ค่าผิดพลาดที่เกิดจากกระบวนการควบคุมมีค่าเป็นศูนย์ได้ ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3



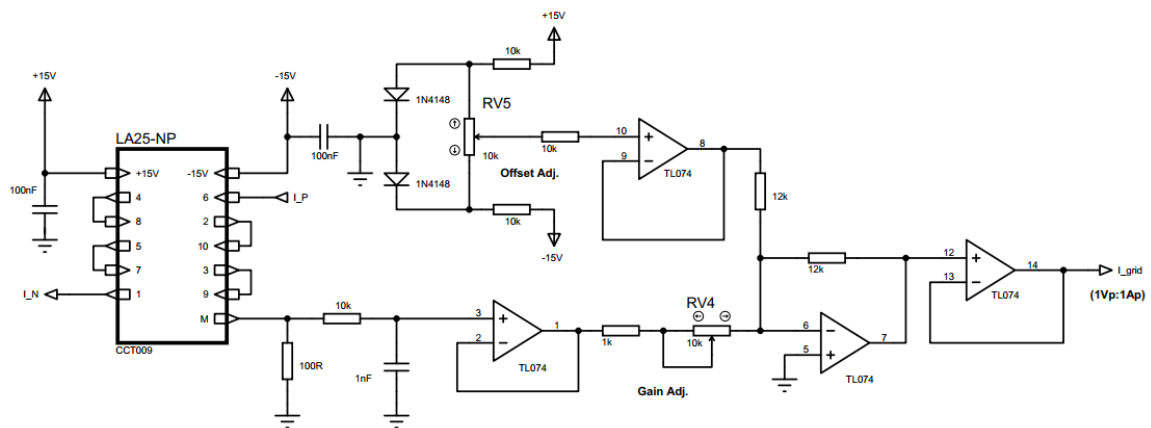
รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบพีไอ [8]

โดยสัญญาณอินพุต $e(t)$ จะเป็นค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเปรียบเทียบกันระหว่าง สัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) และ สัญญาณที่ถูกป้อนกลับจากกระบวนการควบคุม (Feedback Signal) โดยมี K_p และ K_i เป็นอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพี และแบบไอ ตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนสมการทางด้านเอาต์พุต $u(t)$ ของตัวควบคุมในโดเมนของเวลาได้ดังสมการที่ (1)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (1)$$

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1 นำมาออกแบบวงจรต่าง ๆ และนำมาประกอบเข้าด้วยกันให้สามารถเชื่อมต่อเข้ากริดและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าได้

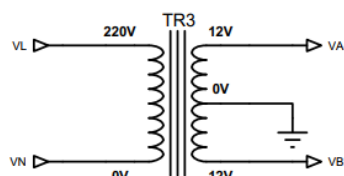
รูปที่ 4 เป็นวงจรตรวจจับสนัยไฟฟ้า ซึ่งใช้อุปกรณ์การวัดกระแสไฟฟ้าแบบ Hall effected เบอร์ LA25-NP มาสร้างวงจร โดย I_P เป็นทางเข้ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการวัดหรือตรวจจับสนัย และ I_N เป็นทางออกของกระแสไฟฟ้าที่จะไหลผ่านไปให้ภาระ และอัตราขยายของวงจรจะถูกปรับตั้ง ให้แรงดันทางด้านเอาต์พุตมีค่าเป็น 1Vp:1Ap หรือ 1.414Vp:1Arms



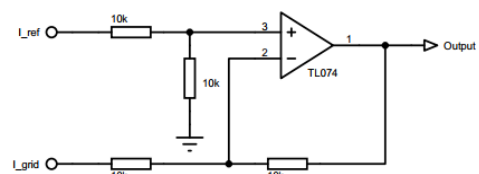
รูปที่ 4 วงจรตรวจจับสนัยไฟฟ้า

รูปที่ 5 เป็นหม้อแปลงแบบมีแท็บกลาง (Center tap Transformer) ซึ่งในบทความนี้นำมาประยุกต์ใช้เป็น ตัวตรวจจับสนัยแรงดันไฟฟ้าที่กริด และจะถูกนำไปใช้ในการกำหนดค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดอ้างอิงด้วย อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า จะทำให้สามารถกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดอ้างอิงได้ถึง 2.45Arms (เมื่อ $V_L - V_N = 45V$) ซึ่งเพียงพอต่อการทดลองในการเชื่อมต่อระบบกริด

รูปที่ 6 เป็นวงจรขยายค่าผิดพลาด (Error Amplifier) หรือก็คือวงจรขยายผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้ามาทางอินพุตทั้งสองของวงจร ซึ่งในวงจรถูกกำหนดให้มีค่าอัตราขยายของวงจรมีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 5 ตัวตรวจจับสนัยแรงดันไฟฟ้าที่กริด

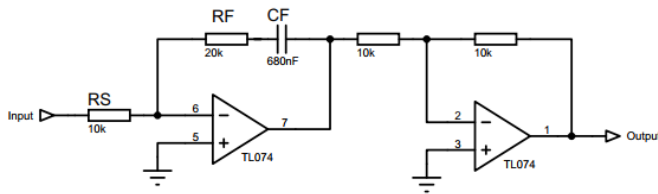


รูปที่ 6 วงจรขยายค่าผิดพลาด

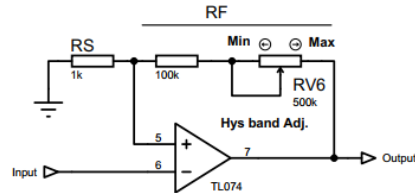
รูปที่ 7 เป็นวงจรตัวควบคุมแบบพีไอ [9] โดยค่าอัตราขยายของตัวควบคุม K_p และ K_i จะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) และสมการที่ (3) ตามลำดับ ซึ่งจากวงจรกำหนดให้ อัตราขยาย K_p มีค่าเท่ากับ 2 และ อัตราขยาย K_i มีค่าเท่ากับ 147 โดยค่าอัตราขยายทั้งสองได้จากการลองผิดลองถูก (Trial and error method)

$$K_p = R_F / R_S \quad (2)$$

$$K_i = 1 / (R_S C_F) \quad (3)$$



รูปที่ 7 วงจรตัวควบคุมแบบพีไอ



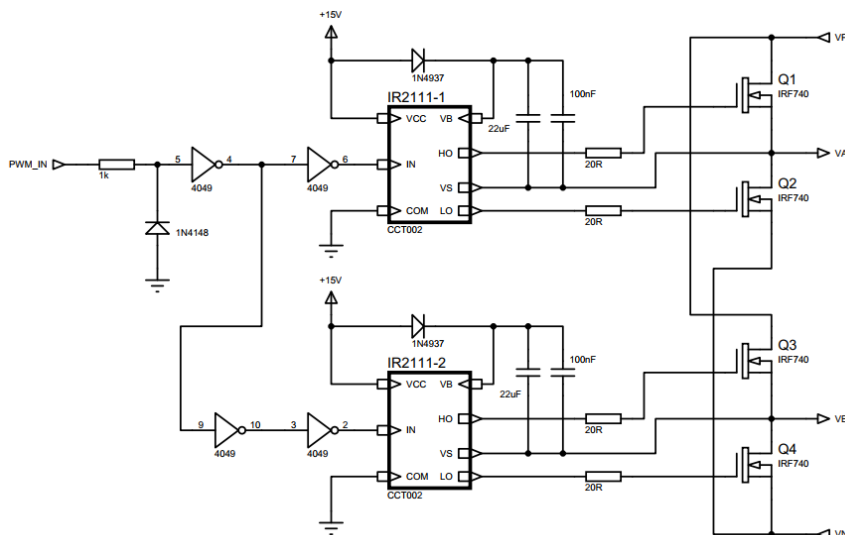
รูปที่ 8 วงจรควบคุมวงรอบฮิสเตอร์รีซีต

รูปที่ 8 เป็นวงจรควบคุมวงรอบฮิสเตอร์รีซีต ซึ่งก็คือวงจรอินเวอร์ตติงชมิททริกเกอร์ (Inverting Schmitt trigger circuit) ที่สร้างโดยใช้ออป-แอมป์ [10] โดยแรงดันอินพุตทริกเกอร์ (V_H) ที่ทำให้เอาต์พุตเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นตรงกันข้ามกับแรงดันที่ถูกล็อกเข้ามาทางด้านอินพุต จะเป็นดังสมการที่ (4)

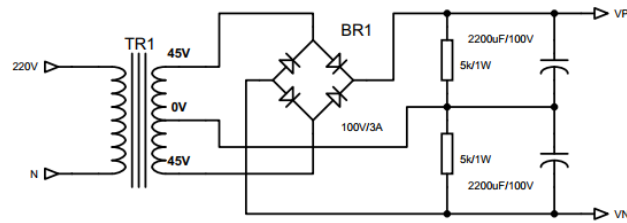
$$V_H = \pm \frac{R_S}{R_F + R_S} V_{o(sat)} \quad (4)$$

โดยที่ $V_{o(sat)}$ เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าอิ่มตัวทางด้านเอาต์พุตของออป-แอมป์ ซึ่งจากวงจรจะเห็นว่า RF สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าได้ด้วยการปรับค่าตัวต้านทาน RV6 ดังนั้นจึงเป็นผลให้ค่าของแรงดันอินพุตทริกเกอร์เปลี่ยนแปลงไปได้ และเป็นผลให้ความกว้างของวงรอบฮิสเตอร์รีซีตเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

รูปที่ 9 เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับกริดแรงดันต่ำ โดยสัญญาณที่ถูกป้อนเข้าจะอยู่ในรูปแบบของ PWM (Pulse Width Modulation) ที่มีขนาดสัญญาณเป็น 15V และมีค่าเวลาหยุดนำกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์สวิตช์กำลังในกิ่งกระแสเดียวกัน (dead time) เป็น 650 ns



รูปที่ 9 วงจรอินเวอร์เตอร์

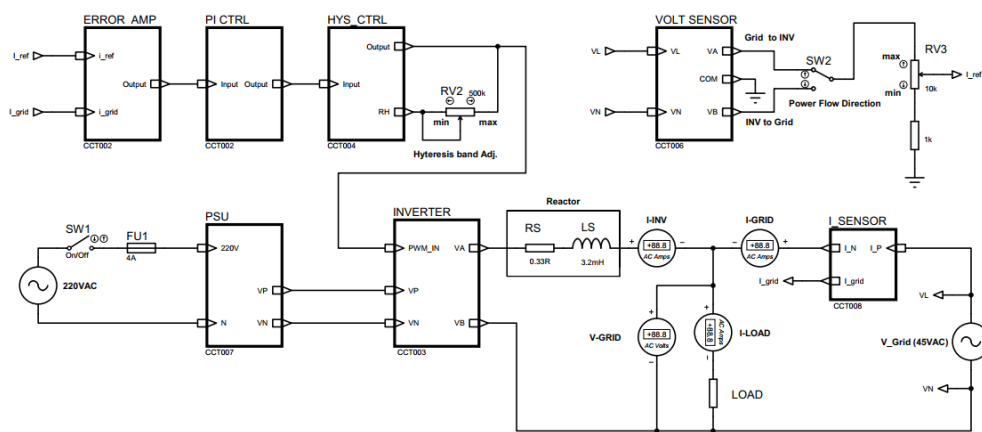


รูปที่ 10 วงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้กับอินเวอร์เตอร์

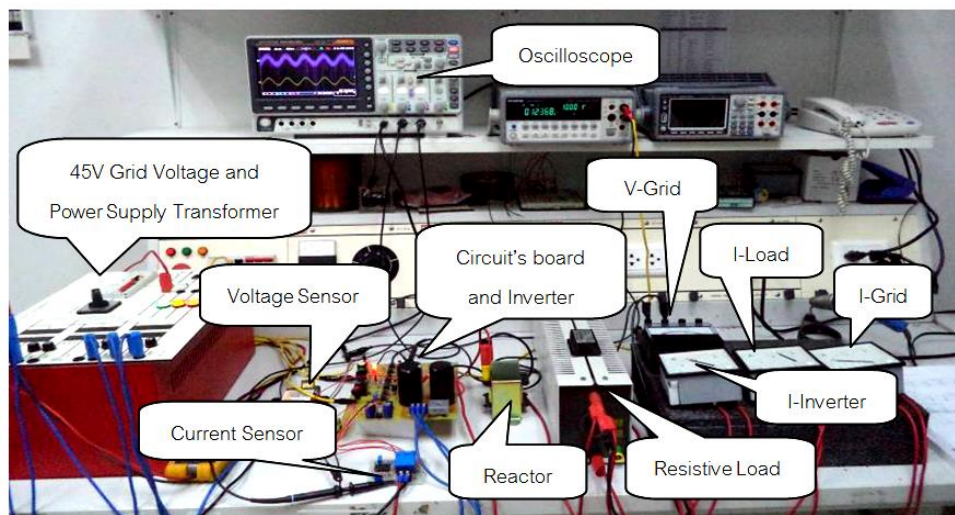
รูปที่ 10 เป็นวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้กับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งถูกแปลงผันมาจากหม้อแปลงไฟฟ้าแบบมีแท็ปกลาง 45V-0-45V ผ่านวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าด้วยไดโอดแบบบริดจ์ และทำการกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งตามวงจรที่ออกแบบไว้ จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระได้ประมาณ 190 วัตต์ (คำนวณที่ $VP-VN = 120V$)

ผลการศึกษา

จากการศึกษาและวงจรในส่วนต่าง ๆ ที่ได้ออกแบบไว้แล้วนั้น นำมาต่อเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 11 และจัดตั้งอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 11 บล็อกไดอะแกรมแสดงการเชื่อมต่อวงจรในส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน

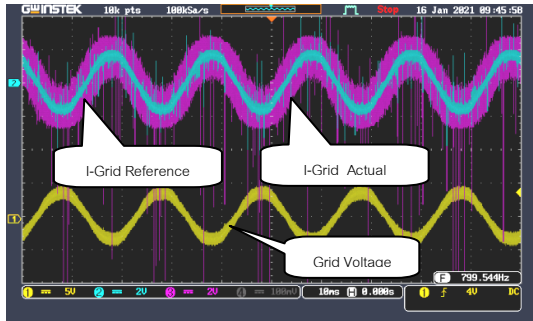


รูปที่ 12 การจัดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

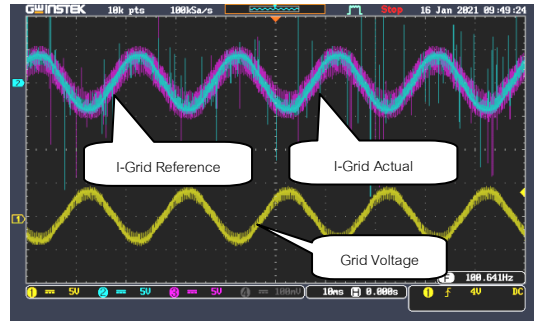
สำหรับผลการทดลองจะแยกออกเป็น 3 กรณีด้วยกัน ดังนี้

1) กรณีที่อินเวอร์เตอร์ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปให้กับภาระและกริด

ในกรณีนี้กระแสไฟฟ้าที่กริดจะถูกบีบบังคับให้มีเฟสการไหลของกระแสไฟฟ้ามีทิศทางตรงกันข้ามกับเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่กริด ทำให้กำลังไฟฟ้าที่กริดมีค่าเป็นลบ และถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ไปยังกริด โดยกำหนดให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดมีค่าเป็น -1 แอมแปร์ และ -2 แอมแปร์ ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 13 และ รูปที่ 14 และตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1



รูปที่ 13 กระแสไหลผ่านกริดเป็น -1 แอมแปร์



รูปที่ 14 กระแสไหลผ่านกริดเป็น -2 แอมแปร์

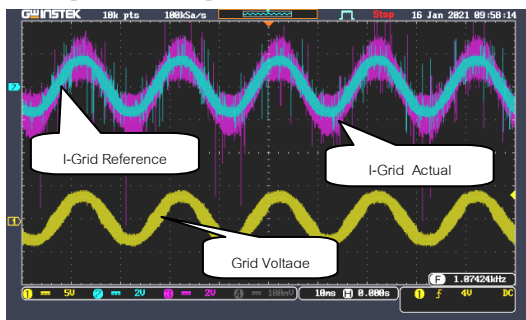
ตารางที่ 1 กรณีที่อินเวอร์เตอร์ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปให้กับภาระและกริด

R_{Load}	I_G (A)	V_G (V)	I_{INV} (A)	I_{Load} (A)	P_G (W)	S_{INV} (VA)	P_{Load} (W)
100 Ω	-1	50	1.45	0.51	-50	72.5	25.5
	-2	50	2.45	0.51	-100	122.5	25.5

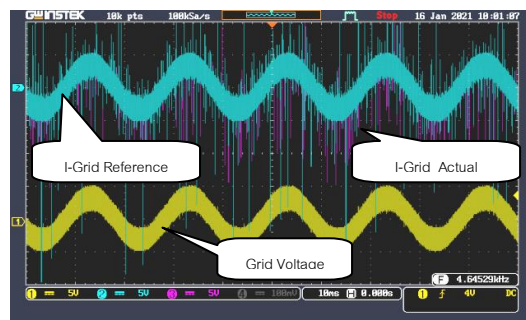
จากตารางที่ 1 เมื่อกระแสกริดถูกบังคับให้ไหลเป็น -1 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าจะถูกถ่ายโอนเข้ากริด 50 วัตต์ โดยการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power, S) จากอินเวอร์เตอร์ 72.5 โวลต์-แอมแปร์ และป้อนให้กับภาระ 25.5 วัตต์ และเมื่อกระแสกริดถูกบังคับให้ไหลเป็น -2 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าจะถูกถ่ายโอนเข้ากริด 100 วัตต์ โดยการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ 122.5 โวลต์-แอมแปร์ และป้อนให้กับภาระ 25.5 วัตต์

2) กรณีที่กริดถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปให้กับภาระและอินเวอร์เตอร์

ในกรณีนี้กระแสไฟฟ้าที่กริดจะถูกบีบบังคับให้มีเฟสการไหลของกระแสไฟฟ้ามีทิศทางร่วมกันกับเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่กริด ทำให้กำลังไฟฟ้าที่กริดมีค่าเป็นบวก และถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากกริดไปยังอินเวอร์เตอร์ โดยกำหนดให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดมีค่าเป็น 1 แอมแปร์ และ 2 แอมแปร์ ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 15 และ รูปที่ 16 และตารางบันทึกผลการทดลองที่ 2



รูปที่ 15 กระแสไหลผ่านกริดเป็น 1 แอมแปร์



รูปที่ 16 กระแสไหลผ่านกริดเป็น 2 แอมแปร์

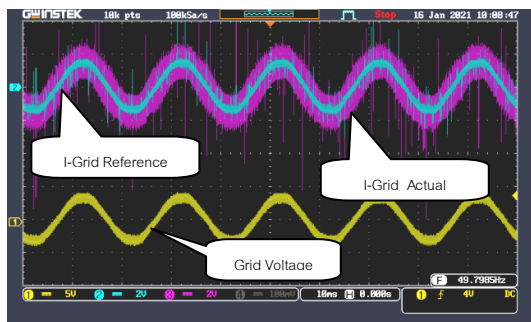
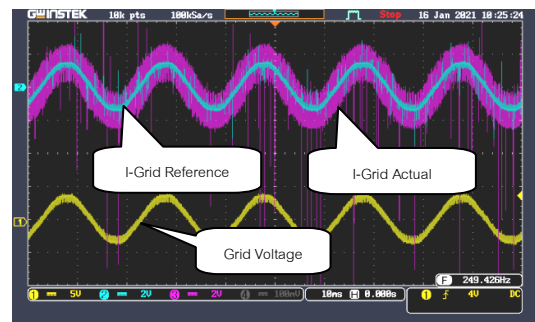
ตารางที่ 2 กรณีที่กริดถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปให้กับภาระและอินเวอร์เตอร์

R_{Load}	I_G (A)	V_G (V)	I_{INV} (A)	I_{Load} (A)	P_G (W)	S_{INV} (VA)	P_{Load} (W)
100 Ω	1	50	-0.65	0.51	50	-32.5	25.5
	2	50	-1.59	0.51	100	-79.5	25.5

จากตารางที่ 2 เมื่อกระแสกริดถูกบังคับให้ไหลเป็น 1 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าจะถูกถ่ายโอนจากกริด 50 วัตต์ บ้อนให้กับภาระ 25.5 วัตต์ และถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าปรากฏเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ 32.5 โวลต์-แอมแปร์ และเมื่อกระแสกริดถูกบังคับให้ไหลเป็น 2 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าจะถูกถ่ายโอนจากกริด 100 วัตต์ บ้อนให้กับภาระ 25.5 วัตต์ และถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ 79.5 โวลต์-แอมแปร์

3) กรณีที่กริดและอินเวอร์เตอร์ร่วมถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปให้กับภาระ

ในกรณีนี้กระแสไฟฟ้าที่กริดจะถูกบีบบังคับให้มีเฟสการไหลของกระแสไฟฟ้ามีทิศทางร่วมกันกับเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่กริด ทำให้กำลังไฟฟ้าที่กริดมีค่าเป็นบวก และถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากกริดไปยังภาระซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของภาระ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์จะถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปยังภาระเพื่อร่วมจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระ โดยกำหนดให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดมีค่าเป็น 1 แอมแปร์ ที่ค่าความต้านทานของภาระมีค่าเป็น 30 โอห์ม และ 20 โอห์ม ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 17 และ รูปที่ 18 และตารางบันทึกผลการทดลองที่ 3 โดยจะเห็นว่ารูปคลื่นที่แสดงในรูปที่ 17 และรูปที่ 18 นั้นเหมือนกัน อันเนื่องจากการบังคับให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดมีค่าเป็น 1 แอมแปร์ เท่ากัน

รูปที่ 17 กระแสไหลผ่านกริด 1 แอมแปร์ ที่ภาระ 30 Ω รูปที่ 18 กระแสไหลผ่านกริด 1 แอมแปร์ ที่ภาระ 20 Ω

ตารางที่ 3 กรณีที่กริดและอินเวอร์เตอร์ร่วมถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปให้กับภาระ

R_{Load}	I_G (A)	V_G (V)	I_{INV} (A)	I_{Load} (A)	P_G (W)	S_{INV} (VA)	P_{Load} (W)
30 Ω	1	50	1	1.65	50	50	82.5
20 Ω	1	50	1.72	2.45	50	86	122.5

จากตารางที่ 3 เมื่อกระแสกริดถูกบังคับให้ไหลเป็น 1 แอมแปร์ ที่ค่าความต้านทานของภาระ 30 โอห์ม กำลังไฟฟ้าจะถูกถ่ายโอนจากกริด 50 วัตต์ แต่ไม่เพียงพอจ่ายให้กับภาระ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์จึงต้องทำการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าปรากฏอีก 50 โวลต์-แอมแปร์ เพื่อร่วมจ่ายให้กับภาระเป็น 82.5 วัตต์ และเมื่อค่าความต้านทานของภาระเป็น 20 โอห์ม กำลังไฟฟ้าจะถูกถ่ายโอนจากกริด 50 วัตต์ แต่ไม่เพียงพอจ่ายให้กับภาระ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์จึงต้องทำการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าปรากฏอีก 86 โวลต์-แอมแปร์ เพื่อร่วมจ่ายให้กับภาระเป็น 122.5 วัตต์

สำหรับผลการทดลองจากการปรับค่าความกว้างของวงรอบกระแสฮิสเตอร์ซิส ให้มีค่ามากที่สุด และมีค่าต่ำที่สุด รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริด แสดงดังในรูปที่ 19 และรูปที่ 20 ตามลำดับ



รูปที่ 19 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดเมื่อความกว้างของวงรอบกระแสฮีสเตอร์ซิสส์ให้มีค่ามากที่สุด



รูปที่ 20 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดเมื่อความกว้างของวงรอบกระแสฮีสเตอร์ซิสส์ให้มีค่าน้อยสุด

จากรูปที่ 19 และรูปที่ 20 เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดเมื่อความกว้างของวงรอบกระแสฮีสเตอร์ซิสส์ถูกปรับให้เปลี่ยนไป ซึ่งจะส่งผลทำให้ระลอกคลื่นของกระแสไฟฟ้า (Current ripple) ที่ไหลผ่านกริดเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยที่ความกว้างของวงรอบกระแสฮีสเตอร์ซิสส์ถูกปรับให้มีค่าน้อยลง จะทำให้ระลอกคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริดลดลงด้วย แต่จะส่งผลความถี่ในการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นำมาสร้างอินเวอร์เตอร์สูงขึ้นด้วย และส่งผลให้การสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับมีมากขึ้นด้วย ซึ่งจากการทดลองไม่สามารถสังเกตเห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้

สรุป

วงจรที่ออกแบบมาสำหรับการสาธิตระบบเชื่อมต่อกกริดแรงดันต่ำเฟสเดียว ที่ได้นำเสนอในบทความนี้สามารถใช้สาธิตเพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า ที่จุดเชื่อมต่อกกริดได้อย่างมีประสิทธิภาพและจากผลการทดลอง พบว่าวงจรที่ออกแบบไว้สามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าที่กริดไป-มา ได้ไม่ต่ำกว่า 90 วัตต์ และสามารถศึกษาและสังเกตพฤติกรรมของการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าได้ทั้ง 3 กรณี โดยกรณีแรกได้แก่ การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ไปให้กับภาระและกริด กรณีที่สองคือการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากกริดไปให้กับภาระและอินเวอร์เตอร์ และในกรณีสุดท้ายคือกรณีที่กริดและอินเวอร์เตอร์ร่วมถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าไปให้กับภาระ นอกจากนั้นยังสามารถปรับความกว้างของวงรอบกระแสฮีสเตอร์ซิสส์ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระลอกคลื่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกริด รวมถึงความถี่ในการสวิตช์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่นำมาสร้างอินเวอร์เตอร์ โดยวิธีการที่ใช้ไม่ซับซ้อนมากนักและง่ายต่อการอธิบายถึงเหตุผลของการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของระบบเชื่อมต่อกกริด และเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่กริดเป็นแรงดันต่ำ ทำให้สามารถใช้อุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทนแรงดันต่ำมาใช้ในการสร้างวงจรเพื่อเชื่อมต่อกับกริดได้ ทำให้ต้นทุนในการสร้างระบบเชื่อมต่อกกริดถูกลง อีกทั้งหลักการและวิธีการที่นำเสนอในบทความนี้ยังสามารถนำไปพัฒนาให้ใช้กับระบบกริดที่มีแรงดันไฟฟ้าสูง ๆ ได้

นอกจากนั้น เมื่อถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าให้กับภาระและกริดรวมกันเป็น 125.5 วัตต์ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์มีค่าเป็น 134 โวลต์ และ 0.97 แอมแปร์ ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์มีค่าเป็น 130 วัตต์ และสามารถคำนวณประสิทธิภาพในการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองได้เป็น 96.5 %

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัท เค.บี.เอ็ม. เทคโนโลยี จำกัด ที่กรุณาช่วยทำแผ่นวงจรพิมพ์ ตามวงจรที่ได้ออกแบบไว้ทั้งหมด รวมทั้งประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ จนวงจรต่าง ๆ ทำงานได้อย่างถูกต้องตรงตามวัตถุประสงค์ พร้อมทั้งช่วยทำการทดลองและเก็บผลการทดลอง นำมาเขียนในบทความฉบับนี้ จนสำเร็จลุล่วงด้วยเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] คัดค้านรัฐ ขึ้นวงจรถ. เชื้อเพลิงฟอสซิล. สืบค้น 25 มกราคม 2564 จาก <https://ngthai.com/science/26108/fossil-fuel>
- [2] บุญเรือง วงศ์ลาวัตร. (2559). วงจรไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน).
- [3] Rameen AbdelHady. *Modeling and Simulation of a micro grid-connected solar PV system*. Water Science ScienceDirect. ISSN: (Print) 1110-4929 (Online). DOI: 10.1016/j.wsj.2017.04.001. (2017)
- [4] Abhijit R. Singare and Bharati Mahindrakar. *A Case Study on Implementation of Grid Connected Photovoltaic System for an Institutional Campus, Wardha*. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Volume: 04 Issue: 04. (2017)
- [5] Vu Minh Phap. *Study on Grid Connected Photovoltaic System Using PSIM Program*. International Journal of Science and Research (IJSR). ISSN:2319-7064. (2018)
- [6] Srikanth Sattenapalli and V.Joshi Manohar. *Reaearch on Single-Phase Grid Connected PV System*. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). ISSN:2249-8958. (2019)
- [7] Patrice Wira. *Hysteresis Current Controller (HCC) Operation waveform*. สืบค้น 25 มกราคม 2564 จาก https://www.researchgate.net/figure/Hysteresis-Current-Control-HCC-operation-waveform_fig1_241626615
- [8] Remon Das. *Proportional Integral (PI) Controller block diagram*. สืบค้น 26 มกราคม 2564 จาก https://www.researchgate.net/figure/Proportional-Integral-PI-Controller-block-diagram_fig4_321743587
- [9] Kamil Orman. *Schematic diagram for PI controller using operational amplifier*. สืบค้น 26 มกราคม 2564 จาก https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-for-PI-controller-using-operational-amplifier_fig2_338104251
- [10] EEUGUIDE.COM. *Schmitt Trigger Circuit Diagram*. สืบค้น 26 มกราคม 2564 จาก <https://www.eeeguide.com/schmitt-trigger-circuit-diagram>