

บทความวิจัย

การดำเนินงานด้วยดีสเปซสำหรับควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์สามเฟส 2 กิโลวัตต์
เชื่อมต่อระบบกริดการไฟฟ้า

dSPACE Implementation for Power Flow Control of 2 kW Grid Connected Three-Phase Inverter

จักรพงษ์ จารุมิตร* บุญเรือง วังศิลาบัตร และ เสถียร ธัญญศรีรัตน์

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

833 ถ.พระราม 1 เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทรศัพท์ 0-2215-3861 ต่อ 284 E-mail: ch_charumit@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า 2 กิโลวัตต์ ซึ่งประกอบไปด้วยกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้ากับระบบกริดไฟฟ้าโดยใช้อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริดไฟฟ้าควบคุมด้วยคำสั่งกระแส ด้วยหลักการของการควบคุมแอมพลิจูดรีซีตคองที่ เทคนิคการควบคุมกำลังไฟฟ้านี้เป็นการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยควบคุมกำลังไฟฟ้าทั้งสองอย่างอิสระโดยใช้ทฤษฎีพี-คิว ซึ่งถูกคำนวณอยู่ในกรอบอ้างอิงแกนนิ่ง ในการประมวลผลสัญญาณเชิงดิจิทัลนั้นใช้ DSP เบอร์ TMS320F240 โดยใช้งานผ่านการ์ดอินเตอร์เฟซแบบทันเวลา dSPACE DS1104 จากผลการจำลองและการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังระบบกริดไฟฟ้า

คำสำคัญ อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบควบคุมกระแส

Abstract

This paper proposes the power flow control technique for 2kW grid connected three-phase inverter. Power flows consist of the active and the reactive power controlled by current control voltage source inverter or hysteresis current control. The active and the reactive power are independently open loop controlled in term of stationary reference frame or P-Q theory. The overall system is implemented on a real-time DSP TMS320F240 board via dSPACE DS1104 interface card. The simulation and the experimental results indicate that the system can transfer electrical power to grid.

Keywords: grid connected inverter, current control.

1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานหลักที่ได้จากพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลมีแนวโน้มว่ามีปริมาณลดลงและอาจจะหมดลงอีกไม่กี่ปีข้างหน้า ซึ่งผลกระทบจากการใช้พลังงานนี้ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อนส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและการอยู่อาศัยของประชากร ในปัจจุบันได้มีการคิดค้นพลังงานทดแทนตัวอย่างเช่น พลังงานที่ได้จากลมและพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานดังกล่าวนี้เป็นพลังงานหมุนเวียนที่ใช้ไม่หมด โดยเทคโนโลยีของการนำพลังงานทดแทนมาแปลงเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับใช้งานจ่ายให้กับภาระโหลด ได้มีการพัฒนาและขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างเช่น การนำพลังงานลมนำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริดไฟฟ้า (Point of Common Coupling: PCC) วัดอุปสงค์เพื่อช่วยลดปริมาณกำลังไฟฟ้าจากระบบแหล่งจ่ายการไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระโหลด หรือในกรณีที่ระบบมีการผลิตพลังงานทดแทนเกินความจำเป็น ซึ่งกำลังไฟฟ้าในส่วนที่ผลิตออกมานี้จะถูกป้อนกลับไปยังระบบแหล่งจ่ายการไฟฟ้า

การนำระบบดังกล่าวมาใช้งานในปัจจุบันได้รับความนิยมค่อนข้างสูงเพราะระบบไม่จำเป็นที่จะต้องมีชุดแบตเตอรี่สำรองพลังงาน ซึ่งจะแตกต่างกับระบบจ่ายโหลดแบบแยกเดี่ยวตรงที่จำเป็นจะต้องใช้ชุดแบตเตอรี่สำรองพลังงานอยู่ตลอดเวลา นอกจากนี้ส่วนสำคัญในการแปลงพลังงาน คือ ส่วนของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าส่งถ่ายไปยังภาระโหลดหรือป้อนคืนกลับเข้าสู่ระบบแหล่งจ่ายการไฟฟ้า [1]

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในเรื่องของการเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริดไฟฟ้า โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์สามารถแบ่งออกตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 แบบ คือ 1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage-source inverter: VSI) ซึ่งมีตัวเก็บประจุต่อขนานที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current source inverter: CSI) จะมีตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งอินเวอร์เตอร์ที่นิยมนำมาใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน และการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ยังสามารถแบ่งได้อีก 2 แบบ คือการควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage control inverter: VCI) และการควบคุมด้วยกระแส (Current control inverter: CCI)

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบการควบคุมฮิสเทรีซิส (Hysteresis control) โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบกระแสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์กับกระแสอ้างอิงรูปคลื่นไซน์ในการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ โดยวิธีการดังกล่าว ทำให้โครงสร้างของระบบควบคุมมีความง่ายและให้ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดค่อนข้างดี แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีนี้จะไม่คงที่ ส่งผลทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสสูง นอกจากนี้ได้แสดงหลักการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า โดยใช้การจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink และได้ทำการทดสอบชุดฮาร์ดแวร์ต้นแบบ เพื่อให้เข้าใจพื้นฐานการนำพลังงานทดแทนเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริดไฟฟ้า

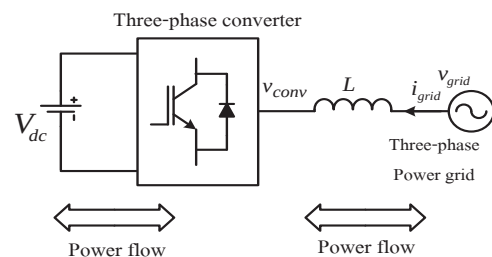
2. อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เชื่อมต่อระบบกริดไฟฟ้า

ในการเปลี่ยนพลังงานทดแทนให้เป็นพลังงานไฟฟ้านั้นนิยมใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรแปรรูปพลังงาน โดยคอนเวอร์เตอร์นี้ด้านหนึ่งต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าดีซี ซึ่งอาจรับพลังงานมาจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานลม และอีกด้านจะต้องอยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับของการไฟฟ้า ซึ่งอาจจะเป็นระบบกริดไฟฟ้าหนึ่งเฟสหรือสามเฟส ดังแสดงตามรูปที่ 1 ซึ่งเป็นคอนเวอร์เตอร์แบบสวิตช์โหมด การทำงานของคอนเวอร์เตอร์นั้นแบ่งออกเป็น 2 สถานะ คือ การทำงาน

ในสถานะเรียงกระแส (Rectifier) คือ การส่งกำลังไฟฟ้าจากด้านเอซีไปยังด้านดีซี และการทำงานในสถานะอินเวอร์เตอร์ (Inverter) คือ การส่งกำลังไฟฟ้าจากด้านดีซีไปยังด้านเอซี [2]

2.1 พื้นฐานหลักการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 1 กำหนดให้คอนเวอร์เตอร์ทำงานในสถานะเรียงกระแสตามกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์จะได้ว่า



รูปที่ 1 คอนเวอร์เตอร์เชื่อมต่อระบบกริดไฟฟ้า

$$v_{grid} = v_{conv} + v_L \quad (1)$$

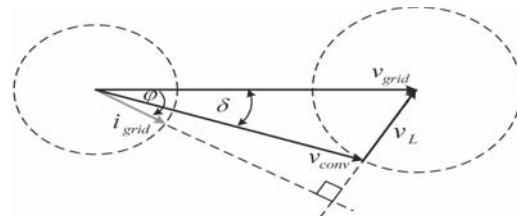
เมื่อ

v_{grid} คือ แรงดันที่ระบบกริดไฟฟ้า

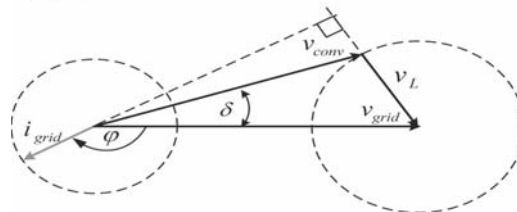
v_{conv} คือ แรงดันด้านเอซีของคอนเวอร์เตอร์

v_L คือ แรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

ในสถานะเรียงกระแสเขียนเวกเตอร์แรงดันได้ตามรูปที่ 2 (ก) เมื่อมุม φ เป็นมุมระหว่างแรงดันและกระแสของแหล่งจ่ายการไฟฟ้าซึ่งอยู่ในช่วง $0-90$ องศา และ มุม δ เป็นมุมระหว่างแรงดันของกริดไฟฟ้ากับแรงดันเอซีของคอนเวอร์เตอร์ [2]



(ก) เวกเตอร์แรงดันและกระแสในสถานะเรียงกระแส



(ข) เวกเตอร์แรงดันและกระแสในสถานะอินเวอร์เตอร์

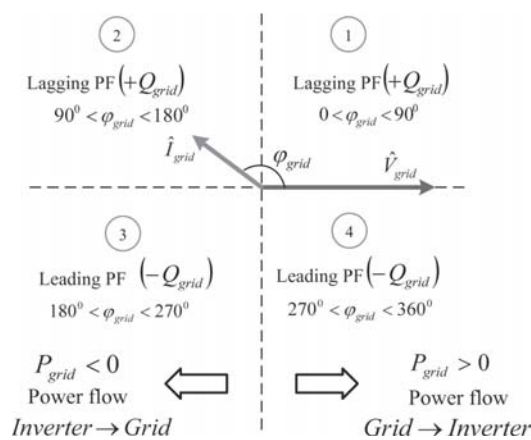
รูปที่ 2 การกำหนดทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า

เมื่อกำหนดให้แรงดันการไฟฟ้าเป็นแรงดันอ้างอิงมีค่าคงที่ $v_{grid} = \hat{V}_{grid} e^{j0}$ ที่ความถี่การไฟฟ้าเท่ากับ $\omega = 2\pi f$ จากเวกเตอร์แรงดันในรูปที่ 2(ก) ซึ่งมีกระแสล่าหลังแรงดันเป็นมุม ϕ กำลังไฟฟ้าจริง (Active power) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power) ที่ไหลเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์มีค่าตามสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$P = \frac{V_{grid}^2}{\omega L} \left(\frac{V_{conv}}{V_{grid}} \sin \delta \right) \quad (2)$$

$$Q = \frac{V_{grid}^2}{\omega L} \left(1 - \frac{V_{conv}}{V_{grid}} \cos \delta \right) \quad (3)$$

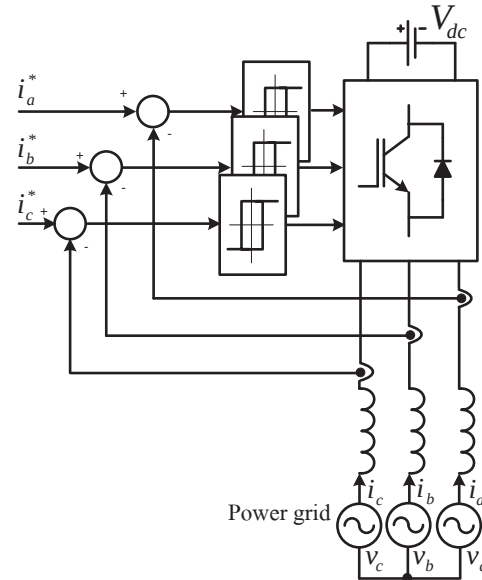
จากสมการกำลังไฟฟ้า P และ Q สามารถควบคุมปริมาณกำลังไฟฟ้าทั้งสองด้วยการควบคุมขนาดและมุมเฟสของแรงดัน v_{conv} ที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) โดยกำหนดให้แรงดัน v_{grid} และกระแส i_{grid} มีค่าคงที่ การกำหนดการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2 (ข) ถูกกำหนดด้วยการปรับขนาดของ v_{conv} และมุมเฟส δ เป็นผลทำให้กระแส i_{grid} มีมุมเฟสล่าหลังมากกว่า 90 องศา ทำให้กำลังไฟฟ้าไหลจากแหล่งจ่ายไฟตรงไปยังการไฟฟ้า ซึ่งในการควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าใน 4 ควอเตอร์แดนซ์ศึกษาได้จากรูปที่ 3 โดยควอเตอร์แดนซ์ที่ 1 และ 4 กำลังไฟฟ้าไหลจากกริดไปยังอินเวอร์เตอร์ และควอเตอร์แดนซ์ที่ 2 และ 3 กำลังไฟฟ้าไหลจากอินเวอร์เตอร์ไปยังกริด



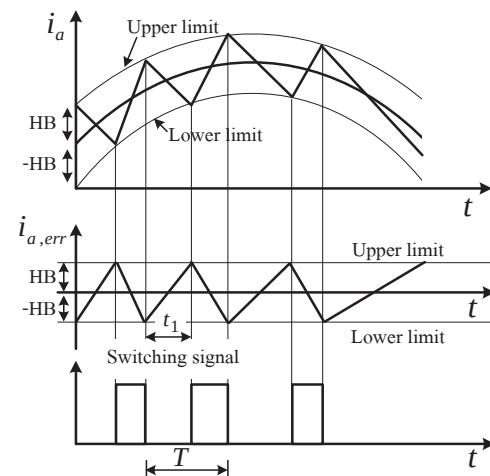
รูปที่ 3 การควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า

2.2. การควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดัน

การควบคุมกระแสสำหรับอินเวอร์เตอร์จ่ายแรงดัน มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งในบทความนี้ นำเสนอการควบคุมกระแสแบบแถบฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis band, HB) ดังแสดงตามรูปที่ 4 โดยกำหนดให้กระแส i_a^*, i_b^* และ i_c^* เป็นกระแสอ้างอิงและกระแส i_a, i_b และ i_c เป็นกระแสจริงที่ได้จากการตรวจจับกระแสทางด้านเอชของชุดอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4 การควบคุมกระแสแบบแถบฮิสเตอร์รีซิสคงที่



รูปที่ 5 กระแสอ้างอิงและกระแสจริงในแถบฮิสเตอร์รีซิสและสัญญาณการจับสวิตช์

จากนั้นนำกระแสที่ได้จากการตรวจจับมาทำการเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิงทั้งสามเฟส ตัวอย่างเช่น สัญญาณกระแส $i_{a,err}$ ได้จากการเปรียบเทียบที่เฟสเอ จากนั้นนำสัญญาณผ่านเข้ากับฮิสเตอร์รีชีตส์เพื่อทำการกำหนดสัญญาณการขับสวิตช์จากรูปที่ 5 เมื่อสัญญาณ $i_{a,err}$ มีค่าสูงขึ้นจนถึงขอบด้านบนของแถบ +HB สัญญาณเอาต์พุตของวงจรฮิสเตอร์รีชีตส์มีค่าเป็นบวก หมายถึง สวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์นำกระแส ในทางกลับกัน สัญญาณ $i_{a,err}$ มีค่าต่ำลงจนถึงขอบด้านล่างของแถบ -HB สัญญาณเอาต์พุตของวงจรฮิสเตอร์รีชีตส์มีค่าเป็นศูนย์ หมายถึงสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์หยุดนำกระแส โดยที่กระแสจริงที่ไหลในวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้จะเกาะติดตามกระแสอ้างอิง และมีค่าอยู่ในขอบเขตของแถบฮิสเตอร์รีชีตส์อยู่ตลอดเวลา ดังแสดงตามรูปที่ 5 ช่วงเวลาที่สวิตช์หยุดนำกระแส t_1 คำนวณได้จาก $\frac{di}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{dc} - V_{grid}}{L} = \frac{\Delta I}{\Delta T}$ และ ΔT มีค่าเท่ากับ

$$\Delta T = \frac{\Delta I L}{V_{dc} - V_{grid}} \quad (4)$$

เมื่อ กำหนดให้ ΔI มีค่าเท่ากับ 2HB ดังนั้น ช่วงเวลาที่สวิตช์หยุดนำกระแส คือ

$$t_1 = \frac{(2HB)L}{V_{dc} - V_{grid}} \quad (5)$$

และช่วงเวลาสวิตช์นำกระแส คือ

$$T - t_1 = \frac{(-2HB)L}{-V_{dc} - V_{grid}} \quad (6)$$

และความถี่ในการสวิตช์มีค่าเท่ากับ

$$f_{sw} = \frac{1}{T} = \frac{V_{dc}^2 - V_{grid}^2}{4(HB)LV_{dc}} \quad (7)$$

ความถี่ในการสวิตช์มีค่าสูงสุดเมื่อ $V_{grid} = 0$ ดังนั้น

$$f_{sw,max} = \frac{V_{dc}}{4(HB)L} = \frac{0.25V_{dc}}{(HB)L} \quad (8)$$

จากสมการช่วงเวลาในการสวิตช์ในสมการที่ (8) พบว่าช่วงเวลาของการสวิตช์นั้นไม่คงที่ ซึ่งมีหลายปัจจัย เช่น ขึ้นอยู่

กับรูปคลื่นของแรงดันอ้างอิง หรือการกำหนดความกว้างของแถบฮิสเตอร์รีชีตส์ ขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าความชันของกระแส และขนาดของแรงดันดิซิปัส [3,4]

2.3 การควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมกระแส

บทความนี้นำเสนอหลักการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมกระแส โดยการคำนวณขนาดของกระแสในกรอบอ้างอิงแกนนิ่ง (Stationary reference frame) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการคำนวณกำลังไฟฟ้าชั่วขณะในทฤษฎี P-Q (P-Q Theory) ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงแกนนิ่งนี้ ถูกคำนวณมาจากระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยถูกแปลงให้อยู่ในระนาบเชิงซ้อน (Complex plane) ประกอบด้วยแกนจริง α และแกนจินตภาพ β กำลังไฟฟ้าชั่วขณะนี้มีค่าเท่ากับผลรวมของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ 3 เฟส ซึ่งกำหนดให้แรงดันและกระแสลำดับศูนย์มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นกำลังไฟฟ้าปรากฏมีค่าเท่ากับ [5]

$$S = vi^* = P + jQ \quad (9)$$

แยกองค์ประกอบในกรอบอ้างอิงแกนนิ่งมีค่าเท่ากับ

$$S = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) + j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \quad (10)$$

การคำนวณกระแสอ้างอิงตามหลักการของการคำนวณ

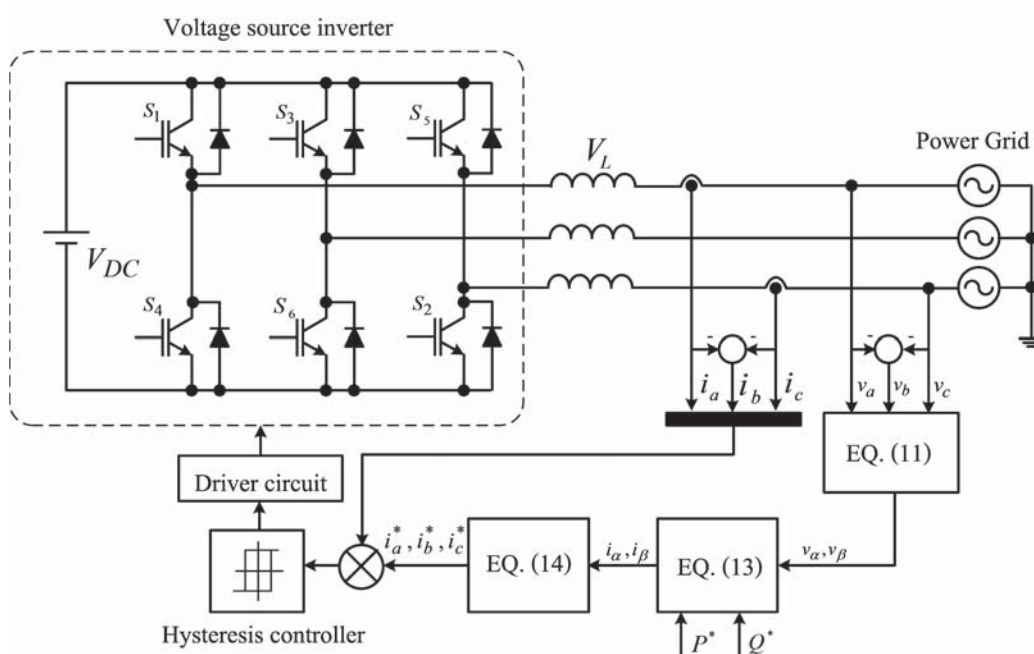
กำลังไฟฟ้าชั่วขณะในกรอบอ้างอิงแกนนิ่งแสดงตามรูปที่ 6 ซึ่งจะต้องทำการแปลงแรงดัน 3 เฟสให้อยู่ในสมการกรอบอ้างอิงแกนนิ่งตามสมการที่ (11)

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

โดยนำสมการแรงดันและกระแสในกรอบอ้างอิงแกนนิ่งมา

คำนวณกำลังไฟฟ้าและเขียนในรูปสมการเมตริกซ์เป็น

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$



รูปที่ 6 หลักการควบคุมกำลังไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงแกนนิ่ง

จากนั้นแปลงกลับสมการที่ (12) เพื่อคำนวณหากระแสที่สร้างกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนตามสมการที่ (13)

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix} \quad (13)$$

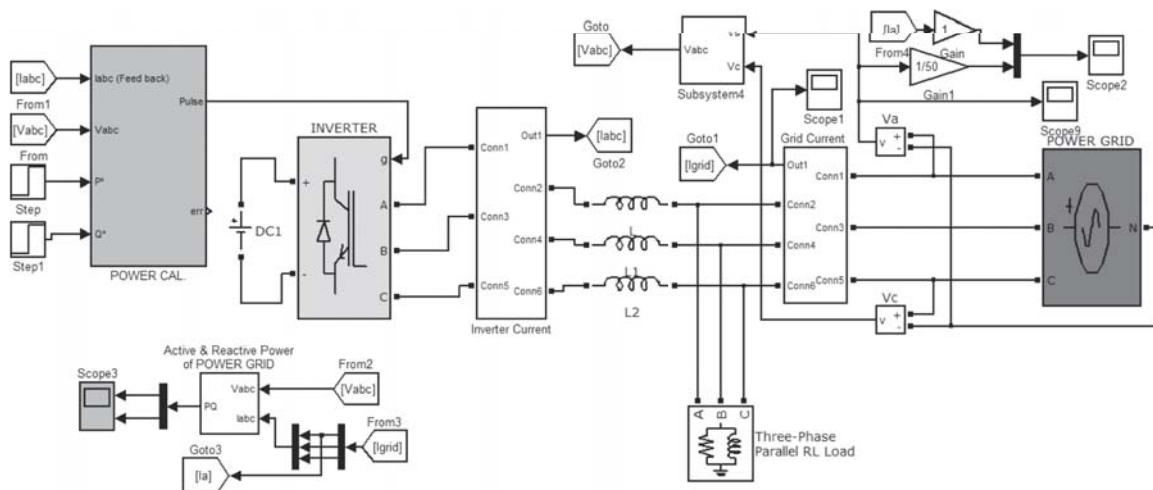
$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (14)$$

จากนั้นแปลงกระแส i_α และ i_β ให้อยู่ในรูปของสามเฟสเพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงในการควบคุมกำลังไฟฟ้าต่อไปตามสมการที่ (14)

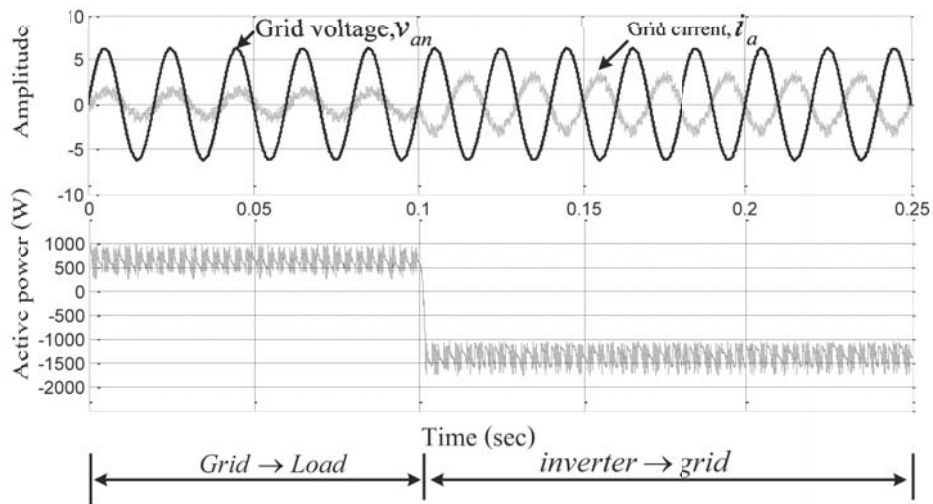
3. การจำลองการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า

หลักการจำลองการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังระบบกริดไฟฟ้า และในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Simulink/Matlab เป็น

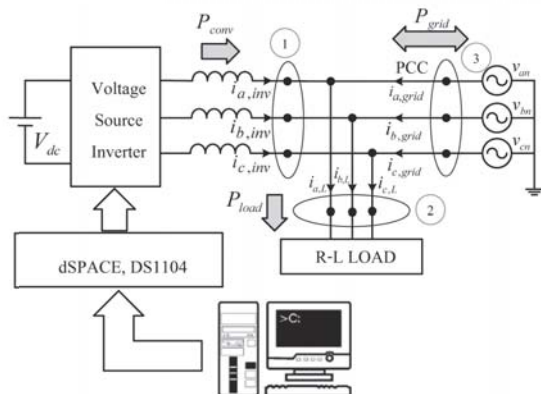
โปรแกรมช่วยในการจำลอง ดังแสดงตามรูปที่ 7 ซึ่งประกอบไปด้วยชุดอินเวอร์เตอร์และแหล่งจ่ายการไฟฟ้าขนาดพิกัดแรงดันเฟส 220V_{RMS} โดยมีบล็อกการคำนวณกำลังไฟฟ้า P และ Q ตามสมการที่ (13)-(14) เพื่อเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า P และ Q เป็นกระแสอ้างอิงสำหรับกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าที่จะส่งผ่านเข้าระบบกริดไฟฟ้า เงื่อนไขในการจำลองกำหนดให้มีโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกันในแต่ละเฟส ระหว่างชุดวงจรอินเวอร์เตอร์กับแหล่งจ่ายการไฟฟ้า ตามรูปที่ 7 ในช่วงเวลาเริ่มต้น 0-0.1 วินาทีไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าออกมาจากชุดอินเวอร์เตอร์ เมื่อวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายการไฟฟ้าพบว่า การไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับ โหลดประมาณ 600W พบว่า กระแสที่แหล่งจ่ายการไฟฟ้ามีมุมเฟสล่าช้าหลังแรงดันเล็กน้อยสืบเนื่องจากผลของค่ารีแอคแตนซ์ในตัวเหนี่ยวนำที่ใช้เป็นโหลด จากนั้นในช่วงเวลา 0.1-0.25 วินาที ทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าออกจากชุดอินเวอร์เตอร์ที่พิกัดกำลัง 2kW จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากชุดอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับ โหลดและไหลเข้าสู่ระบบกริดไฟฟ้า ซึ่งสังเกตได้จากรูปคลื่นกระแสมีมุมเฟสล่าช้าหลังแรงดัน 180 องศา



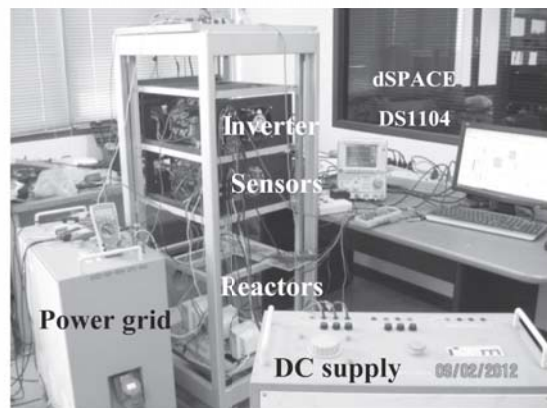
รูปที่ 7 ระบบการจำลองการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปยังกริด



รูปที่ 8 ผลการจำลองรูปคลื่นกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่กริด (จุด PCC)



รูปที่ 9 การกำหนดจุดทดสอบ



รูปที่ 10 ชุดต้นแบบอินเวอร์เตอร์

4. ผลการทดลอง

ชุดต้นแบบอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า ประกอบไปด้วยอินเวอร์เตอร์สามเฟสขนาดพิกัดกระแส 50A มี IGBT เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับไลน์การไฟฟ้าเท่ากับ 10mH ดังแสดงตามรูปที่ 9 ใช้ชุดประมวลสัญญาณเชิงดิจิทัล DSP เบอร์ TMS320F240 มีค่า sampling time เท่ากับ $50\mu s$ เงื่อนไขในการทดสอบเช่นเดียวกันกับการจำลองกล่าวคือ กำหนดให้ส่งกำลังไฟฟ้าจากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ 2,000W โดยการควบคุมขนาดกระแสอ้างอิงที่ได้มาจากคำสั่งของกำลังไฟฟ้าจริง (P) จากรูปที่ 9 เป็นวงจรการทดสอบซึ่งประกอบไปด้วยชุดอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ โดยมีกำลังไฟฟ้าจริงที่โหลด 200Wต่อเฟส

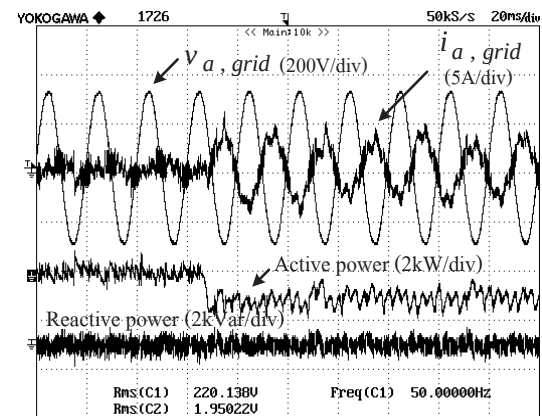
Power & Energy				
	FULL	0	0:01:50	
	L1	L2	L3	Total
kU	-0.44	-0.47	-0.52	-1.43
kVA	0.48	0.53	0.56	1.57
kVAR	0.18	0.25	0.20	0.63
PF	-0.93	-0.88	-0.93	-0.91
cosφ	-0.98	-0.94	-0.98	
Arms	2.1	2.4	2.4	
	L1	L2	L3	
Urms	222.4	223.8	229.1	
26/11/11 09:04:15 230V 50Hz 3Φ WYE ENS0160				
VOLTAGE				
ENERGY TREND HOLD RUN				

รูปที่ 11 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่กริดไฟฟ้า (จุดวัดที่ 3)

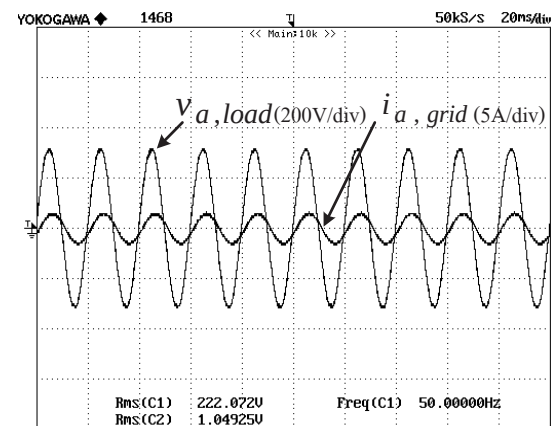
และมีรูปชุดการทดสอบต้นแบบตามรูปที่ 10 ในการทดสอบเมื่อกำหนดให้กำลังไฟฟ้าที่ออกจากชุดอินเวอร์เตอร์มีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าที่โหลด โหลดจะได้รับกำลังไฟฟ้าจากสองแหล่ง คือ จากอินเวอร์เตอร์และจากกริดไฟฟ้า

สำหรับการทดสอบควบคุมให้กำลังไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับ 2,000W กำลังไฟฟ้านี้จะไปจ่ายให้กับโหลดและส่วนที่เหลือจะเข้าไปจ่ายยังกริด ดังแสดงค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆได้ตามรูปที่ 11 ที่ซึ่งเป็นข้อมูลการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่จุด PCC ในสภาวะคงตัว พบว่ามีกำลังไฟฟ้าจริงไหลเข้ากริดเท่ากับ 1,430W ที่แรงดันเฟส 220V ในรูปที่ 12 นี้เป็นวัฏรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่กริด (จุด PCC) ในช่วงแรงทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ออกจากชุด

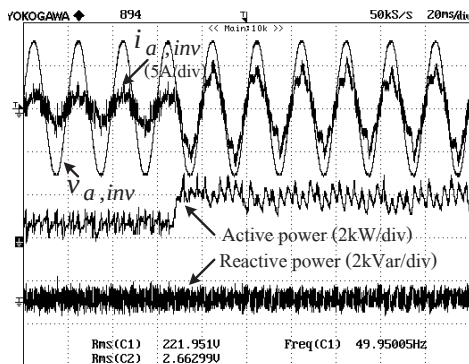
อินเวอร์เตอร์ให้มีค่าเท่ากับโหลด ซึ่งจะสังเกตได้ว่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากกริดมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นควบคุมให้มีกำลังไฟฟ้าจริงไหลออกจากชุดอินเวอร์เตอร์ที่ 2,000W อย่างทันทีทันใด พบว่ามีกำลังไฟฟ้าไหลเข้าไปที่กริดประมาณ 1,400W โดยมีมุมกระแสด่างเฟสกับแรงดัน 180 องศา (Out of phase) สำหรับรูปที่ 13 เป็นรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่โหลดในสภาวะคงตัว พบว่ากระแสมีมุมเฟสล่าหลังแรงดันเล็กน้อย และรูปที่ 14 เป็นเงื่อนไขเดียวกับรูปที่ 12 โดยในช่วงแรกอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดในขณะที่กำลังไฟฟ้าจากกริดมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นควบคุมให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าที่ 2,000W ทันทีทันใด เป็นผลทำให้กระแสที่ออกจากอินเวอร์เตอร์มีขนาดสูงขึ้น และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมานี้จะถูกส่งไปยังกริดต่อไป



รูปที่ 12 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่กริดหรือจุดวัดที่ 3 เมื่อทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์อย่างทันทีทันใด



รูปที่ 13 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่โหลด (จุดวัดที่ 2)



รูปที่ 14 แรงดันและกระแสที่จุดวัดที่ 1 กำลังไฟฟ้าถูกส่งออก
อย่างทันทีทันใดที่ 2,000W

5. สรุป

การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้ชุดอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริด ในงานวิจัยนี้เป็นการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยการควบคุมกำลังไฟฟ้าชั่วขณะในกรอบอ้างอิงแกนนิ่งแบบรูปเปิด โดยแปลงกำลังไฟฟ้าเป็นกระแสอ้างอิงสามเฟส ซึ่งเป็นวิธีที่ควบคุมง่ายและให้ผลการตอบสนองที่เร็ว ในทางกลับกันผลของความถี่ที่ไม่คงที่ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าระบบกริดไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนสูง ซึ่งไม่สามารถทำให้ค่าตัวประกอบกำลังที่กริดมีค่าเป็นยูนิตี้ได้ ถึงแม้ว่าจะควบคุมกระแสให้มีเฟสต่างกับกับแรงดัน 180 องศาก็ตาม ยิ่งไปกว่านั้นเพื่อให้กระแสจริงในจุดวัดที่ 1 ที่ใช้ในการควบคุมให้เกาะติดตามกระแสอ้างอิง จะต้องควบคุมให้มีแรงดันดีซีที่ใช้ในการทดสอบมีค่าสูงมาก ซึ่งในการทดสอบลงค่าแรงดันดีซีไว้ที่ 600 โวลต์

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ในส่วนของโครงการวิจัยสิ่งประดิษฐ์ เรื่อง “อินเวอร์เตอร์สามเฟสพิกัดกำลัง 10 กิโลวัตต์ สำหรับประยุกต์ใช้กังหันลมเพื่อเชื่อมต่อกับระบบกริดไฟฟ้า”

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Picardi and D. Sgro, “Grid-Connected Inverter Power Flow Control Based on a New Modeling Approach of Electrical Signal” *IEEE International conference*, PP. 585-590, 2009.

- [2] N. Mohand, T. M. Undeland and W. P. Robbins, “Power Electronics: Converters, Applications, and Design”, John Wiley & Sons, 3rd edition, 2003.
- [3] G. H. Bode and D. G. Holmes, “Implementation of Three Level Hysteresis Current Control for a Single Phase Voltage Source Inverter”, *Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 1, 2000, pp. 33-38.
- [4] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani, “Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters: A Survey” *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 45, No. 5, 1998.
- [5] H. Akagi, E. H. Watanabe and M. Aredes, “Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning” *IEEE Press*, John Wiley & Sons, Ed. New Jersey, 2007.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร.จักรพงษ์ จารุมิศรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็นพนักงานสายวิชาการสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

งานวิจัยที่สนใจ ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า



ผศ.บุญเรือง วังศิลาบุตร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

งานวิจัยที่สนใจ ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



รศ.ดร.เสถียร ธัญญศิริรัตน์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

งานวิจัยที่สนใจ ด้านพลังงานทดแทน