

## اینورتر رابط شبکه فتوولتائیک، با قابلیت متعادل سازی توان اکتیو و راکتیو بار در شبکه توزیع سه فاز چهارسیمه

هادی افکار<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری؛ محمدعلی شمسینژاد<sup>۲</sup>، دانشیار؛ محمود عبادیان<sup>۳</sup>، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - h.afkar@birjand.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - mshamsi@birjand.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران - mebadian@birjand.ac.ir

**چکیده:** متعادل سازی بار از موضوعات مهم در سیستم های توزیع است. از طرفی امروزه استفاده از منابع تولید پراکنده نظیر فتوولتائیک برای تولید انرژی رو به افزایش است. در این مقاله، اینورتر رابط شبکه فتوولتائیک، با توانایی متعادل سازی توان اکتیو و راکتیو بار در شبکه توزیع سه فاز چهارسیمه پیشنهاد می شود. استراتژی کنترل پیشنهادی بر مبنای ارائه روش مؤلفه های اکتیو و راکتیو لحظه ای جریان در سیستم های تک فاز با قاب مرجع متغیر متناسب با ولتاژهای شبکه است. دو مبدل DC/DC و DC/AC برای اتصال فتوولتائیک به شبکه استفاده می شود. مبدل DC/DC وظیفه ردیابی حداکثر توان فتوولتائیک و مبدل DC/AC وظیفه متعادل سازی توان اکتیو و راکتیو بار و تزریق حداکثر توان فتوولتائیک به شبکه را برعهده دارد. با به کارگیری ساختار مبدل 3H-bridge برای اینورتر رابط شبکه، امکان رسیدن به اهداف کنترلی در شبکه های توزیع سه فاز چهارسیمه با ولتاژ پایین فراهم شده است. نتایج شبیه سازی در نرم افزار MATLAB/SIMULINK برای یک سیستم توزیع سه فاز چهارسیمه، توانایی استراتژی کنترلی پیشنهادی را در رسیدن به اهداف کنترلی نشان می دهد.

**واژه های کلیدی:** اینورتر رابط شبکه فتوولتائیک، جبران سازی، نامتعادلی توان اکتیو و راکتیو، سیستم توزیع سه فاز چهارسیمه.

## Compensation of load active and reactive power Imbalance by a photovoltaic grid interface inverter for three-phase four-wire distribution networks

H. Afkar<sup>1</sup>, PhD Student; M. A. Shamsinejad<sup>2</sup>, Associate Professor; M. Ebadian<sup>3</sup>, Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: h.afkar@birjand.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: mshamsi@birjand.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: mebadian@birjand.ac.ir

**Abstract:** Load balancing is an important issue in distributed systems. In addition, using distributed generation sources such as photovoltaic is increasing. This paper presents a photovoltaic grid interface inverter with compensation of load active and reactive power Imbalance for three-phase four-wire distribution networks. An improved control strategy based on instantaneous active and reactive current component method with variable reference frame in single-phase systems is proposed. Two DC/DC and DC/AC converters have been utilized for connecting PV to the grid. DC/DC converter is responsible for maximum power point tracking (MPPT) and DC/AC converter is responsible for injecting power to the grid as well as balancing load. Using the structure of 3H-bridge converter for grid interface inverter, it is possible to achieve control objectives in three-phase four-wire low voltage distribution networks is provided. The proposed control has been verified by simulation using MATLAB/SIMULINK software and the simulation results indicate the ability of the proposed method to achieve control objectives.

**Keywords:** Photovoltaic grid interface inverter, compensation, load active and reactive power Imbalance, three-phase four-wire distribution networks.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۳ و ۱۳۹۶/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۴

نام نویسنده مسئول: محمدعلی شمسینژاد

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

## ۱- مقدمه

نامتعادلی بار یکی از مسائل مهم شبکه‌های توزیع است. نامتعادلی در شبکه‌های توزیع به علت رفتار متغیر مصرف‌کننده‌های تک فاز و توزیع نامتقارن آن‌ها بین فازهای مختلف است. بارهای نامتعادل در سیستم‌های سه‌فاز چهارسیمه جریان نول زیادی را باعث می‌شوند. در سیستم‌های توزیع سه‌فاز چهارسیمه جریان نول شبکه یک مشکل کیفیت توان اضافه در مقایسه با سیستم‌های توزیع سه‌فاز سه‌سیمه است. وجود بارهای نامتعادل در شبکه توزیع تأثیر منفی روی ترانسفورماتورها و ژنراتورها گذاشته و با عبور جریان بالا از سیم نول باعث تشدید اثرات منفی هارمونیک‌ها و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع چهارسیمه می‌شوند [۱-۳]. طبق مطالعات انجام‌شده ۲۲/۶ درصد سایت‌ها دارای جریان نول فراتر از ۱۰۰ درصد هستند [۳]. لذا لزوم جبران‌سازی سیم نول در مقابل دیگر مشکلات کیفیت توان در سیستم‌های توزیع سه‌فاز چهارسیمه بیشتر احساس می‌شود و متعادل‌سازی بار از موضوعات مهم در سیستم‌های توزیع مدرن است. مطالعات متعدد روش‌های مختلفی را برای جبران‌سازی جریان نول پیشنهاد کرده‌اند. از جمله این روش‌ها، راه‌حل‌های پسیو از قبیل فیلترهای هارمونیک توالی صفر [۴، ۵]، ماشین سنکرون [۶]، فیلترهای هیبرید [۷]، و فیلترهای قدرت اکتیو برای شبکه‌های سه‌فاز چهارسیمه [۸-۱۰] را می‌توان ذکر کرد. در بین این روش‌ها، فیلترهای سه‌فاز چهارسیمه که برای جبران‌سازی جریان نول طراحی شده‌اند مناسب‌ترین هستند [۱۱].

ساختارهای مختلفی از فیلترهای قدرت در شبکه‌های سه‌فاز چهارسیمه ارائه شده‌است. این ساختارها ممکن است نتواند مقدار توان موردنیاز برای ثابت نگاه‌داشتن باس DC را بکشد. برای مقابله با افت ولتاژهای بزرگ‌تر شبکه، نامتعادلی شدید بار یا حتی قطعی، خازن DC باید به‌وسیله یک ذخیره‌ساز انرژی جایگزین شود [۱۲]. یک منبع پراکنده می‌تواند برای تأمین توان باس DC استفاده شود. در واقع با استفاده از تزریق توان DG به بخش DC، مبدل قادر به کاهش نامتعادلی شدید بار خواهد بود. از طرفی افزایش نیاز به انرژی الکتریکی، موجب رشد مصرف انرژی الکتریکی، افزایش تعداد بارهای حساس برای برق باکیفیت بالا و میل به بهبود بازدهی شبکه شده‌است. به‌علاوه مصرف مداوم سوخت‌های فسیلی منجر به بحران انرژی و افزایش مشکلات آلودگی محیط‌زیست خواهد شد. در مواجهه با این مسائل سیستم‌های تولید پراکنده به‌تدریج مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۳-۱۵]. مطالعات متعدد نشان می‌دهد منابع تولید پراکنده نه‌تنها می‌توانند منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر باد، خورشید و از قبیل آن را به

شبکه برق متصل کنند بلکه می‌توانند از بعضی جهات، پایداری سیستم‌های قدرت را بهبود دهند. در سیستم‌های تولید پراکنده اینورترهای متصل به شبکه، رابط اصلی اتصال منابع انرژی تجدیدپذیر و وسایل ذخیره‌ساز انرژی به شبکه برق هستند [۱۶]. برای مقرون‌به‌صرفه شدن اینورترهای متصل به شبکه در DGs، اینورترهای متصل به شبکه چندمنظوره پیشنهاد می‌شوند [۱۷، ۱۸]. مبدل‌های الکترونیک قدرت نه‌تنها می‌توانند به‌عنوان رابط به شبکه برق سرویس دهند بلکه پتانسیل کاهش مشکلات کیفیت توان را نیز دارا می‌باشند. MFGCI می‌تواند منابع انرژی تجدیدپذیر و ادوات ذخیره‌ساز را به شبکه متصل کنند و به‌طور لحظه‌ای کیفیت توان نقطه مشترک اتصالشان را افزایش دهند و در نتیجه هزینه سرمایه‌گذاری و فضای سیستم را کاهش دهند. عملکردهای کمکی از قبیل فیلتر اکتیو، جبران‌کننده نامتعادلی ولتاژ، تغذیه شبکه و کنترل در افت ولتاژ مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۷].

عملکرد مبدل به استراتژی کنترل وابسته است. این استراتژی کنترل است که رفتار و عملکرد مطلوب یک سیستم معین را تصمیم‌گیری می‌کند و عملکرد مجموعه را برای رسیدن به هدف مطلوب تضمین می‌کند. استراتژی‌های موجود را می‌توان در دو حوزه فرکانس و حوزه زمان طبقه‌بندی شوند [۱۹، ۲۰]. الگوریتم‌های تبدیل فوریه گسسته یک روش در حوزه فرکانس است، اما این روش‌ها بسیار پیچیده هستند و پاسخ دینامیکی آن‌ها نیز ضعیف است [۲۱]. بنابراین استراتژی‌ها در حوزه زمان بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. MFGCI ها اکثراً از تئوری توان لحظه‌ای استفاده می‌کنند [۱۷، ۱۸].

در این مقاله، استراتژی کنترلی بر مبنای روش مؤلفه‌های اکتیو و راکتیو لحظه‌ای جریان در سیستم‌های تک فاز با قاب مرجع متغیر متناسب با ولتاژهای شبکه برای اینورتر رابط شبکه فتوولتائیک پیشنهاد شده‌است. بر مبنای این استراتژی روش جدیدی برای تولید جریان مرجع پیشنهاد می‌شود که موجب بهبود جبران نامتعادلی توان اکتیو و راکتیو بارهای نامتعادل در کنار تزریق توان فتوولتائیک به بار و شبکه خواهد شد. از مزیت‌های استراتژی کنترلی پیشنهادی متعادل‌سازی بهتر جریان‌های بار در کنار سادگی آن است.

در بخش ۲، ساختار سیستم معرفی می‌شود. استراتژی کنترلی پیشنهادی در بخش ۳ بحث خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK و مقایسه با روش ارائه‌شده در [۱] در بخش ۴ بیان می‌شود. در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ۵ انجام می‌شود.

## ۲- ساختار سیستم

شکل ۱ (الف) ساختار سیستم پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این ساختار سلول‌های فتوولتائیک از طریق دو مبدل DC/DC و DC/AC به صورت موازی با یک بار نامتعادل و غیرخطی به شبکه متصل شده‌است. مبدل DC/DC وظیفه ردیابی نقطه توان حداکثر در حالت متصل به شبکه را بر عهده دارد. به‌علاوه استفاده از مبدل DC/DC امکان کنترل ولتاژ سلول‌های فتوولتائیک را فراهم می‌آورد تا نیاز مبدل DC/AC را برآورده کند. در اینجا مبدل باک استفاده می‌شود. مبدل باک در شکل ۱ (ب) نشان داده شده‌است. مبدل DC/AC وظیفه کنترل توان، جریان تزریقی به شبکه و نیز متعادل‌سازی بار را بر عهده دارد. همان‌طور که در شکل ۱ (ج) نشان داده شده‌است، در ساختمان این مبدل از سه مبدل منبع ولتاژ (VSC) تک فاز استفاده شده است که در کنترل باند هیستریزس کار می‌کنند. استفاده از سه منبع ولتاژ تک فاز به منظور کنترل مجزای هر فاز و متعادل‌سازی بار است. مزیت استفاده از مبدل تک فاز این است که، کنترل می‌تواند به صورت یک واحد سه‌فاز یا سه واحد تک فاز جدا انجام شود و ماکزیمم ولتاژ هر پل  $H$ ، ماکزیمم ولتاژ هر فاز است، بنابراین کاهش ولتاژ لینک DC را با ضریب  $\sqrt{3}$  نتیجه می‌دهد، لذا باعث کاهش ظرفیت اینورتر و امکان استفاده در شبکه‌های با ولتاژ پایین می‌شود [۲۲]. هر مبدل ولتاژ توسط یک ترانسفورماتور به شبکه متصل می‌شود که برای ایزوله شدن شبکه از مبدل و امکان اتصال مبدل به شبکه سه‌فاز چهارسیمه استفاده می‌شود. در مبدل از یک خازن استفاده شده است که در کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند. در مسیر اتصال مبدل DC/AC به شبکه از یک فیلتر پسیو به منظور فیلتر کردن هارمونیک‌های فرکانس بالای جریان

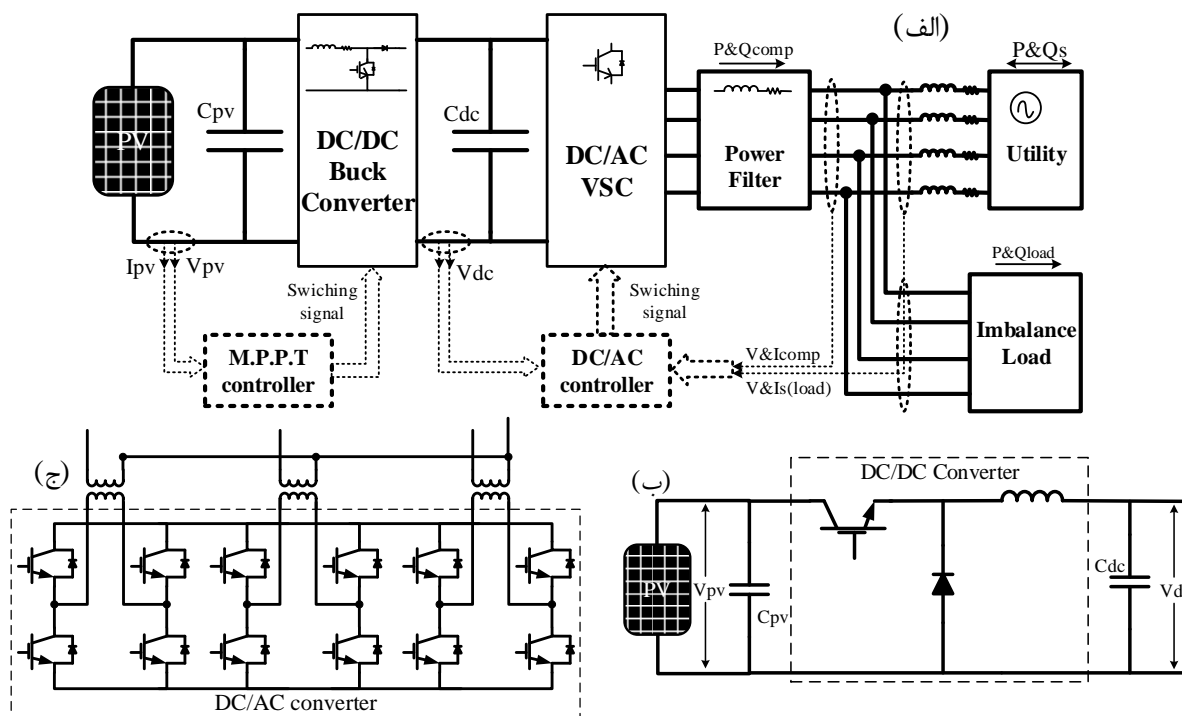
استفاده شده است.

## ۳- استراتژی کنترل

برای کنترل مبدل‌های DC/DC و DC/AC حالت متصل به شبکه در نظر گرفته شده است. بار و مبدل به صورت موازی به شبکه متصل هستند. هدف کنترل‌کننده در مبدل DC/DC ردیابی نقطه توان حداکثر برای سلول فتوولتائیک است و اهداف کنترل‌کننده در مبدل DC/AC متعادل‌سازی توان اکتیو و راکتیو بار، در کنار انتقال توان سلول خورشیدی به شبکه و بار است. در این حالت حداکثر توان تولیدی سلول‌های خورشیدی به بار و شبکه منتقل می‌شود و در کنار آن متعادل‌سازی بار از دید شبکه صورت می‌گیرد. در شرایطی که توان تولیدی سلول‌های خورشیدی از مصرف بار بیشتر باشد، توان علاوه بر تأمین بار به شبکه نیز منتقل خواهد شد و در غیر این صورت شبکه و سلول‌های خورشیدی به صورت موازی بار را تأمین خواهند کرد. در بخش بعدی استراتژی کنترل‌کننده‌ها در مبدل‌های DC/DC و DC/AC بیان می‌شود.

### ۳-۱- کنترل مبدل DC/DC

در این مقاله، از روش اغتشاش و مشاهده برای ردیابی نقطه توان ماکزیمم استفاده می‌شود. در این روش به طور متناوب ولتاژ ترمینال خروجی فتوولتائیک افزایش یا کاهش می‌یابد سپس توان فتوولتائیک با توان آمده در دوره قبلی مقایسه می‌شود. اگر با تغییر ولتاژ، توان افزایش یابد، عملکرد سیستم کنترل در همان جهت ادامه می‌یابد و در غیر این صورت، جهت تغییرات برعکس می‌شود [۲۳]. شکل ۲ فلوچارت الگوریتم اغتشاش و مشاهده را نشان می‌دهد. با مدولاسیون



شکل ۱: ساختار سیستم (الف) نمای کلی سیستم، (ب) فتوولتائیک و مبدل DC/DC، (ج) مبدل DC/AC

ولتاژها و جریان‌های قاب  $\beta$ - $\alpha$  برای فاز a:

$$\begin{bmatrix} V_{La-\alpha} \\ V_{La-\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{La}(\omega t) \\ V_{La}(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{lm} \sin(\omega t) \\ V_{lm} \cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{La-\alpha} \\ i_{La-\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{La}(\omega t + \phi_l) \\ i_{La}(\omega t + \phi_l + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ولتاژها و جریان‌های قاب  $\beta$ - $\alpha$  برای فاز b و c:

$$\begin{bmatrix} V_{Lb,c-\alpha} \\ V_{Lb,c-\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Lb,c}(\omega t) \\ V_{Lb,c}(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{lm} \sin(\omega t \mp 120) \\ V_{lm} \cos(\omega t \mp 120) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{Lb,c-\alpha} \\ i_{Lb,c-\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Lb,c}(\omega t + \phi_l) \\ i_{Lb,c}(\omega t + \phi_l + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

برای یک سیستم سه‌فاز متعادل جریان‌های بار در قاب مرجع گردان ( $dq$ ) بر طبق تبدیل پارک به دست می‌آیند [۲۵].

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در این حالت به منظور عملکرد بهتر سیستم کنترلی در شرایط مختلف ولتاژ شبکه  $\theta = \tan^{-1}(\frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}})$  انتخاب می‌شود.

بر این اساس و بر طبق تئوری توان‌های لحظه‌ای تک فاز جریان‌های لحظه‌ای اکتیو و راکتیو هر فاز به دست می‌آیند. لذا برای فازهای a، b و c خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} i_{Ld-a,b,c} \\ i_{Lq-a,b,c} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_{a,b,c} & \sin \theta_{a,b,c} \\ -\sin \theta_{a,b,c} & \cos \theta_{a,b,c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La-a,b,c} \\ i_{L\beta-a,b,c} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\theta_{a,b,c} = \tan^{-1}(\frac{V_{\beta-a,b,c}}{V_{\alpha-a,b,c}})$$

با توجه به اینکه در تئوری توان لحظه‌ای تک فاز هر فاز به‌عنوان یک سیستم سه‌فاز متعادل در نظر گرفته شده است لذا می‌توان زاویه  $\theta$  را از (۶) در شرایط سینوسی ولتاژ شبکه حذف کرد.

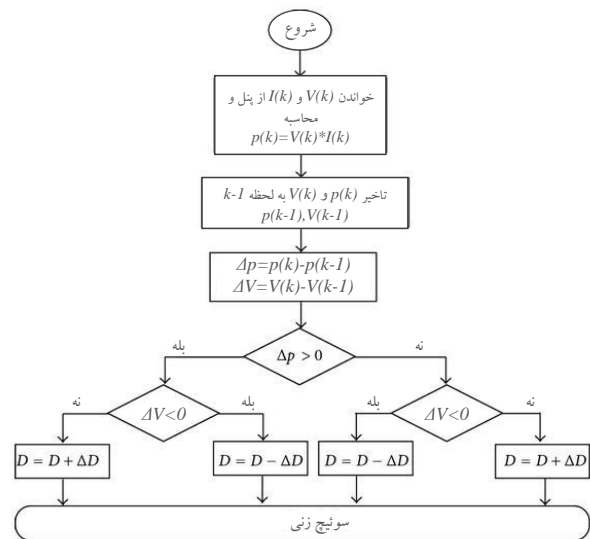
$$V_d = |\vec{v}_{dq}| = |\vec{v}_{\alpha\beta}| = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \quad \text{and} \quad V_q = 0$$

$$\cos \theta_{a,b,c} = \frac{V_{\alpha-a,b,c}}{\sqrt{V_{\alpha-a,b,c}^2 + V_{\beta-a,b,c}^2}} \quad (7)$$

$$\sin \theta = \frac{V_{\beta-a,b,c}}{\sqrt{V_{\alpha-a,b,c}^2 + V_{\beta-a,b,c}^2}}$$

$$\begin{bmatrix} i_{Ld-a,b,c} \\ i_{Lq-a,b,c} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{V_{\alpha-a,b,c}^2 + V_{\beta-a,b,c}^2}} \cdot \begin{bmatrix} V_{\alpha-a,b,c} & V_{\beta-a,b,c} \\ -V_{\beta-a,b,c} & V_{\alpha-a,b,c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La-a,b,c} \\ i_{L\beta-a,b,c} \end{bmatrix} \quad (8)$$

پهنای پالس، زاویه هدایت به دست آمده از الگوریتم به سوئیچ مبدل باک اعمال می‌شود.



شکل ۲: فلوجارت الگوریتم MPPT اغتشاش و مشاهده [۲۳]

### ۲-۳- کنترل مبدل DC/AC

هدف کنترل، جبران‌سازی بار در کنار تزریق توان فتوولتائیک به شبکه است. به عبارت دیگر مبدل DC/AC درحالی که توان فتوولتائیک را به بار و شبکه تزریق می‌کند، عمل متعادل‌سازی توان اکتیو و راکتیو را نیز انجام می‌دهد. برای تحقق این اهداف از استراتژی کنترلی، بر مبنای تئوری مؤلفه‌های اکتیو و راکتیو لحظه‌ای جریان استفاده می‌شود. بدین منظور تئوری برای یک سیستم تک فاز بازنویسی و معادلات برای سیستم سه‌فاز تعمیم داده می‌شود. در این راستا از تئوری توان لحظه‌ای تک فاز و تعمیم آن به مؤلفه‌های اکتیو و راکتیو لحظه‌ای جریان، برای تولید جریان‌های مرجع استفاده می‌شود. بر طبق تئوری توان لحظه‌ای در سیستم‌های تک فاز، هر سیستم تک فاز را می‌توان مشابه یک سیستم دوفاز با ۹۰ درجه پیش‌فاز یا پس‌فاز تعریف کرد و هر ولتاژ و جریان یک سیستم سه‌فاز می‌تواند با سه سیستم دوفاز مستقل در نظر گرفته شود. این سیستم‌های دو فاز می‌تواند در قاب  $\beta$ - $\alpha$  ارائه شود. در این تئوری ولتاژها و جریان‌های واقعی بار به‌عنوان کمیت محور  $\alpha$  در نظر گرفته می‌شود. درحالی که ولتاژ یا جریان با ۹۰ درجه پیش‌فاز یا پس‌فاز به‌عنوان کمیت محور  $\beta$  در نظر گرفته می‌شود [۲۴]. در این مقاله بر اساس این تئوری و استخراج مؤلفه‌های اکتیو و راکتیو لحظه‌ای جریان برای هر فاز اهداف موردنظر در کنترل‌کننده دنبال می‌شود و استراتژی برای استفاده در کنترل سلول‌های خورشیدی در حالت متصل به شبکه پیشنهاد می‌شود.

بر طبق تئوری p-q تک فاز در این مقاله کمیت محور  $\alpha$  را ولتاژها و جریان‌های واقعی و کمیت محور  $\beta$  را ولتاژها و جریان‌ها با ۹۰ درجه پیش‌فاز تشکیل می‌دهند. لذا برای فازهای a، b و c با فرض ولتاژهای متعادل برای هر فاز خواهیم داشت:

متعادل سازی بار استفاده می شود. اینورتر علاوه بر این که باید توان تولیدی سلول های خورشیدی را به شبکه منتقل کند باید این توان را طوری بین فازها تقسیم کند که از دید شبکه، بار به صورت متعادل دیده شود. بدین ترتیب می توان جریان هایی را که باید از طریق مبدل به شبکه تزریق شود، در قاب  $\beta-\alpha$  برای هر سه فاز به دست آورد.

$$\begin{bmatrix} i_{Ca,b,c-\alpha} \\ i_{Ca,b,c-\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{V_{\alpha-a,b,c}^2 + V_{\beta-a,b,c}^2}} \cdot \begin{bmatrix} V_{\alpha-a,b,c} & -V_{\beta-a,b,c} \\ V_{\beta-a,b,c} & V_{\alpha-a,b,c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{Ld-a,b,c} - (i_{Ld_{ph}} + i_{dc}) + i_{pv\_mppt} \\ i_{Lq-a,b,c} - i_{Lq_{ph}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

که در آن  $i_{Ld-a,b,c}, i_{Lq-a,b,c}$  جریان های اکتیو و راکتیو لحظه ای هر فاز بار،  $i_{Ld_{ph}}, i_{Lq_{ph}}$  جریان های اکتیو و راکتیو لحظه ای به دست آمده از (۱۱)،  $i_{pv\_mppt}$  جریان اکتیو معادل حداکثر توان سلول های خورشیدی که از الگوریتم MPPT به دست می آید و تمام توان تزریقی فتوولتائیک اکتیو فرض شده است و  $i_{dc}$  جریان تنظیم کننده ولتاژ DC و تعادل توان مبدل است. بدین ترتیب جریان های سه فاز مرجع مبدل در حالت متصل به شبکه به دست می آیند.

$$i_{Ca}^* = i_{Ca-\alpha}, i_{Cb}^* = i_{Cb-\alpha}, i_{Cc}^* = i_{Cc-\alpha} \quad (13)$$

بدین ترتیب علاوه بر عملکرد بهتر سیستم در شرایط مختلف ولتاژ شبکه، نیاز به PLL در روش کنترلی وجود نخواهد داشت. که موجب حذف معایب استفاده از آن می شود.

PLL با فاز سیگنال ورودی سنکرون می شود بنابراین دقت و پاسخ دینامیکی تخمین آن در شرایط گذرا به شدت تحت تأثیر تغییرات زیاد زاویه فاز است [۲۶]. لذا با حذف آن سیستم کنترلی عملکرد دینامیکی بهتری خواهد داشت.

هدف جبران سازی، متعادل سازی بار از دید شبکه است. برای متعادل سازی توان نامتعادل بار از دید شبکه، توان بار نامتعادل به طور مناسب بین شبکه و اینورتر توزیع شود، به طوری که کل بار دیده شده از شبکه متعادل باشد. بدین منظور جریان های تزریقی مبدل به شبکه باید به گونه ای باشد تا نامتعادلی جریان بار از دید شبکه مشاهده نشود. جریان های اکتیو و راکتیو لحظه ای کل بار نامتعادل طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

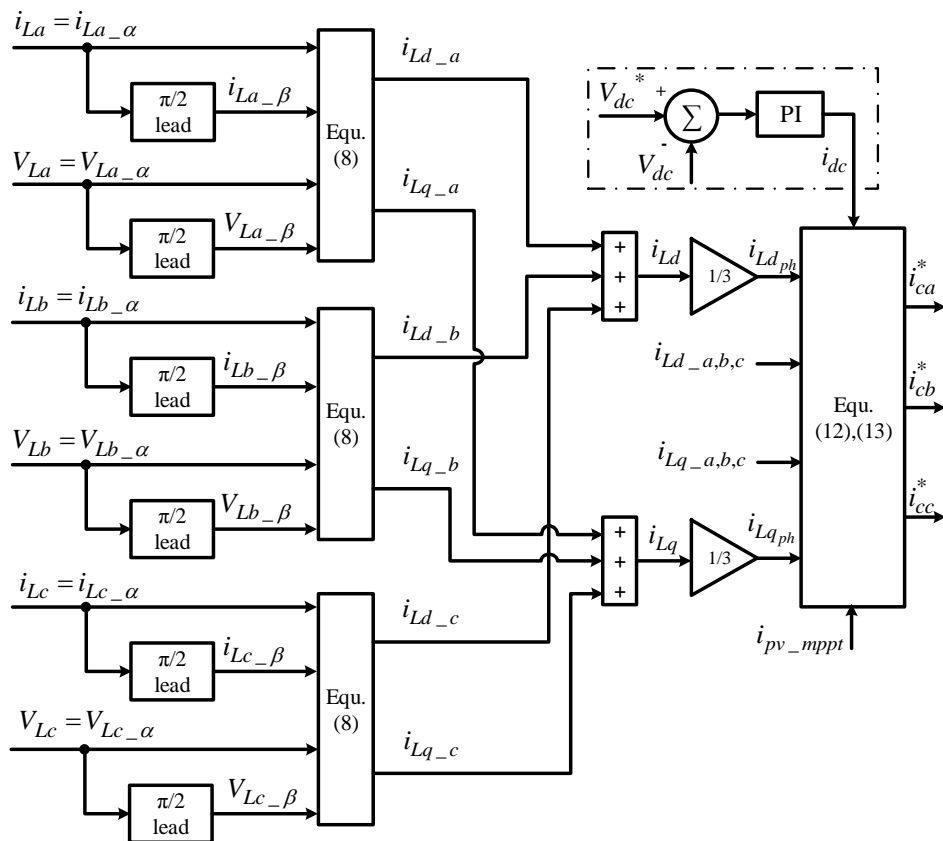
$$i_{Ld} = i_{Ld-a} + i_{Ld-b} + i_{Ld-c} \quad (9)$$

$$i_{Lq} = i_{Lq-a} + i_{Lq-b} + i_{Lq-c} \quad (10)$$

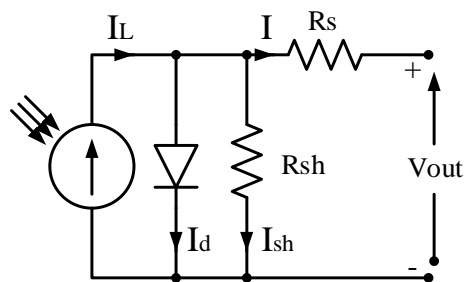
بدین ترتیب در صورتی که بار متعادل باشد جریان های اکتیو و راکتیو لحظه ای هر فاز شبکه برابر:

$$i_{Ld_{ph}} = \frac{i_{Ld}}{3}, i_{Lq_{ph}} = \frac{i_{Lq}}{3} \quad (11)$$

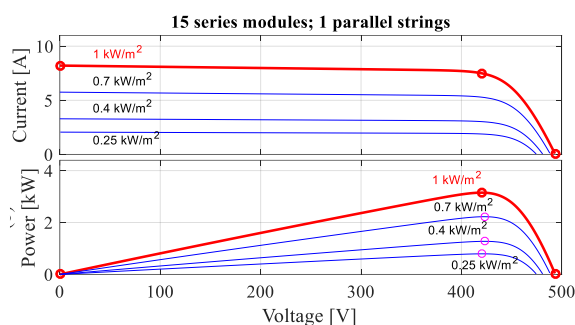
خواهد بود. از این مفهوم برای تعیین جریان های مرجع، به منظور



شکل ۳: بلوک دیاگرام کنترلی تولید جریان مرجع برای مبدل DC/AC



شکل ۴: مدل دینامیکی سلول‌های فتوولتائیک [۲۷]



شکل ۵: منحنی مشخصه‌های جریان - ولتاژ و توان - ولتاژ پنل فتوولتائیک

شکل ۶ نتایج شبیه‌سازی را برای سیستم نشان داده‌شده در شکل ۱ با مشخصات ارائه‌شده در جدول ۱ را نشان می‌دهد. در این نمونه به منظور ارزیابی بهتر عملکرد اینورتر، بار بین ثانیه‌های ۰/۴ تا ۰/۶ بین بارهای ۱ و ۲ به‌طور ناگهانی تغییر می‌کند. ولتاژ بار در شکل ۶(الف) نشان داده‌شده‌است که همان ولتاژ شبکه توزیع به مقدار مؤثر ۳۸۰/۲۲۰ ولت است. شکل ۱۰(ب) جریان‌های سه‌فاز بار را نشان می‌دهد که در هر دو حالت بار نامتعادل است. همان‌طور که دیده می‌شود بار بین ثانیه‌های ۰/۴ تا ۰/۶ از بار ۱ به بار ۲ تغییر می‌کند که دارای جریان بیشتری است. جریان‌های سه‌فاز شبکه در شکل ۱۰(ج) نشان داده‌شده‌است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود نامتعادلی زیاد جریان بار در جریان‌های شبکه دیده نمی‌شود و جبران شده‌است. همچنین دیده می‌شود که در هنگام تغییرات ناگهانی بار نیز عمل متعادل‌سازی به‌خوبی انجام‌شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در زمان ورود بار ۲ و افزایش بار سهم شبکه در تأمین بار بیشتر شده در نتیجه جریان شبکه افزایش می‌یابد. جریان‌های نول بار و شبکه در شکل ۱۰(د) نشان داده‌شده‌است. با توجه به شکل می‌توان دید که جریان نول بار به‌خوبی حتی در زمان تغییرات شدید بار جبران شده‌است و از دید شبکه بار متعادل دیده می‌شود. که نشان‌دهنده عملکرد مناسب سیستم در جبران نامتعادلی است. توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی مبدل به شبکه باید به نحوی باشد تا بتواند نامتعادلی را از دید شبکه در کنار تزریق توان فتوولتائیک به شبکه و بار، جبران کند. شکل ۶(ه) و ۶(و) به ترتیب توان‌های سه‌فاز اکتیو و راکتیو شبکه و بار را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود توان‌های اکتیو (راکتیو) هر یک از سه فاز شبکه باهم برابرند که نشان‌دهنده

بلوک دیاگرام تولید جریان مرجع بر مبنای (۱)-(۱۳) در شکل ۳ نشان داده‌شده‌است.

#### ۴- شبیه‌سازی

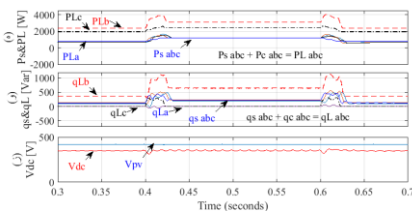
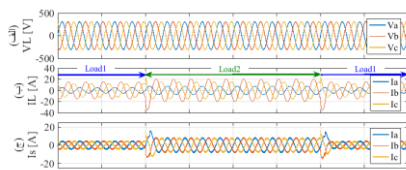
در این مقاله روش کنترلی پیشنهادی برای اینورتر رابط شبکه فتوولتائیک توسط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK برای متعادل‌سازی بار نامتعادل، در شبکه توزیع سه‌فاز چهارسیمه ارزیابی می‌شود. سیستم شبیه‌سازی‌شده مطابق شکل ۱ است. که در آن سلول‌های فتوولتائیک توسط یک مبدل باک و اینورتر از طریق ترانسفورماتورهای ایزوله و موازی با بار به شبکه متصل شده‌است. به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر، تغییرات بار شدید نیز در شبیه‌سازی لحاظ شده است. بار مورد استفاده در شبیه‌سازی مجموعه‌ای از امپدانس‌های اهمی و سلفی است که توان اکتیو و راکتیو نامتعادل از شبکه می‌کشد. شبکه استفاده‌شده در شبیه‌سازی نیز یک شبکه توزیع سه‌فاز چهارسیمه است. از یک فیلتر پسیو نیز استفاده می‌شود تا هارمونیک‌های ناشی از کلید زنی را کاهش دهد. پارامترهای شبیه‌سازی مطابق سیستم نشان داده‌شده شکل ۱، در جدول ۱ بیان شده‌است. همان‌طور که در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی

$V_{rms, phase} = 220V, f = 50Hz$ $L = 100\mu H, R = 0.1\Omega$	مشخصات شبکه
بار نامتعادل ۱: $R_a = 60\Omega, R_b = 20\Omega, L_b = 0.1H, R_c = 25\Omega$	پارامترهای بار
بار نامتعادل ۲: $R_a = 40\Omega, R_b = 15\Omega, L_b = 0.1H, R_c = 20\Omega$	
$C_{in} = 500\mu F, L = 0.5mH, R = 0.005\Omega$ $C_{dc} = 1000\mu F, f_{sw} = 1kHz$	مبدل DC/DC
$V_{dc} = 350V, 1:1$	مبدل DC/AC
$L = 4mH$	فیلتر پسیو

شکل ۴ مدل دینامیکی سلول‌های فتوولتائیک را نشان می‌دهد [۲۷]. مشخصات سلول‌های مورد استفاده در این مقاله سلول‌های فتوولتائیک نصب‌شده در دانشگاه تبریز است. مقاومت سری  $R_s$  مقاومت داخلی را در مقابل جریان نشان می‌دهد، که برابر ۰/۲۳ اهم است. مقاومت موازی  $R_{sh}$  به‌طور معکوس وابسته به جریان نشستی به زمین است و برابر ۶۰۱/۳ اهم است. در پنل‌های نصب‌شده به‌منظور رسیدن به توان نامی و ولتاژ مناسب هر آرایه فتوولتائیک شامل ۱۵ ردیف ماژول موازی و هر ردیف شامل ۱ ماژول سری می‌شود.

منحنی‌های جریان - ولتاژ و توان - ولتاژ پنل فتوولتائیک در شدت تابش‌های متفاوت در شکل ۵ نشان داده‌شده‌است. همان‌طور که در این منحنی‌ها دیده می‌شود نقطه توان حداکثر در یک ولتاژ خاص قرار می‌گیرد، که وظیفه مبدل DC/DC و الگوریتم MPPT ردیابی این نقطه در شرایط مختلف است.



شکل ۶: نتایج شبیه‌سازی (تغییر ناگهانی بار ۱ به بار ۲ بین ثانیه‌های ۰/۴ تا ۰/۶)، (الف) ولتاژ سه‌فاز بار، (ب) جریان سه‌فاز بار، (ج) جریان سه‌فاز شبکه، (د) جریان نول شبکه و بار، (ه) توان‌های اکتیو سه‌فاز شبکه و بار، (و) توان‌های راکتیو سه‌فاز شبکه و بار، (ز) ولتاژهای dc فتوولتائیک و

#### مبدل DC/AC

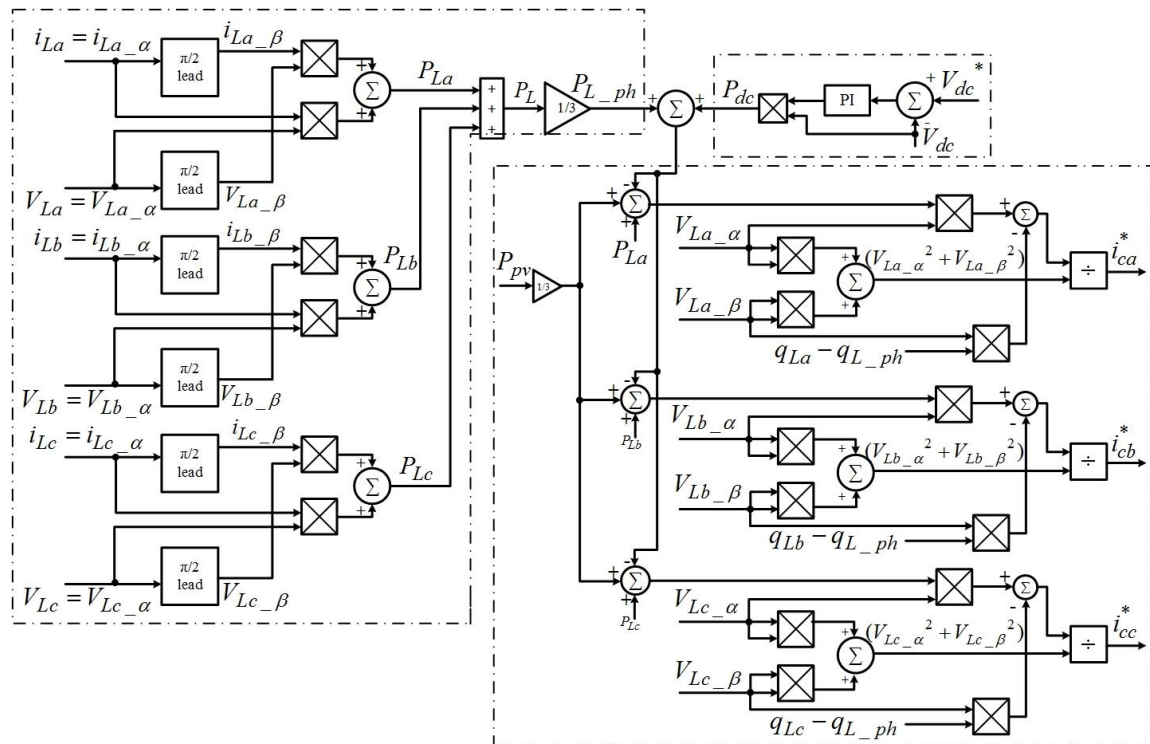
با توجه به شکل ۶ مشاهده شد که کنترل‌کننده مبدل DC/DC عمل ردیابی نقطه توان حداکثر فتوولتائیک را به‌درستی انجام می‌دهد و همچنین مبدل DC/AC عمل انتقال توان فتوولتائیک به شبکه و بار و همچنین متعادل‌سازی توان‌های اکتیو و راکتیو را به‌خوبی دنبال می‌کند.

برای نشان دادن قابلیت روش پیشنهادی در رسیدن به اهداف کنترلی روش پیشنهادی با روش ارائه‌شده در [۱] مقایسه می‌شود.

#### ۴-۱- بررسی عملکرد روش پیشنهادی

برای بررسی عملکرد، روش پیشنهادی با روش ارائه‌شده در [۱] مقایسه می‌شود. شکل ۷ بلوک دیاگرام روش ارائه‌شده در [۱] را نشان می‌دهد. تفاوت این روش با روش پیشنهادی در این مقاله، مبنای متعادل‌سازی

جبران مناسب نامتعادلی توان‌های اکتیو و راکتیو بار است. همچنین در هنگام تغییرات ناگهانی بار نیز عمل جبران نامتعادلی به‌خوبی انجام شده‌است. در این نمونه توان مصرفی بار بیشتر از توان فتوولتائیک است، به عبارتی شبکه و فتوولتائیک به‌موازات هم بار را تأمین می‌کنند. با توجه به توان اکتیو شبکه، ملاحظه می‌شود که با ورود اینورتر و تزریق توان فتوولتائیک به بار توان اکتیو شبکه کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده محقق شدن هدف تزریق توان فتوولتائیک به بار و شبکه است. با ورود بار ۲ و افزایش بار نیز ملاحظه می‌شود توان اکتیو شبکه افزایش می‌یابد. ولتاژ DC مبدل و سلول‌های فتوولتائیک در شکل ۶(ز) نشان داده شده‌است. مقدار ولتاژ DC مبدل DC/AC در ۳۵۰ ولت تنظیم شده‌است. ولتاژ سلول‌های فتوولتائیک نیز حدود ۴۳۰ ولت است که با توجه به شکل ۵ نقطه MPPT است.



شکل ۷: بلوک دیاگرام روش کنترلی ارائه شده در [۱]

همان‌طور که از جدول ۲ مشاهده می‌شود عملکرد روش پیشنهادی باعث کاهش ۴۵/۶ درصدی نامتعادلی جریان بار و ۵۱/۱۸ درصدی نامتعادلی توان اکتیو بار شده و نسبت به روش ارائه شده در [۱] نامتعادلی جریان ۰/۶۷ درصد و نامتعادلی توان اکتیو ۰/۴۶ درصد کاهش داشته است. نامتعادلی توان راکتیو بار نیز نسبت به قبل جبران‌سازی کاهش ۱۸۵ درصدی دارد، با این‌وجود عملکرد روش پیشنهادی در متعادل‌سازی توان راکتیو نسبت روش ارائه شده در [۱] ۲ درصد افزایش یافته است.

جدول ۲: نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی و روش ارائه شده در [۱]

مشخصات شبکه	توان‌های اکتیو سه‌فاز شبکه [W]		توان‌های راکتیو سه‌فاز شبکه [Var]		جریان‌های مؤثر سه‌فاز [A]	
	A	UF	A	UF	A	UF
پارامترهای بار (بدون جبران‌سازی)	A ۸۰۶	UF ۵۲/۶	A ۰	UF ۲۰۰	A ۵/۵	UF ۴۶/۵
روش ارائه شده در [۱]	A ۶۶۸	UF ۱/۸۸	A ۱۰۷	UF ۱۲/۹	A ۳/۱۱	UF ۱/۵۲
روش پیشنهادی	A ۶۶۴	UF ۱/۴۲	A ۱۰۴	UF ۱۴/۹	A ۳/۱۵	UF ۰/۸۵
	B ۲۳۶۰		B ۳۷۱		B ۱۴/۳۵	
	C ۱۹۳۵		C ۰/۰۶		C ۱۱	
	B ۶۵۳		B ۱۳۷		B ۳/۰۷	
	C ۶۴۶		C ۱۲۴/۵		C ۳/۰۲	
	A ۶۶۴		A ۱۰۴		A ۳/۱۵	
	B ۶۵۹		B ۱۳۹		B ۳/۱۵	
	C ۶۴۷/۵		C ۱۲۴		C ۳/۱۱	

## ۲-۴- عملکرد اینورتر متصل به شبکه در تغییرات سریع تابش خورشید

است. در [۱] متعادل‌سازی بر مبنای تقسیم توان‌های اکتیو و راکتیو نامتعادل بار بر روی سه‌فاز شبکه صورت می‌گیرد اما در روش پیشنهادی جریان‌های اکتیو و راکتیو نامتعادل بار بر روی سه‌فاز شبکه تقسیم می‌شود.

شبیه‌سازی سیستم شکل ۱ با مشخصات جدول ۱ بر مبنای دو روش و برای بار نامتعادل ۱ انجام می‌شود. نتایج حاصل از دو روش در متعادل‌سازی توان‌های اکتیو و راکتیو و جریان‌های سه‌فاز در جدول ۲ ارائه شده است. بدین منظور برای مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو روش، جریان‌های مؤثر و توان‌های اکتیو و راکتیو هر فاز و همچنین شاخص نامتعادلی (UF<sup>v</sup>) جریان‌ها و توان‌های اکتیو و راکتیو در جدول ۲ ارائه شده است.

در اینجا UF حداکثر انحراف از مقدار متوسط توان‌های اکتیو (راکتیو) و جریان‌های سه‌فاز تقسیم بر متوسط مقدار توان‌های اکتیو (راکتیو) یا جریان‌های سه‌فاز بر حسب درصد، تعریف می‌شود که شاخصی برای بررسی میزان نامتعادلی سیستم است [۲۸]. البته این شاخص تنها شامل نامتعادلی اندازه جریان‌ها و توان‌های سیستم است. این شاخص عموماً برای بیان نامتعادلی ولتاژ استفاده می‌شود و در استاندارد IEC حداکثر ۲ درصد بیان می‌شود [۲۹]. در این مقاله برای بیان مقایسه نامتعادلی جریان و توان‌ها از این شاخص استفاده می‌کنیم که دید خوبی در مورد نامتعادلی و مقایسه آن بین دو روش به ما می‌دهد.

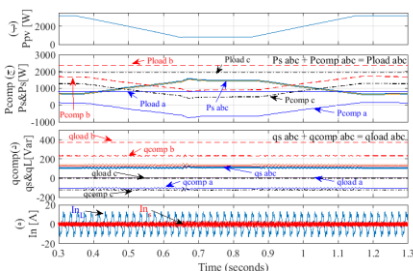
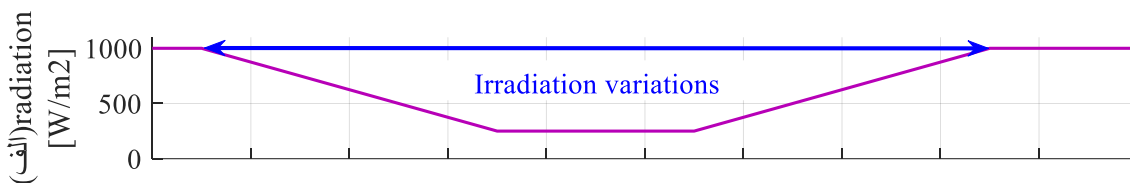


حداکثر از توان فتوولتائیک، تزریق توان فتوولتائیک به شبکه فقط به صورت توان اکتیو در نظر گرفته می شود لذا نقش سیستم تنها متعادل سازی توان راکتیو بار است که به خوبی این عمل را در تغییرات سریع تابش خورشید نیز انجام می دهد. جریان های نول بار و شبکه در شکل ۸(ه) نشان داده شده است. همان طور که می توان دید روش کنترلی پیشنهادی در تغییرات تابش خورشید نیز به خوبی نامتعادلی جریان بار را جبران می کند.

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک اینورتر رابط شبکه فتوولتائیک به همراه استراتژی کنترلی آن بر مبنای مؤلفه های اکتیو و راکتیو لحظه ای جریان در سیستم های تک فاز با قاب مرجع متغیر متناسب با ولتاژهای شبکه ارائه شده است. در این استراتژی کنترلی، روش جدیدی در تولید جریان های مرجع پیشنهاد شده است که باعث بهبود عملکرد آن در جبران سازی نامتعادلی شده است. عملکرد روش پیشنهادی در بار نامتعادل، تغییرات ناگهانی بار و تغییرات سریع تابش خورشید ارزیابی شده است. اعتبارسنجی روش با استفاده از نرم افزار MATLAB/SIMULINK و بر روی یک سیستم توزیع سه فاز

در این بخش عملکرد اینورتر و روش کنترلی پیشنهادی در زمان تغییرات سریع تابش خورشید ارزیابی می شود. شکل ۸ نتایج شبیه سازی را برای سیستم نشان داده شده در شکل ۱ با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ با بار نامتعادل ۱ برای تابش متغیر خورشید بین ثانیه های ۰/۳۵ تا ۱/۱۵، را نشان می دهد. شکل ۸(الف) تغییرات تابش خورشید بین ثانیه های ۰/۳۵ تا ۱/۱۵ را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۸(ب) می توان دید، تغییرات تابش خورشید باعث تغییرات توان تولیدی فتوولتائیک می شود و با کاهش تابش توان تولیدی نیز کاهش می یابد. شکل ۸(ج) توان های اکتیو سه فاز شبکه، بار و اینورتر را نشان می دهد. همان طور که در شکل دیده می شود نامتعادلی توان های اکتیو در توان های اکتیو شبکه دیده نمی شود و روش کنترلی پیشنهادی در تغییرات سریع تابش خورشید نیز به خوبی عمل می کند. در این نمونه توان مصرفی بار بیشتر از توان فتوولتائیک است، به عبارتی شبکه و فتوولتائیک به موازات هم بار را تأمین می کنند. با کاهش توان فتوولتائیک بین ثانیه های ۰/۳۵ تا ۱/۱۵ سهم تأمین توان بار توسط فتوولتائیک کاهش می یابد و توان بار از طریق شبکه تأمین می شود لذا سهم توان شبکه در تأمین بار افزایش یافته است. شکل ۸(د) توان های راکتیو اینورتر، بار و شبکه را نشان می دهد. با توجه به بهره برداری



شکل ۸: نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی در تابش متغیر خورشید بین ثانیه های ۰/۳۵ تا ۱/۱۵، (الف) تغییرات تابش خورشید، (ب) توان فتوولتائیک، (ج) توان های اکتیو اینورتر، بار و شبکه، (د) توان های راکتیو اینورتر، بار و شبکه، (ه) جریان های نول شبکه و بار

- phase four-wire shunt active filters," in IET Power Electronics, vol. 4, no. 4, pp. 463-470, Apr. 2011.
- [11] D. Sreenivasarao, P. Agarwal and B. Das, "Neutral current compensation in three-phase, four-wire systems: A review." Electric Power Systems Research, vol. 86, no. 0, pp. 170-180, May 2012.
- [12] F. Wang, J. L. Duarte and M. A. M. Hendrix, "Grid-interfacing converter systems with enhanced voltage quality for micro grid application-concept and implementation," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 12, pp. 3501-3513, Dec. 2011.
- [13] S. Rahman, "Green power: what is it and where can we find it?" IEEE Power and Energy Magazine, vol. 1, no. 1, pp. 30-37, Jan/Feb 2003.
- [14] L. B. Campanhol, S. A. da Silva, A. de Oliveira Junior and V. Bacon, "Dynamic performance improvement of a grid-tied PV system using a feed-forward control loop acting on the npc inverter currents," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. PP, no.99, pp.1-1, Early Access Articles.
- [15] سعید عباسی، علی اصغر قدیمی و امیرحسین ابوالمعصومی، " حذف نوسانات توان اکتیو تزریقی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه در شرایط افت ولتاژ،" مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۲، صفحه ۱۵۸-۱۴۹، تابستان ۱۳۹۵.
- [16] F. Blaabjerg, Zhe Chen and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1184-1194, Sept. 2004.
- [17] Z. Zeng, H. Yang, R. Zhao and C. Cheng, "Topologies and control strategies of multifunctional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 24, pp.223-270, Aug. 2013.
- [18] Z. Zeng, H. Yang, J. M. Guerrero and R. Zhao, "Multi-functional distributed generation unit for power quality enhancement," in IET Power Electronics, vol. 8, no. 3, pp. 467-476, Mar. 2015.
- [19] L. Asiminoael, F. Blaabjerg and S. Hansen, "Detection is key - harmonic detection methods for active power filter applications," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 13, no. 4, pp. 22-33, July-Aug. 2007.
- [20] M. I. M. Montero, E. R. Cadaval and F. B. Gonzalez, "Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 1, pp. 229-236, Jan. 2007.
- [21] O. M. Solomon, "The use of DFT windows in signal-to-noise ratio and harmonic distortion computations," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 43, no. 2, pp. 194-199, Apr. 1994.
- [22] A. Hintz, U. R. Prasanna and K. Rajashekara, "Comparative study of the three-phase grid-connected inverter sharing unbalanced three-phase and/or single-phase systems," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 6, pp. 5156-5164, Nov.-Dec. 2016.
- [23] B. Panda, B. Panda, P. K. Hota and S. K. Bhuyan, "A comparative analysis of Maximum Power Point techniques for photovoltaic system," 2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC), Bhubaneswar, 2015, pp. 732-737.
- [24] V. Khadkikar and A. Chandra, "A novel structure for three-phase four-wire distribution system utilizing unified power quality conditioner (UPQC)," in IEEE چهارسیمه انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی قابلیت روش پیشنهادی در متعادل‌سازی توان‌های اکتیو و راکتیو بار، حذف جریان سیم نول و تزریق حداکثر توان فتوولتائیک به بار و شبکه را نشان می‌دهد و نسبت به روش ارائه‌شده در [۱] در متعادل‌سازی جریان و جبران‌سازی سیم نول دارای عملکرد بهتری است. ساختار به‌کارگرفته‌شده شامل دو مبدل DC/DC و DC/AC می‌شود. مبدل DC/DC وظیفه ردیابی نقطه توان حداکثر برای سلول فتوولتائیک و مبدل DC/AC نیز وظیفه جبران نامتعادلی بار، در کنار انتقال توان سلول خورشیدی به شبکه و بار را بر عهده دارد. مزیت روش ارائه‌شده در بهبود متعادل‌سازی جریان‌های بار و جبران‌سازی سیم نول، در کنار سادگی آن است.

## مراجع

- [1] H. Afkar, M. A. Shamsi Nejad and M. Ebadian, "A grid-connected PV inverter with compensation of load active and reactive power imbalance for distribution networks," Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, vol. 12, no. 2, pp. 168-176, Jun. 2016.
- [2] A. Moreno-Munoz, *Power Quality: Mitigation Technologies in A Distributed Environment*, London: Springer-Verlag London Limited, 2007.
- [3] T. Zaveri, B.R. Bhalja and N. Zaveri, "Comparison of control strategies for DSTATCOM in three-phase, four-wire distribution system for power quality improvement under various source voltage and load conditions," Electrical Power and Energy Systems, vol. 43, pp. 582-594, Dec. 2012.
- [4] T. Ding and W. Xu, "A filtering scheme to reduce the penetration of harmonics into transmission systems," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, no. 1, pp. 59-66, Feb. 2016.
- [5] P. Rodríguez, J. I. Candela, A. Luna, L. Asiminoaei, R. Teodorescu and F. Blaabjerg, "Current harmonics cancellation in three-phase four-wire systems by using a four-branch star filtering topology," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 8, pp. 1939-1950, Aug. 2009.
- [6] T. Fukami, T. Onchi, N. Naoe and R. Hanaoka, "Compensation for neutral current harmonics in a three-phase four-wire system by a synchronous machine," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 5, pp. 1232-1236, Sep/Oct 2002.
- [7] D. Suresh and S. Singh, "Reduced rating hybrid active power filter in a three-phase four-wire distribution system," 2014 International Conference on Computer Communication and Informatics, Coimbatore, 2014, pp. 1-5.
- [8] R. A. Modesto, S. A. O. da Silva, A. A. de Oliveira and V. D. Bacon, "A versatile unified power quality conditioner applied to three-phase four-wire distribution systems using a dual control strategy," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 8, pp. 5503-5514, Aug. 2016.
- [9] F. R. Quintela, J. M. G. Arévalo, R. C. Redondo and N. R. Melchor, "Four-wire three phase load balancing with static VAr compensators," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 33, no. 3, pp. 562-568, Mar. 2011.
- [10] V. Khadkikar, A. Chandra and B. Singh, "Digital signal processor implementation and performance evaluation of split capacitor, four-leg and three H-bridge-based three-

- compensates utility current," in *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 32-42, Mar. 2015.
- [28] داود رضائی، اسکندر قلی‌پور و رحمت‌اله هوشمند، "استفاده بهینه از ظرفیت بهساز یکپارچه کیفیت توان به‌منظور جبران سازی هم‌زمان توان راکتیو بار و اعوجاجات ولتاژ،" *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۵۴، شماره ۳، صفحه ۴۶-۳۶، پاییز ۱۳۹۴.
- [29] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, Second Edition, McGraw-Hill, 2004.
- Transactions on Industry Applications, vol. 45, no. 5, pp. 1897-1902, Sept.-Oct. 2009.
- [25] T. Zaveri, B.R. Bhalja and N. Zaveri, "A novel approach of reference current generation for power quality improvement in three-phase, three-wire distribution system using DSTATCOM," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 33, no. 10, pp. 1702-1710, Dec. 2011.
- [26] P. Rodriguez, A. Luna, I. Candela, R. Mujal, R. Teodorescu and F. Blaabjerg, "Multiresonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 127-138, Jan. 2011.
- [27] N. D. Tuyen and G. Fujita, "PV-active power filter combination supplies power to nonlinear load and

## زیر نویس‌ها

- distributed generation sources (DGs)
- grid-connected inverters (GCI)
- multi-functional grid-connected inverters (MFGCI)
- points of common coupling (PCC)
- maximum power point tracking (MPPT)
- Perturb and Observe (P&O)
- Unbalance Factor (UF)