

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สู่ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าย่อยแบบประหยัด

An Economical System for the Electric Power Transfer from PV Cell to Substation

เลิศพันธ์ เพียรสร้างสรร¹, สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐนันท์^{2*}

Leardpan Piansangsan¹, Singthong Pattanasetthanon^{2*}

Received: 1 March 2013 ; Accepted: 5 May 2013

บทคัดย่อ

การนำพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์สำหรับบ้านพักอาศัยทั่วไป จะต้องมีการแปลงรูปพลังงานจากไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับก่อน เพื่อให้สามารถนำมาใช้ร่วมกับเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านและสามารถเชื่อมต่อได้กับระบบจ่ายกำลังของการไฟฟ้า สำหรับหลักการของการเชื่อมต่อกับระบบจ่ายกำลังที่นิยมคือ การสร้างระดับแรงดันของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงกว่าแรงดันระบบของการไฟฟ้าและแยกกันทางไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบจ่ายกำลังของการไฟฟ้า โดยอาศัยพื้นฐานทางทฤษฎีของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ด้วยวิธีการเปลี่ยนความต้านทานของสายส่งให้ปรากฏในรูปของคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ แล้วปรับมุมเฟสของแรงดันให้มีความต่างเฟสจากระบบของการไฟฟ้าเป็นมุม -90 องศา ทำให้เกิดการไหลของกำลังไฟฟ้าไปยังระบบของการไฟฟ้าได้สูงสุด โดยไม่จำเป็นต้องสร้างแรงดันต้านออกจากอินเวอร์เตอร์ให้มีระดับสูงกว่าแรงดันระบบของการไฟฟ้า จึงประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้างวงจร

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์ ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์

Abstract

Solar energy converted by photovoltaic (PV) cells is used in households. The DC power must be converted to AC power, which is then able to connect with the utility grid system. The general method of transferring electric power from a PV system to the grid, involves having to step-up the AC voltage to a level higher than the grid voltage, and then coupling them together by a transformer. This paper proposes a design concept of an economic inverter for grid connected photovoltaic system. By giving the value of the capacitor whose impedance corresponds to the line, the maximum power is able to be transferred by giving a 90 degree phase lag between voltages, so that the PV system does not need to step up output voltage level. The advantage of this technique is the ability to save the cost of transferring the PV cell power to the high voltage grid system.

Keywords: solar cell, distribution system, inverter

¹ นักศึกษาระดับปริญญาเอก, ² รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150,

¹ Doctoral degree Student, ² Associate Professor, Department of Electrical and Computer Engineer, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand

* Corresponding author; Singthong Pattanasetthanon, Department of Electrical and Computer Engineer, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150 Thailand singthong.p@msu.ac.th

บทนำ

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเชื้อเพลิงชีวภาพมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งแปรผกผันกับความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นเหตุผลถึงความจำเป็นในการหาพลังงานทดแทนอื่นๆ เพื่อนำมาทดแทนพลังงานชีวภาพ พลังงานจากแสงอาทิตย์สามารถนำมาแปลงรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อการทดแทนได้ และนับวันประสิทธิภาพในการแปลงรูปก็ได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้น ในราคาที่ถูกลง

การนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้งานตามบ้านพักอาศัยนั้น สามารถที่จะออกแบบระบบได้หลายรูปแบบ ใน Figure 1 แสดงโครงสร้างของระบบการเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้า¹ รูปแบบหนึ่งที่ได้รับการนิยม เนื่องจากสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบส่งจ่ายกำลังของการไฟฟ้าได้

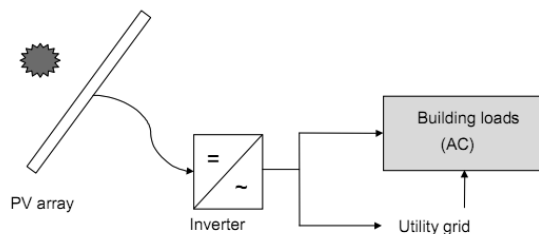


Figure 1 Grid-Tie connection photovoltaic system¹

ใน Figure 1 เซลล์แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์ซึ่งทำหน้าที่แปลงรูปไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่เดียวกันกับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อได้และใช้ร่วมกับเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยเครื่องใช้ไฟฟ้าสามารถรับกำลังไฟฟ้าได้ทั้งจากอินเวอร์เตอร์และกำลังไฟฟ้าจากระบบส่งจ่าย ขึ้นอยู่กับปริมาณความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า หลักการของการเชื่อมต่อคือการสร้างแรงดันต้านออกจากอินเวอร์เตอร์ให้สูงกว่าแรงดันจากระบบส่งจ่ายแล้วแยกกันทางไฟฟ้าด้วยหม้อแปลง

แต่จากพื้นฐานของทฤษฎีของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้น พลังงานสามารถส่งจ่ายระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้าได้ด้วยการปรับมุมเฟสของแรงดันให้มีความต่างเฟสกัน ซึ่งไม่จำเป็นที่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองต้องมีแรงดันที่เท่ากัน การนำหลักการพื้นฐานนี้มาประยุกต์ใช้กับการส่งจ่ายกำลังจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังระบบจ่ายกำลังหลักจึงทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้างวงจรเพิ่มระดับแรงดัน ทฤษฎีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาเครื่องจักรกลเชิงโรนัส 2 ตัวที่ต่อกันผ่านสายส่งดังแสดงใน Figure 2 เครื่องจักรทำงานด้วยความเร็วคงที่ กำลังไฟฟ้าที่จะถูกส่งจากเครื่องจักรตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่งจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยอันได้แก่ แรงดันพร้อมด้วยค่ามุมเฟสของเครื่องจักรแต่ละตัว และค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง²

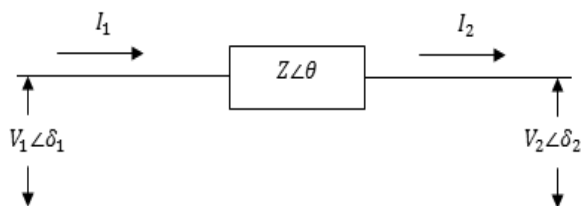


Figure 2 Equivalent circuit of power transmission

จาก Figure 2 เป็นแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อใช้อธิบายการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า สายส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งปกติจะมีค่าเป็นผลรวมของความต้านทาน R กับรีแอ็กแตนซ์ X โดยอิมพีแดนซ์รวมของสายส่งมีค่าเป็น $Z\angle\theta$ โอห์ม เมื่อกระแสไหลจากเครื่องจักรที่ 1 ไปยังเครื่องจักรที่ 2 ดังนั้นการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจึงเกิดขึ้นได้จากความแตกต่างของขนาดและ/หรือมุมเฟสของแรงดันระหว่างเครื่องจักรทั้งสอง สมการความแตกต่างเฟสระหว่างเครื่องจักรมีค่าเป็น

$$\delta_1 - \delta_2 = \delta_{12} \quad (1)$$

หรือ

$$\delta_2 - \delta_1 = \delta_{21} \quad (2)$$

กำลังไฟฟ้าที่เครื่องจักรที่ 1 ส่งออกมีสมการเป็น

$$P_1 = \frac{V_1^2}{Z} \cos \theta - \frac{V_1 V_2}{Z} \cos(\delta_{12} + \theta) \quad (3)$$

กำลังไฟฟ้าที่เครื่องจักรที่ 2 รับมามีสมการเป็น

$$P_2 = \frac{V_2^2}{Z} \cos \theta - \frac{V_1 V_2}{Z} \cos(\delta_{21} - \theta) \quad (4)$$

เมื่อมุม $\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R}$ องศา

หากความต้านทาน R ของสายส่งมีค่าน้อยมากจนสามารถละเลยได้ จะทำให้กำลังของเครื่องจักรตัวที่ 1 และ 2 มีสมการเป็นดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$P_1 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12} \quad (5)$$

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{21} \quad (6)$$

เมื่อ $\delta_1 > \delta_2$ จะได้กำลังของเครื่องจักรตัวที่ 1 มีค่าเป็นบวกในขณะที่กำลังของเครื่องจักรที่ 2 จะมีค่าเป็นลบ จากสมการเห็นได้ว่าค่ารีแอคแตนซ์ในสายส่งมีความสำคัญต่อการส่งจ่ายกำลังและกำลังที่ส่งจ่ายจะมีค่ามากที่สุดเมื่อแรงดันต่างเฟสกัน 90 องศา ดังกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่างเฟสกับกำลังไฟฟ้าใน Figure 3 โดยกำหนดให้เครื่องจักรซิงโครนัสตัวที่ 1 จ่ายกำลังออกเป็น P_1 และเครื่องจักรซิงโครนัสตัวที่ 2 ได้รับความกำลังเป็น P_2 เครื่องจักรตัวที่ 1 สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาด้วยมุมต่างเฟสของแรงดันใดๆ เช่นเดียวกันเครื่องจักรที่ 2 ก็จะได้รับกำลังไฟฟ้าด้วยมุมต่างเฟสของแรงดันใดๆ แต่จะสามารถจ่ายและรับด้วยกำลังไฟฟ้ามากที่สุดเมื่อมุมต่างเฟสของแรงดันต่างกัน 90 องศา

จากทฤษฎีที่กล่าวมา หากเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งจากเดิมซึ่งอยู่ในรูปของอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ XL ให้มาอยู่ในรูปของคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ XC เพื่อลดค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ของสายส่งระหว่างจุดเชื่อมต่อ⁴ และควบคุมแรงดันด้านออกจากอินเวอร์เตอร์ให้มีมุมเฟสลาหลังมุมเฟสของแรงดันระบบของการไฟฟ้าก็สามารถทำให้กำลังไฟฟ้าส่งผ่านจากเครื่องจักรตัวที่ 1 ไปยังเครื่องจักรตัวที่ 2 ได้เช่นเดียวกัน ใน Figure 4 แสดงเฟสเซอร์ของแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ

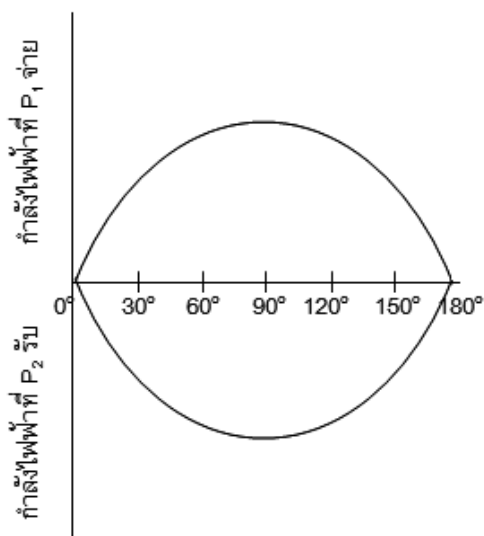


Figure 3 The relation between power and phase angle of system voltages

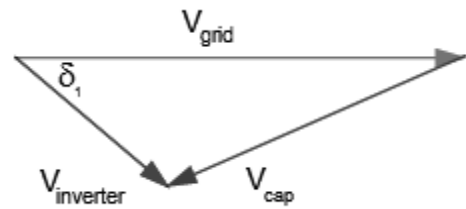


Figure 4 Phasor Diagrams of system voltage

จาก Figure 4 หากปรับมุมเฟสของแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ไปเป็นมุม -90 องศา ก็สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังระบบของการไฟฟ้าได้สูงสุด แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

เมื่อกำหนดให้สายส่งมีค่าอิมพีแดนซ์ $Z \angle -\theta$ โห์ม จึงทำให้ได้ $\theta = \tan^{-1} \frac{-X}{R}$ องศา โดยที่ R มีค่าน้อยมากจนสามารถละเลยได้

กำลังไฟฟ้าที่เครื่องจักรที่ 1 ส่งออกมีสมการเป็น

$$P_1 = \frac{V_1 V_2}{-X} \sin(-90) = \frac{V_1 V_2}{X} \quad (7)$$

กำลังไฟฟ้าที่เครื่องจักรที่ 2 รับมามีสมการเป็น

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin 90 = -\frac{V_1 V_2}{X} \quad (8)$$

เห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรที่ 1 มีค่าเป็นบวก และเครื่องจักรที่ 2 ให้กำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นลบ แสดงว่าเกิดการไหลของกำลังไฟฟ้าจากเครื่องจักรที่ 1 ไปยังเครื่องจักรที่ 2 การออกแบบและจำลองการทำงาน

ระบบโดยรวมของการทำงานแสดงดัง Figure 5 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่รับแสงอาทิตย์แล้วแปลงรูปเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์ โดยงานวิจัยนี้กำหนดใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 3 แผงๆ ละ 17.4 V

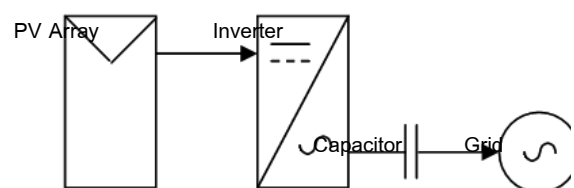


Figure 5 Purpose system configurations

Figure 5 อินเวอร์เตอร์เมื่อรับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงมาแล้วจะแปลงรูปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่เดียวกันกับจุดจ่ายกำลังของการไฟฟ้าโดยควบคุมให้มีเฟสลาหลังไป 90 องศาแล้วจึงส่งพลังงานไฟฟ้าต่อไปยังจุดจ่ายกำลังของการไฟฟ้าโดยผ่านตัวคาปาซิเตอร์จำลองการทำงานระบบด้วยโปรแกรม PSIM โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดัง Table 1

Table 1 System properties

Parameter	Value
1. PV voltage	52.2 V
2. PWM frequency	20 kHz
3. Line voltage	220 V _{rms}
4. Line frequency	50 Hz
5. Capacitor	22 μ F
6. Power	150 W

ใน Figure 6 เป็นวงจรที่จำลองขึ้นเพื่อการทดลอง แรงดันที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่า 52.2 V_{dc} สัญญาณพัลส์วิดมอดูเลตชันที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์จะถูกกรองความถี่ต่ำด้วยฟิลเตอร์ ประกอบด้วยอินดักเตอร์ขนาด 13mH และคาปาซิเตอร์ขนาด 22 mF สายส่งมีรูปแบบเป็นคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์

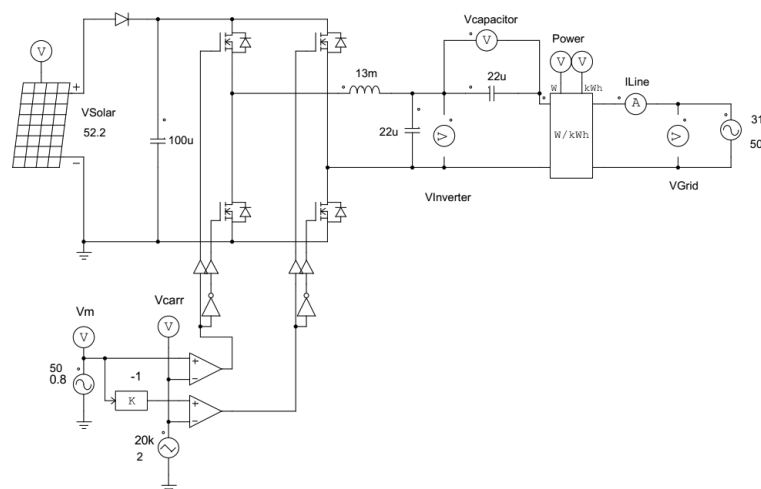


Figure 6 Purpose circuit simulations by PSIM

ผลการทดลอง

กราฟที่ได้จากการจำลองการทำงานแสดงดัง Figure 7

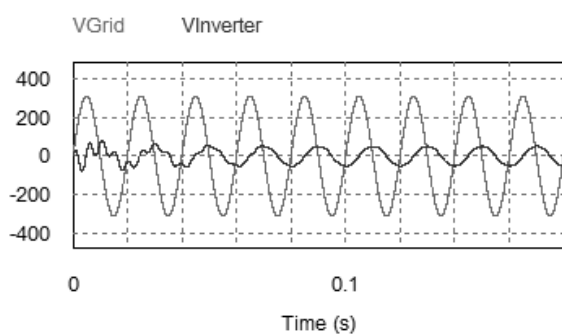


Figure 7 Inverter voltage signal and line voltage

ใน Figure 7 แรงดันด้านออกจากอินเวอร์เตอร์ ($V_{Inverter}$) มีขนาดเท่ากับ 37 V_{rms} และมีเฟสลาหลังแรงดันที่จุดจ่ายกำลังของการไฟฟ้า (V_{Grid}) ซึ่งมีขนาด 220 V_{rms} อยู่ 90 องศา

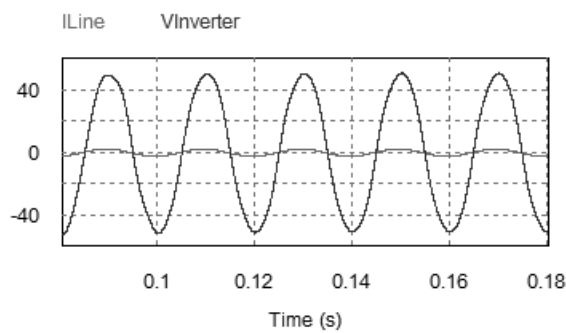


Figure 8 Current and voltage signal of line

ใน Figure 8 กระแสที่ไหลเข้าสู่จุดจ่ายกำลังของการไฟฟ้า (I_{Line}) มีขนาดเท่ากับ $1.6 A_{rms}$ และมีเฟสใกล้เคียงกับเฟสของแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ($V_{Inverter}$) ใน Figure 9 กราฟรูปคลื่นกำลังไฟฟ้ามี่ค่าเฉลี่ย 60 W และมีค่าเป็นบวกแสดงให้เห็นว่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ไปสู่จุดจ่ายกำลังของการไฟฟ้า

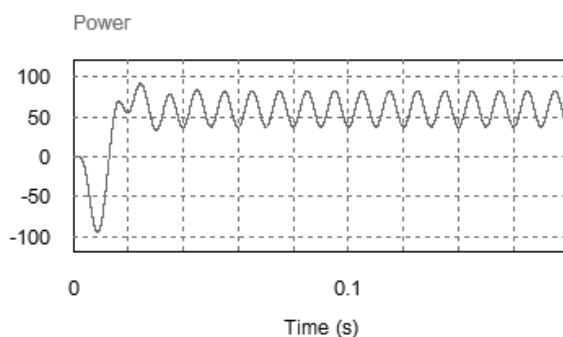


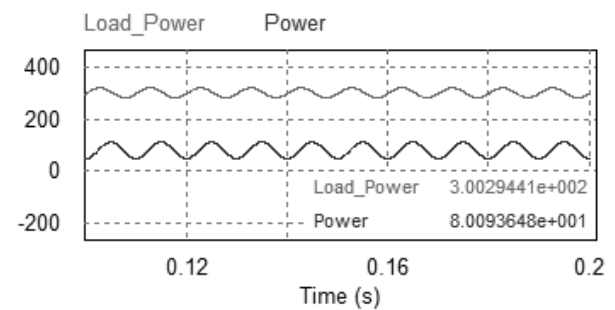
Figure 9 Power transferred from inverter to line

ทดลองวัดมุมต่างเฟสระหว่างกระแสในสายส่ง (I_{Line}) กับแรงดันออกจากจุดอินเวอร์เตอร์ ($V_{Inverter}$) โดยใช้โหลดตัวต้านทาน 4 ขนาด ได้แก่ 10W, 60W, 110W และ 160W แสดงผลใน Table 2

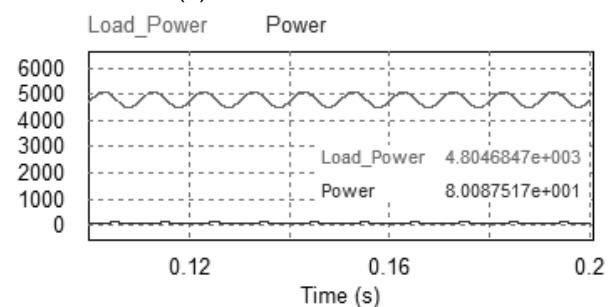
Table 2 The phase angle between the current and voltage relate to load value

Load value	Phase angle
160Ω	-33
110Ω	-45
60Ω	-64
10Ω	-85

จาก Table 2 เมื่อโหลดมีค่าความต้านทานต่ำลงหรือมีความต้องการกำลังไฟฟ้ามักขึ้น จะทำให้ผลต่างเฟสของกระแสในสายส่งล้าหลังแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์มากยิ่งขึ้น หมายความว่ากำลังไฟฟ้าที่จุดจ่ายของการไฟฟ้าต้องจ่ายกำลังให้โหลดเพิ่มขึ้น ใน Figure 10 แสดงให้เห็นความแตกต่างของความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของโหลด 2 ขนาด



(a) Load resistance 160 W



(b) Load resistance 10 W

Figure 10 Signal of power transferred, line current and inverter voltage with varying of load resistance

ใน Figure 10 แสดงให้เห็นว่าในสภาวะความแตกต่างของโหลดตัวต้านทาน ซึ่งทำให้ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า (Load_power) ต่างกัน แต่กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าโดยชุดของอินเวอร์เตอร์ (power) ยังคงมีค่าคงที่

สรุปผล

งานวิจัยนี้นำเสนอถึงแนวทางการออกแบบระบบเชื่อมต่อกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สู่ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าย่อยแบบประหยัด โดยไม่ต้องเพิ่มระดับแรงดันในส่วนของชุดเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่ามากกว่าแรงดันของการไฟฟ้า จึงทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการออกแบบสร้างวงจรเพื่อทำหน้าที่ในส่วนนี้ เหมาะสำหรับสร้างชุดส่งกำลังขนาดเล็กสำหรับบ้านพักอาศัยทั่วไป

ด้วยการควบคุมมุมเฟสของแรงดันที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ให้ล้าหลังมุมเฟสของแรงดันของการไฟฟ้าอยู่เท่ากับ 90 องศาและสร้างให้อิมพีแดนซ์ระหว่างจุดส่งกับจุดรับกำลังไฟฟ้าอยู่ในรูปของคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ จะทำให้สามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด การเพิ่มกำลังสามารถทำได้ด้วยการ

ต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรมเข้าไปได้โดยไม่ต้องออกแบบวงจรเพิ่มเติม จากทฤษฎีที่กล่าวไว้แล้วนั้นแม้ว่าการเพิ่มค่าคาปาซิเตอร์ให้สูงขึ้นจะทำให้ได้กำลังในการส่งมากขึ้น แต่ต้องคำนึงถึงฮาร์โมนิกส์ในระบบที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการเลือกวงจรรองความถี่ต่ำจึงมีความสำคัญตามมาโดยต้องไม่ทำให้ค่า THD เกินมาตรฐาน

เอกสารอ้างอิง

1. Nicola M, Robert H. Photovoltaic modules, systems and applications. In: M.D. Archer, R. Hill, editors. Clean Electricity from Photovoltaics. London, UK: Imperial College Press; 2001. p.671-711.
2. Mohamed E. El. Electrical energy systems. Boca Raton: CRC Press; 2001.
3. Alexandra V.M. Electric power systems: a conceptual introduction. New York: John Wiley & Sons; 2006.
4. Debapriya D. Electrical Power Systems. New Delhi: New Age International; 2006.