

## کنترل ولتاژ و فرکانس در یک میکروشبکه ی AC/DC مستقل

محسن اکبری<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد، مسعود علی اکبر گلکار<sup>۲</sup>، استاد، سید مسعود مقدس تفرشی<sup>۳</sup>، دانشیار

۱- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران  
Mohsenakbari@ieee.org -

۲- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران  
Golkar@eed.kntu.ac.ir -

۳- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران  
Tafreshi@eed.kntu.ac.ir -

**چکیده:** در این مقاله، یک میکروشبکه‌ی AC/DC بمنظور کاهش تبدیلات معکوس متعدد در میکروشبکه‌های AC یا DC و تسهیل نمودن اتصال منابع انرژی و بارهای AC و DC، پیشنهاد شده است. از طرف دیگر، تحقیقات نشان داده است که مطالعه‌ی کنترل ولتاژ و فرکانس در میکروشبکه‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. از اینرو، طرح‌های کنترلی مورد مطالعه در این مقاله، بمنظور بهبود پایداری ولتاژ و فرکانس در مد مستقل (جزیره‌ای) میکروشبکه، توسعه و نشان داده شده‌اند. نتایج با در نظر گرفتن خطای اتصال کوتاه و نوسانات توان واحدهای تولیدی و بارهای مصرفی بدست آمده‌اند که صحت، دقت و توانمندی طرح‌های کنترلی در پایداری و بازیابی سریع ولتاژ و فرکانس میکروشبکه‌ی پیشنهادی را در اثر وقوع این اغتشاشات نشان می‌دهند.

**واژه‌های کلیدی:** میکروشبکه، کنترل ولتاژ، کنترل فرکانس، مدلسازی منابع انرژی، کنترل کننده‌ی PI.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۱۱/۰۳

نام نویسنده‌ی مسئول : مسعود علی اکبر گلکار

نشانی نویسنده‌ی مسئول : استان تهران- تهران- خیابان شریعی- سیدخندان- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- صندوق پستی ۱۳۵۵-۱۶۳۱۵

## ۱- مقدمه

جدید برای ذخیره‌سازهای ترکیبی باتری و ابرخازن توسط مؤلفان پیشنهاد شده است. همچنین از الگوریتم کنترل MPPT نیز در کنترل‌کننده واحدهای PV و DFIG بمنظور تولید توان حداکثر از این واحدهای تولیدی استفاده شده است.

ساختار مقاله بدین صورت می‌باشد: نخست مقدمه‌ای درباره‌ی میکروشبکه‌های AC و DC، علت انتخاب میکروشبکه‌ی AC/DC جهت مطالعه و نوآوری‌های مقاله مورد بحث قرار گرفته است. در بخش بعدی، آرایش میکروشبکه‌ی پیشنهادی و مدلسازی تجهیزات آن نشان داده می‌شود. سپس طراحی کنترل‌کننده‌ی مبدل‌ها بمنظور بهبود در کنترل ولتاژ و فرکانس میکروشبکه مطالعه خواهد شد. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار خواهند گرفت که توانمندی کنترل‌کننده‌ها را در پایدارسازی میکروشبکه نشان می‌دهند. در بخش آخر نیز یک نتیجه‌گیری کلی از مقاله ارائه شده است.

## ۲- آرایش و مدلسازی میکروشبکه‌ی پیشنهادی

## ۲-۱- آرایش میکروشبکه

آرایش میکروشبکه‌ی AC/DC پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده و در MatLab/Simulink مدلسازی شده است.

در میکروشبکه‌ی پیشنهادی، یک واحد PV با مقدار نامی ۴۰ kW، بعنوان مثالی از منابع DC، از طریق یک مبدل افزایش‌دهنده ولتاژ DC/DC (DC/DC Boost Converter) به شین DC (شینی که بار DC در آن قرار دارد) اتصال یافته است. بمنظور حذف نوسانات فرکانس بالای ولتاژ خروجی PV از یک خازن  $C_{pv}$  استفاده شده است. همچنین یک ژنراتور توربین بادی با اندازه نامی ۴۵ kW از نوع DFIG، بعنوان مثالی از منابع AC، به شین AC (شینی که بار AC در آنجا قرار دارد) اتصال یافته است. یک باتری ۲۰۰ V و ۶۵ Ah، بعنوان ذخیره‌ساز انرژی بلندمدت و بمنظور تبادل انرژی در حالت ماندگار، و یک ذخیره‌ساز ابرخازن ۲۰۰ V و ۵ F، بعنوان یک ذخیره‌ساز انرژی که دارای پاسخ فوق‌العاده سریع‌تری (نسبت به ذخیره‌ساز باتری) به تغییرات ولتاژ شین DC است، در نظر گرفته شده‌اند که هرکدام از طریق یک مبدل دوجبهته‌ی DC/DC<sup>۵</sup> (DC/DC Buck-Boost Converter) به شین DC اتصال یافته‌اند. همچنین بارهای DC و AC بترتیب به شین‌های DC و AC متصل شده‌اند. بار DC تنها یک بار اهمی بوده که مستقیماً به شین DC متصل شده است. اما بار AC متشکل از بارهای اهمی، سلفی (اندوکتیو) ثابت (۱۰ kvar) و خازنی (کاپاسیتیو) ثابت (۱ kvar) و یک بار موتوری (۵ kW) می‌باشد. ولتاژ نامی برای هر دو شین DC و AC برابر ۴۰۰ V در نظر گرفته شده است. همچنین یک اینورتر سه-فاز به همراه یک فیلتر R-L-C و یک ترانسفورماتور ایزوله (بمنظور کاهش حجم فیلتر R-L-C) شین DC را به شین AC متصل می‌نماید.

اخیراً بدلیل مسایل زیست‌محیطی ناشی از نیروگاه‌های متعارف سوخت-فسیلی، سیستم‌های تبدیل انرژی متعددی، تحت عنوان واحدهای DG<sup>۱</sup> در سیستم‌های توزیع نصب شده‌اند. کاربرد واحدهای DG در سیستم‌های توزیع، نوع جدیدی از سیستم‌های قدرت را با عنوان میکروشبکه معرفی می‌نماید. بطور کلی، میکروشبکه‌ها مجموعه‌ای از بارها و واحدهای تولیدی کوچک (معمولاً در حدود چند kW تا چند صد kW) است که بصورت یک سیستم قابل کنترل و متصل به شبکه‌ی توزیع فشار ضعیف یا متوسط، مورد بهره‌برداری قرار گرفته و هم توان و هم گرما (در صورت لزوم) را برای ناحیه‌ی موردنظر فراهم می‌آورند [1-3]. به عنوان مثال، یک میکروشبکه می‌تواند شبکه‌ی برق موجود در یک مرکز خرید، مرکز تفریحی یا دانشگاه باشد. چنین سیستم‌هایی می‌توانند به شبکه‌ی قدرت اصلی، متصل شده (مد موازی) و یا بطور مستقل (مد جزیره‌ای) مورد بهره‌برداری قرار بگیرند که در هر دو مد بهره‌برداری بایستی تغذیه‌ی پیوسته‌ای را برای بارهای مصرف‌کننده فراهم آورند.

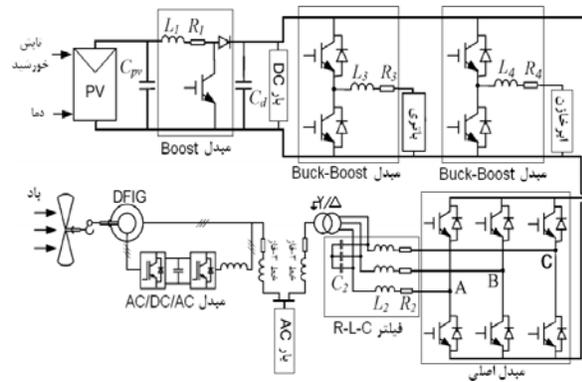
در میکروشبکه‌های AC، توان DC تولیدی از برخی منابع (مانند واحدهای خورشیدی (PV<sup>۲</sup>) یا پیل‌های سوختی) بایستی پیش از تزریق به میکروشبکه بکمک مبدل‌های DC/DC و اینورترهای DC/AC به حالت AC تبدیل شود. بعلاوه، اتصال بارهای DC (مانند لامپ‌های LED و خودروهای الکتریکی) به شبکه‌های AC نیز رو به افزایش بوده که نیازمند یکسوسازهای AC/DC و مبدل‌های DC/DC بمنظور تغذیه‌ی ولتاژهای DC مختلف هستند [4].

همچنین، اخیراً میکروشبکه‌های DC بدلیل توسعه و کاربرد روزافزون منابع DC تجدیدپذیر و همچنین افزایش بارهای DC، مورد استفاده و مطالعه قرار گرفته‌اند. بهرحال، در شبکه‌های DC، توان تولیدی منابع AC بایستی پیش از تزریق به شبکه، توسط یکسوسازها به حالت DC تبدیل شده و اینورترهای DC/AC نیز برای بارهای AC موجود، مورد نیاز هستند.

تبدیلات معکوس متعدد در میکروشبکه‌های AC یا DC تلفات را افزایش داده و تجهیزات بارهای مصرفی را نیز پیچیده‌تر خواهند نمود. از اینرو، در این مقاله، ساختار جدیدی از یک میکروشبکه‌ی AC/DC (ترکیبی<sup>۳</sup> از شین‌های AC و DC) بمنظور کاهش تبدیلات معکوس و تسهیل نمودن اتصال منابع انرژی و بارهای AC و DC به میکروشبکه، پیشنهاد شده است.

در این میکروشبکه، یک واحد PV بعنوان نمونه‌ای از منابع DC، و یک ژنراتور توربین بادی از نوع DFIG<sup>۴</sup>، بعنوان نمونه‌ای از منابع AC در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر، ذخیره‌ساز باتری دارای سرعت شارژ و تخلیه‌ی نسبتاً آهسته‌ای بوده اما ذخیره‌ساز ابرخازن دارای پاسخ بسیار سریع‌تری است. از اینرو در این مقاله، از ذخیره‌سازهای باتری و ابرخازن بترتیب برای جبران‌سازی نوسانات فرکانس بالا و فرکانس پایین ولتاژ شین DC استفاده شده و یک طرح کنترلی

|                                    |                              |           |
|------------------------------------|------------------------------|-----------|
| ۱/۵۰                               | ضریب ایده‌آل بودن            | A         |
| $1/۳۸ \times 10^{-۲۳} \text{ J/K}$ | ثابت بولتزمن                 | k         |
|                                    | مقاومت سری برای واحد PV      | $R_s$     |
|                                    | مقاومت موازی برای واحد PV    | $R_p$     |
| ۳/۷۷ A                             | جریان اتصال کوتاه            | $I_{sso}$ |
| $1/۷ \times 10^{-۲}$               | ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه | $k_i$     |
| ۳۵۰/۱۸ K                           | درجه‌ی حرارت مرجع            | $T_r$     |
| $1/۰.۷۹۳ \times 10^{-۶} \text{ A}$ | جریان اشباع معکوس در $T_r$   | $I_{rr}$  |
| ۱/۱ eV                             | انرژی شکاف باند برای سیلیکون | $E_{gap}$ |
| ۳۰                                 | تعداد سلول‌ها بصورت موازی    | $n_p$     |
| ۷۰۰                                | تعداد سلول‌ها بصورت سری      | $n_s$     |
| ۰-۸۰۰ W/m2                         | سطح تابش خورشید              | S         |
| ۳۲۸ K                              | درجه‌ی حرارت در سطح PV       | T         |



شکل (۱): آرایش میکروشبکه‌ی AC/DC پیشنهادی

## ۲-۲-۲- مدلسازی منابع انرژی میکروشبکه

### ۱-۲-۲- مدلسازی واحد PV

در این مقاله، ذخیره‌ساز باتری توسط یک منبع ولتاژ (کنترل شده) و بصورت سری با یک مقاومت اهمی ثابت مدلسازی شده که در شکل ۳ نشان داده شده است.

در این مطالعه از ذخیره‌ساز باتری نوع نیکل-متال-هیدرید (NiMH) استفاده شده است. رابطه‌ی اندازه‌ی منبع ولتاژ کنترل شده در مدهای شارژ ( $f_1$ ) و تخلیه ( $f_2$ ) بصورت روابط (۴) و (۵) تعریف شده و رابطه‌ی ولتاژ خروجی باتری توسط رابطه‌ی (۶) بیان می‌شود [8]. در مد شارژ ( $i^* > 0$ ):

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (۴)$$

در مد تخلیه ( $i^* < 0$ ):

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{|it| + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \text{Laplace}^{-1} \left( \frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (۵)$$

$$V_{batt} = E_{batt} - R \cdot i_{batt} \quad (۶)$$

که در آن،  $V_{batt}$  ولتاژ خروجی باتری (V)،  $E_{batt}$  ولتاژ غیرخطی باتری (V)،  $E_0$  ولتاژ ثابت باتری (V)،  $R$  مقاومت داخلی باتری ( $\Omega$ )،  $Exp(s)$  دینامیک ناحیه‌ی نمایی،  $K$  ثابت پلاریزاسیون ( $\text{Ah}^{-1}$ )،  $i^*$  جریان لحظه‌ای فرکانس-پایین (A)،  $i$  جریان باتری (A)،  $it$  ظرفیت استخراجی باتری (Ah)،  $Q$  حداکثر ظرفیت باتری (Ah)،  $A$  ولتاژ نمایی (ولتاژ در ناحیه‌ی نمایی، V)،  $B$  ظرفیت نمایی (معکوس ثابت زمانی در ناحیه‌ی نمایی،  $\text{Ah}^{-1}$ ) و  $Sel(s)$  مد باتری بوده، بطوری که  $Sel(s)=0$  نشان‌دهنده‌ی مد تخلیه‌ی باتری و  $Sel(s)=1$  نشان‌دهنده‌ی مد شارژ باتری می‌باشد.

## ۲-۲-۲- مدلسازی منابع انرژی میکروشبکه

### ۱-۲-۲- مدلسازی واحد PV

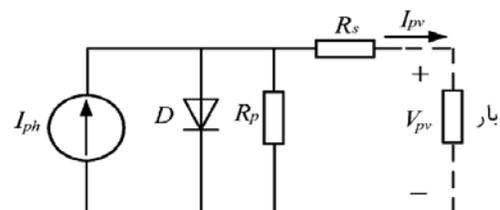
در واحد PV یک فرآیند فیزیکی بنیادی انجام می‌گیرد که از طریق آن، انرژی خورشیدی مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. فیزیک یک سلول PV، مشابه با یک دیود دارای پیوند p-n می‌باشد [5]. در شکل ۲، مدار معادل واحد PV متصل به یک بار [6] نشان داده شده است. در این مقاله، مقدار مقاومت موازی ( $R_p$ ) برابر بی-نهایت، در نظر گرفته شده و واحد PV بصورت زیر توسط یک منبع جریان (کنترل شده)، مدلسازی شده است [4, 6, 7]:

$$I_{pv} = n_p I_{ph} - n_p I_{sat} \left[ \exp \left( \frac{q}{kT} \left( \frac{V_{pv}}{n_s} + I_{pv} R_s \right) \right) - 1 \right] \quad (۱)$$

$$I_{ph} = (I_{sso} + k_i (T - T_r)) \cdot \frac{S}{1000} \quad (۲)$$

$$I_{sat} = I_{rr} \left( \frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left( \frac{qE_{gap}}{kA} \cdot \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (۳)$$

پارامترهای فوق در جدول ۱ تعریف شده‌اند.



شکل (۲): مدار معادل واحد PV [6]

جدول (۱): پارامترهای واحد PV

| نماد      | توضیحات             | مقدار                              |
|-----------|---------------------|------------------------------------|
| $V_{oc}$  | ولتاژ نامی مدار باز | ۴۰۲ V                              |
| $I_{ph}$  | فوتو-جریان          |                                    |
| $I_{sat}$ | جریان اشباع معکوس   |                                    |
| q         | بار الکترون         | $1/۶۰.۲ \times 10^{-۱۹} \text{ C}$ |

نمایند [10]. در جدول ۲، پارامترهای DFIG مورد استفاده در این مطالعه، لیست شده‌اند.

جدول (۲): پارامترهای DFIG

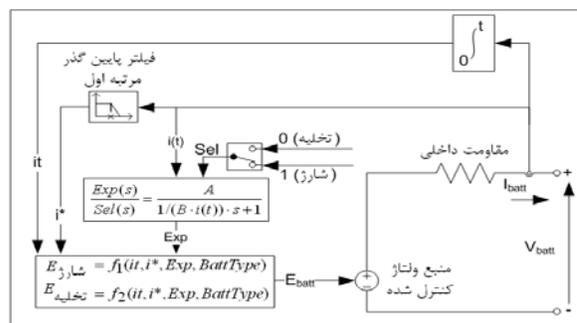
| نماد                | توضیحات                            | مقدار     |
|---------------------|------------------------------------|-----------|
| $P_{nom}$           | توان نامی                          | ۴۵ kW     |
| $V_{nom}$           | ولتاژ نامی                         | ۴۰۰ V     |
| $R_s$               | مقاومت استاتور                     | ۰/۱۱۰۶ pu |
| $L_s$               | اندوکتانس استاتور                  | ۰/۲۷۱ pu  |
| $R_r$               | مقاومت رتور                        | ۰/۰۱۵ pu  |
| $L_r$               | اندوکتانس رتور                     | ۰/۲۵۶ pu  |
| $L_m$               | اندوکتانس متقابل                   | ۵/۹ pu    |
| $J$                 | ثابت اینرسی رتور                   | ۴/۳ s     |
| $n_{pole}$          | تعداد قطبها                        | ۶         |
| $V_{DC\_nom\_DFIG}$ | ولتاژ نامی بخش DC در مبدل AC/DC/AC | ۷۰۰ V     |
| $P_m$               | توان مکانیکی نامی                  | ۴۰ kW     |

### ۳- طراحی کنترل کننده مبدل های میکروشبکه

مبدل های موجود در میکروشبکه ای AC/DC بایستی بگونه ای کنترل شوند تا یک تغذیه ی توان بدون وقفه، با بازده و کیفیت بالا را در زمان بهره برداری میکروشبکه و در شرایط وقوع اغتشاش های بزرگ و کوچک برای بارها تضمین نمایند. در این مقاله، بهره برداری جزیره ای میکروشبکه تحت اغتشاش های بزرگ (وقوع اتصال کوتاه سه فاز) و اغتشاش های کوچک (تغییر بار AC و شدت تابش خورشید در مکان PV) مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه، طرح های کنترلی برای هر یک از این مبدل ها تشریح خواهند شد.

#### ۳-۱- کنترل کننده ی مبدل Boost در واحد PV

هدف از کنترل مبدل Boost برای واحد PV، ردیابی نقطه ی حداکثر توان (MPPT) است. در دهه های گذشته، روش های زیادی برای پیدا نمودن نقطه ی حداکثر توان (MPP) پیشنهاد شده اند. در [11] یک بررسی کامل بر روی ۱۹ الگوریتم MPPT مختلف انجام گرفته است. در میان این روش ها، الگوریتم های آشوب و اغتشاش (P&O)، رسانایی افزایشی (InCond) و کنترل منطق فازی از رایج ترین روش ها می باشند. الگوریتم های P&O و InCond دارای طراحی ساده تر و توان محاسباتی کمتر نسبت به کنترل منطق فازی بوده اما دارای برخی معایب نیز هستند. از جمله ی این معایب می توان به نوسانات حول MPP (در حالت ماندگار) و از دست دادن یا اشتباه ردیابی کردن MPP در اثر تغییرات سریع سطح تابش خورشید اشاره کرد. عیب اول بدلیل گسسته بودن روش کنترلی بوده و در مورد عیب دوم می توان گفت که الگوریتم های P&O و InCond در زمان وقوع تغییر پله در سطح تابش خورشید، MPP را بسیار خوب ردیابی می کنند؛ اما در شرایطی که تغییر سطح تابش بصورت یک نمودار شیب باشد، منحنی



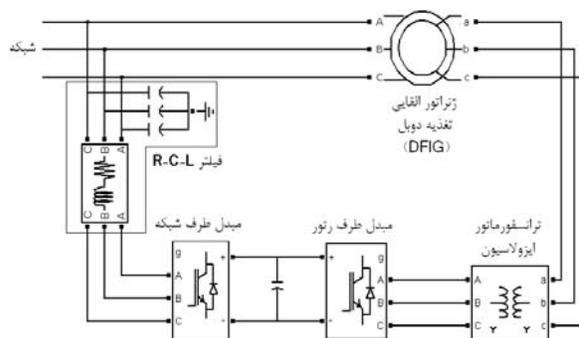
شکل (۳): مدل غیرخطی باتری [8]

### ۲-۲-۳- مدلسازی ذخیره ساز ابرخازن

ذخیره ساز ابرخازن، عمل ذخیره سازی انرژی را در یک میدان الکترواستاتیکی، که ناشی از جداسازی بارهای الکتریکی است، فراهم می کند. در ذخیره ساز ابرخازن می توان بسیار سریع در حدود چندین میلی ثانیه و سریعتر از ذخیره سازهای باتری، به انرژی آن دسترسی پیدا کرد. ویژگی های مهم ذخیره ساز ابرخازن عبارتند از: طول عمر بالا (بدین معنی که امکان فرآیندهای شارژ و تخلیه را برای تعداد فوق العاده بسیار زیاد می دهد) و بازده بالا که در حدود ۹۰٪ می باشد [9]. در این مقاله، ذخیره ساز ابرخازن توسط یک مؤلفه ی خازنی ایده آل (بدون مقاومت اهمی) مدلسازی شده است.

### ۲-۲-۴- مدلسازی واحد DFIG

واحد DFIG، یک ماشین القایی رتور سیم پیچی بوده که نیازمند تحریک هم در ترمینال های رتور و هم در استاتور است. در شکل ۴، نحوه ی اتصال واحد DFIG به میکروشبکه، نشان داده شده است.



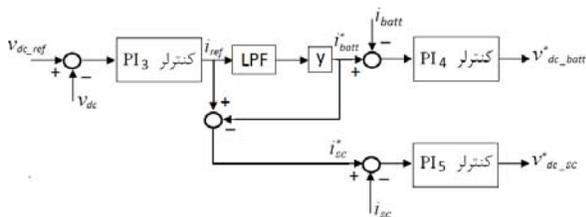
شکل (۴): نحوه ی اتصال واحد DFIG به میکروشبکه

عملکرد ژنراتور القایی در سرعت های زیرسنکرون و فوق سنکرون امکان پذیر می باشد. در سرعت های زیرسنکرون، استاتور DFIG تمامی توان تولیدی خود را به شبکه، تغذیه نموده اما مقداری توان از طرف شبکه به رتور تغذیه می شود. با این حال، در مد فوق سنکرون، تمامی توان تولیدی استاتور و رتور DFIG به شبکه، تغذیه می شود. از اینرو، به دو مبدل قدرت (دارای پل پشت به پشت و یک بخش DC) نیاز است تا بتوانند توان عبوری را در هر دو جهت برای رتور DFIG، کنترل

### ۳-۲- طرح کنترل پیشنهادی برای مبدل‌ها در

#### ذخیره‌سازهای ترکیبی باتری و ابرخازن

ذخیره‌ساز باتری دارای چگالی انرژی بالایی بوده، در حالیکه دارای سرعت شارژ و تخلیه نسبتاً آهسته‌ای می‌باشد. از طرف دیگر، ذخیره-ساز ابرخازن دارای چگالی توان بالا و پاسخ بسیار سریع‌تری است. از اینرو در این مقاله، از ذخیره‌سازهای باتری و ابرخازن بعنوان مکمل یکدیگر استفاده شده است. در این مقاله، بر اساس مشخصه‌های باتری و ابرخازن، توسط مؤلفان یک طرح کنترلی جدید بصورت شکل ۷ برای ترکیب این ذخیره‌سازها پیشنهاد و طراحی شده است.



شکل (۷): طرح کنترلی برای ذخیره‌سازهای ترکیبی باتری و ابرخازن در این طرح، ولتاژ شین DC بصورت هماهنگ توسط ذخیره-سازهای باتری و ابرخازن کنترل می‌شود. در ابتدا، ولتاژ اندازه‌گیری شده‌ی شین DC ( $V_{dc}$ ) با ولتاژ مرجع شین DC ( $V_{dc\_ref}$ ) مقایسه شده و اختلاف آن به یک کنترل‌کننده PI بمنظور تولید جریان مرجع ( $i_{ref}$ ) ارسال می‌شود. سپس  $i_{ref}$  به دو بخش تقسیم می‌شود. یک بخش، جریان مرجع باتری ( $i_{batt}^*$ ) بوده که پس از عبور از فیلتر پایین‌گذر (LPF) و یک ضریب  $\gamma$  بدست می‌آید. بخش دیگر  $i_{sc}^*$  بوده که اختلاف بین  $i_{batt}^*$  و  $i_{ref}$  می‌باشد. در این مطالعه، ضریب  $\gamma$  برابر ۰/۹۷ و فرکانس قطع فیلتر برابر ۲۵ Hz در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین در این استراتژی کنترل، بخش فرکانس-بالا و جزء بسیار کوچکی از اغتشاش فرکانس-پایین در ولتاژ شین DC توسط ذخیره‌ساز ابرخازن جبران شده و بخش بسیار بزرگی از اغتشاش فرکانس-پایین توسط ذخیره‌ساز باتری جبران می‌شود.

### ۳-۳- کنترل‌کننده‌ی اینورتر

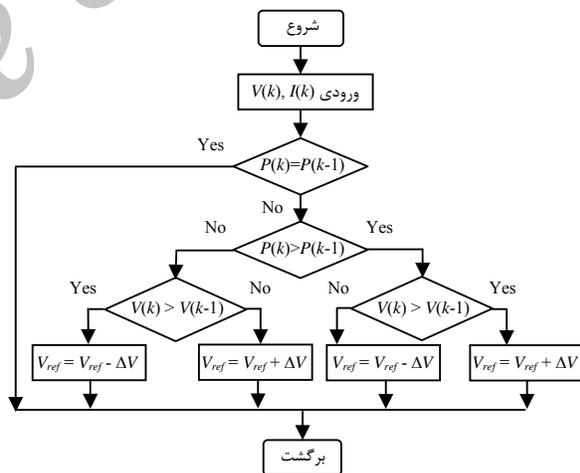
طرح کنترل ولتاژ چندین حلقه‌ای برای یک اینورتر در [16] تشریح شده است که در آن، هدف از این طرح فراهم نمودن یک ولتاژ AC با کیفیت بالا به همراه پاسخ دینامیکی خوب در مقادیر مختلف بار می‌باشد. در این مقاله، از این طرح کنترلی (با حداقل اصلاحات) مطابق شکل ۸ برای کنترل اینورتر استفاده شده است.

P-V همواره در حال تغییر بوده و الگوریتم‌های مذکور قادر به ردیابی صحیح MPP در این شرایط نمی‌باشند [12].

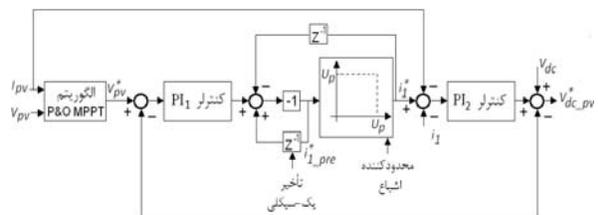
از آنجا که در این مقاله، تغییرات سطح تابش خورشید بصورت پله‌ای اعمال شده و الگوریتم P&O دارای عملکرد مطلوبی در این شرایط می‌باشد، لذا در این مقاله، مقدار مرجع برای ولتاژ ترمینال PV ( $V_{pv}^*$ ) توسط این الگوریتم کنترلی، مطابق شکل ۵ [13-14]، بدست آمده است.

اساس عملکرد الگوریتم P&O بدین صورت می‌باشد: اگر افزایشی در توان تولیدی (P) وجود داشته باشد، اغتشاش ( $\Delta V$ ) بایستی در جهت افزایش ولتاژ (V) تزریق شود و اگر توان خروجی کاهش یابد اغتشاش بایستی در جهت کاهش ولتاژ تزریق شود. این فرآیند تا زمانی که نقطه‌ی حداکثر توان (MPP) بدست آید تکرار می‌شود.

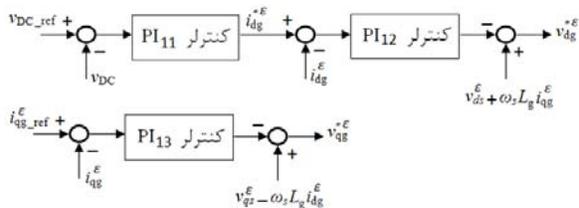
همچنین در [15] یک طرح کنترلی برای مبدل Boost تشریح شده است که هدف از آن فراهم نمودن یک ولتاژ DC با کیفیت بالا به همراه پاسخ دینامیکی خوب می‌باشد. در این مقاله، این طرح کنترلی به همراه الگوریتم P&O استفاده شده است (شکل ۶ را ببینید). حلقه-ی کنترل بیرونی، ردیابی ولتاژ مرجع را با خطای حالت ماندگار صفر، تضمین نموده در حالیکه حلقه‌ی کنترل داخلی پاسخ دینامیکی را بهبود می‌بخشد. تأخیر یک-سیکلی و محدودکننده‌ی اشباع در شکل ۶ به طرح کنترلی در ردیابی سریعتر  $V_{pv}^*$  کمک می‌کنند [4].



شکل (۵): الگوریتم P&O برای ردیابی MPP در واحد PV [14]



شکل (۶): طرح کنترلی برای مبدل Boost در واحد PV



شکل (۱۰): طرح کنترلی برای مبدل طرف شبکه در واحد DFIG

### ۳-۴-۳- کنترل‌کننده‌ی زاویه‌ی گام

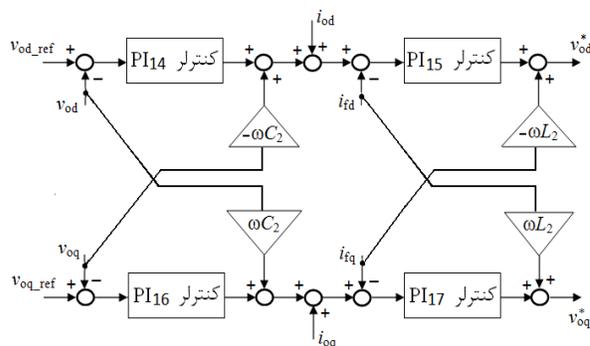
هنگامی که سرعت باد از سرعت نامی توربین بیشتر می‌شود، زاویه‌ی گام تیغه‌های توربین بایستی بمنظور کاهش توان مکانیکی وارد بر محور توربین (به کمتر از مقدار نامی آن) تغییر یابد. همچنین هنگامی که سرعت باد کمتر از سرعت نامی توربین می‌شود، تیغه‌ها بایستی در حداقل زاویه‌ی گام بمنظور بیشینه نمودن توان مکانیکی وارد بر توربین تنظیم شوند. از اینرو، زاویه‌ی گام تیغه‌ها بایستی بمنظور نگهداشتن سرعت چرخش توربین بادی در یک سرعت بهینه و مجاز کنترل شود [20].

### ۴- نتایج شبیه‌سازی

بمنظور بررسی توانمندی و عملکرد صحیح کنترل‌کننده‌ها در ساختار پیشنهادی میکروشبکه‌ی AC/DC، ابتدا مطالعه تحت یک اغتشاش بزرگ یعنی وقوع خطای سه‌فاز موقت (که بین ترانسفورماتور ایزوله و اینورتر با زمان رفع خطا ۱۵۰ ms اعمال شده است) انجام گرفته است. پاسخ‌های ولتاژ و فرکانس میکروشبکه تحت این اغتشاش بزرگ در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده‌اند. وقوع خطا در ثانیه‌ی ۴ رخ داده است.

بدیهی است که بهنگام وقوع خطای سه‌فاز، اندازه‌ی ولتاژ شین AC سریعاً به مقدار صفر کاهش یافته و فرکانس آن افزایش می‌یابد. در مدت وقوع خطا اندازه‌ی ولتاژ شین DC نیز کاهش پیدا می‌کند، اما بدلیل وجود اینورتر و منابع انرژی موجود در بخش DC میکروشبکه، میزان کاهش ولتاژ شین DC کمتر از میزان کاهش ولتاژ شین AC است.

پس از رفع خطا، اندازه‌ی ولتاژ شین AC افزایش یافته و پس از گذشت مدت زمان کوتاهی به مقدار اولیه‌ی خود (مقدار پیش از وقوع خطا) می‌رسد. چنین فرآیند مشابهی در ولتاژ شین DC نیز مشاهده شده و مقدار آن سریعاً به مقدار اولیه‌ی خود خواهد رسید. همچنین فرکانس شین AC پس از گذشت مدت زمان کوتاهی به مقدار اولیه‌ی خود می‌رسد.

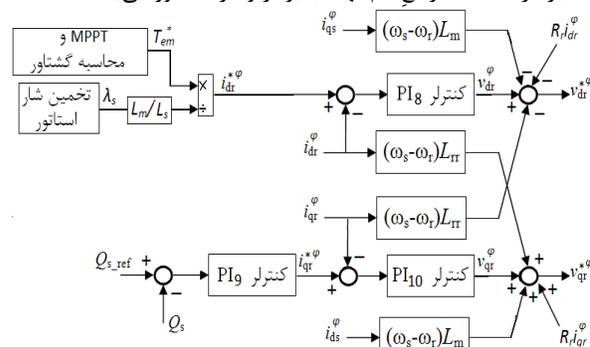


شکل (۸): طرح کنترلی برای اینورتر

### ۳-۴- کنترل‌کننده‌ی مبدل‌های واحد DFIG

#### ۳-۴-۱- کنترل‌کننده‌ی مبدل طرف رتور

در مقالات مختلف، طرح‌های کنترلی متعددی برای مبدل طرف رتور پیشنهاد شده است: مانند کنترل گشتاور مستقیم (DTC) [17] و کنترل توان مستقیم (DPC) [18]. در این مقاله، طرح DTC پیشنهادی در [4] (شکل ۹ را ببینید) برای مبدل طرف رتور انتخاب شده است. اهداف مورد نظر در این طرح کنترلی، تولید حداکثر توان اکتیو (انجام MPPT) توسط الگوریتم P&O و کنترل توان راکتیو خروجی از استاتور DFIG است. در شکل ۹، نماد  $\varphi$  نشان‌دهنده‌ی متغیر در دستگاه مرجع هم‌جهت با بردار ولتاژ استاتور می‌باشد.

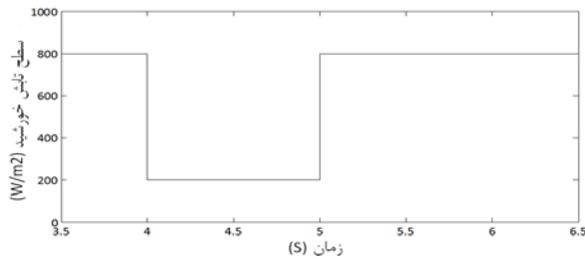


شکل (۹): طرح DTC برای مبدل طرف رتور در واحد DFIG

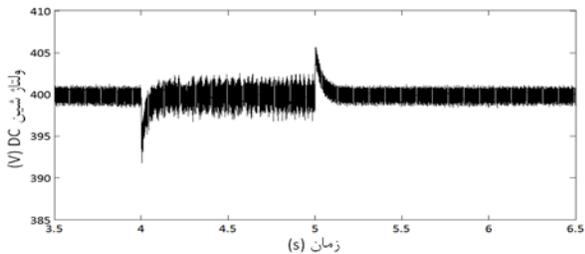
#### ۳-۴-۲- کنترل‌کننده‌ی مبدل طرف شبکه

وظیفه‌ی مبدل طرف شبکه، ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC با صرفنظر از جهت توان عبوری در رتور است. در این مقاله، طرح کنترلی پیشنهادی در [19]، برای مبدل طرف شبکه انتخاب شده و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بمنظور دستیابی به کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو جاری بین شبکه و مبدل طرف شبکه، کنترل مبدل در دستگاه مرجع هم‌جهت با بردار ولتاژ شبکه انجام می‌شود، بطوریکه محور  $d$  منطبق بر موقعیت بردار ولتاژ شبکه است [19]. در شکل ۱۰، نماد  $\varepsilon$  نشان‌دهنده‌ی متغیر در دستگاه مرجع هم‌جهت با ولتاژ شبکه است.

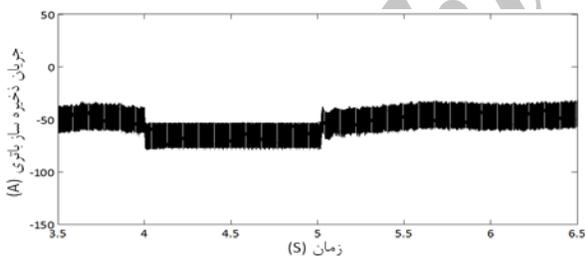
با افزایش پله‌ای سطح تابش خورشید بمقدار قبلی خود ( $800 \text{ W/m}^2$ )، مجموع "توان انتقالی (از بخش AC) و توان تولیدی در بخش DC" نسبت به "توان مصرفی موجود در بخش DC" نیز ناگهان افزایش یافته که منجر به افزایش اندازه‌ی ولتاژ شین DC می‌شود؛ اما این عدم تعادل مجدداً توسط ذخیره‌سازهای باتری و ابرخازن بصورت کاهش توان تزریقی آن‌ها به میکروشبکه، جبران شده و ولتاژ شین DC سریعاً بازیابی خواهد شد.



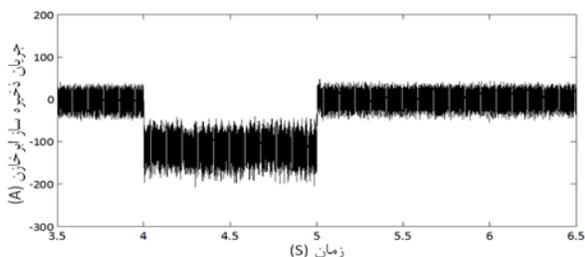
شکل (۱۴): تغییرات سطح تابش خورشید



شکل (۱۵): اندازه‌ی ولتاژ شین DC در حالت تغییر سطح تابش خورشید

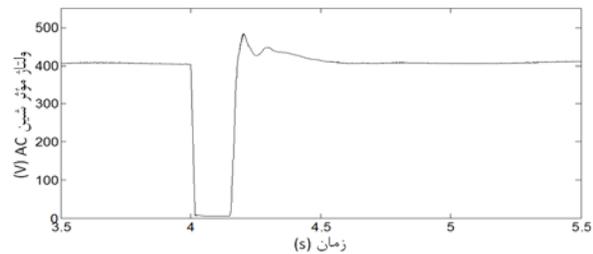


شکل (۱۶): جریان باتری در حالت تغییر سطح تابش خورشید

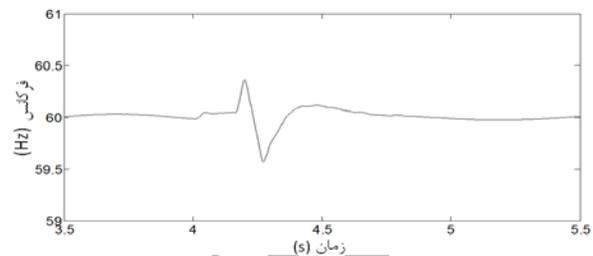


شکل (۱۷): جریان ابرخازن در حالت تغییر سطح تابش خورشید

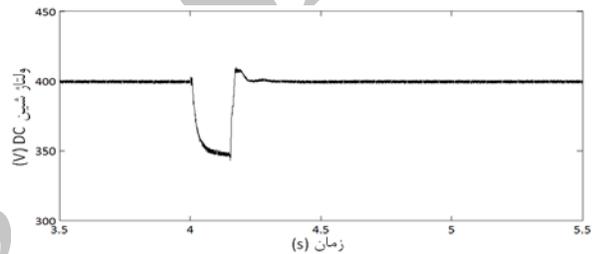
در گام بعدی، تغییرات بار موجود در شین AC مطالعه شده است. مقدار بار شین AC در ثانیه‌ی ۵ بصورت پله‌ای از ۳۰ kW به ۵۰



شکل (۱۱): اندازه‌ی ولتاژ شین AC در حالت وقوع خطای سه‌فاز



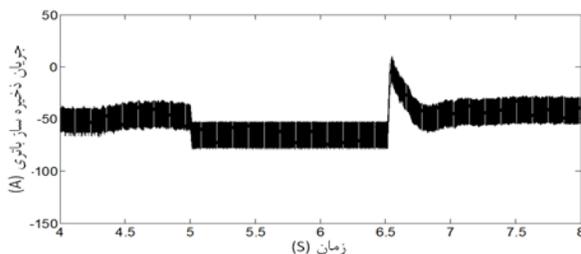
شکل (۱۲): فرکانس شین AC در حالت وقوع خطای سه‌فاز



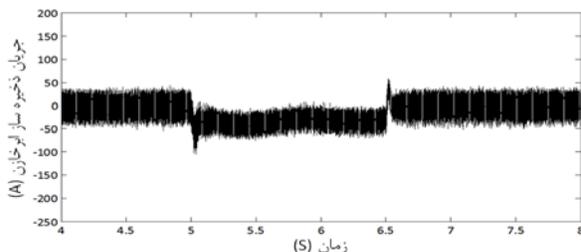
شکل (۱۳): اندازه‌ی ولتاژ شین DC در حالت وقوع خطای سه‌فاز

در ادامه، نوسانات توان تولیدی و بار مصرفی بعنوان اغتشاشات کوچک، مطالعه شده‌اند. ابتدا، تغییر شدت تابش خورشید در مکان PV بصورت شکل ۱۴ در نظر گرفته شده است. در ثانیه‌ی ۴، در سطح تابش خورشید یک تغییر پله‌ای ایجاد شده و مقدار آن ناگهان از  $800 \text{ W/m}^2$  به  $200 \text{ W/m}^2$  کاهش یافته و در ثانیه‌ی ۵، مجدداً به مقدار  $800 \text{ W/m}^2$  بازگردانده شده است. تغییرات اندازه‌ی ولتاژ شین DC، جریان باتری و جریان ابرخازن در اثر این اغتشاشات بترتیب در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ نشان داده شده‌اند (علامت منفی برای جریان ذخیره‌سازها نشان‌دهنده‌ی تزریق توان توسط آن‌ها به میکروشبکه بوده و علامت مثبت نشان‌دهنده‌ی ذخیره‌سازی توان در آن‌ها می‌باشد).

در ثانیه‌ی ۴، هنگامی که توان تولیدی PV کاهش می‌یابد (ناشی از کاهش سطح تابش خورشید)، مجموع "توان انتقالی (از بخش AC) و توان تولیدی در بخش DC" نسبت به "توان مصرفی موجود در بخش DC" کاهش یافته که منجر به کاهش اندازه‌ی ولتاژ شین DC می‌شود؛ اما بسرعت این عدم تعادل در تولید و مصرف توسط ذخیره‌سازها جبران شده که منجر به بازیابی سریع ولتاژ شین DC خواهد شد؛ بدین صورت که ذخیره‌سازهای باتری و ابرخازن با تزریق توان (بیشتری) به میکروشبکه، کاهش توان تولیدی PV را جبران خواهند نمود.



شکل (۲۱): جریان ذخیره‌ساز باتری در حالت تغییر بار AC



شکل (۲۲): جریان ذخیره‌ساز ابرخازن در حالت تغییر بار AC

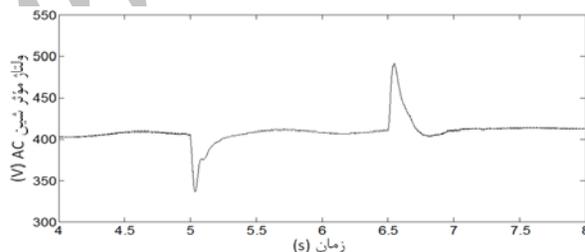
## ۵- نتیجه

در این مقاله، ابتدا یک ساختار جدید از میکروشبکه‌ی AC/DC مستقل شامل واحدهای تولیدی PV و DFIG، ذخیره‌سازهای باتری و ابرخازن و بارهای AC و DC پیشنهاد شده است. در ادامه، به مدلسازی منابع انرژی مذکور پرداخته شده است. همچنین در این مقاله، طرح‌های کنترلی برای کنترل‌کننده‌ی مبدل‌های موجود در میکروشبکه بمنظور بهبود پایداری فرکانس و ولتاژ شین‌های AC و DC طراحی، توسعه و پیشنهاد داده شده‌اند. سپس عملکرد کنترل‌کننده‌ها در کنترل ولتاژ و فرکانس میکروشبکه تحت وقوع خطای اتصال کوتاه سه‌فاز، تغییرات توان تولیدی PV و توان مصرفی بار شین AC مطالعه شده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها توانمندی، صحت و دقت طرح‌های کنترلی مورد استفاده را در پایداری‌سازی و بازیابی سریع فرکانس و ولتاژ میکروشبکه نشان می‌دهند.

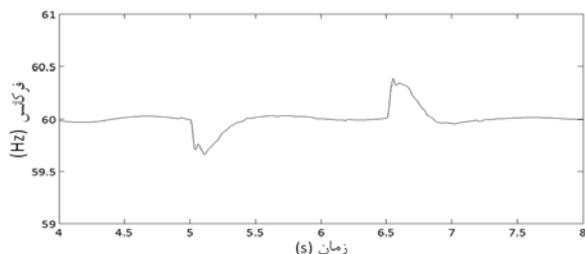
## مراجع

- [1] Mohamed, F. A., *Microgrid Modeling and Online Management*, Ph.D. Thesis, Helsinki University of Technology, Finland, 2008.
- [2] Jayawarna, N., Wut, X., Zhangt, Y., Jenkins, N., Barnes, M., "Stability of a microgrid," 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Dublin, March 2006, pp. 316-320.
- [3] Osika, O., *Stability of Microgrids and Inverter-Dominated Grids with High Share of Decentralized Sources*, Kassel University, Kassel, Germany, 2005.
- [4] Liu, X., Wang, P., Loh, P. C., "A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 2, pp. 278-286, 2011.
- [5] Balaguer, I. J., Lei, Q., Yang, S., Supatti, U., Peng, F. Z., "Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation", IEEE

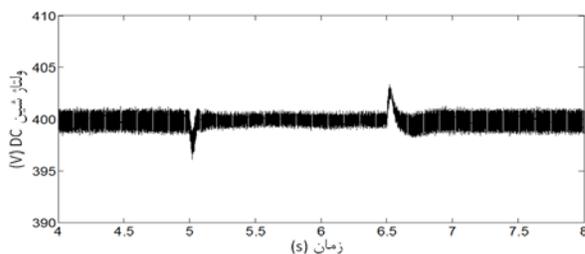
تغییر نموده و در ثانیه‌ی ۶/۵ نیز بصورت پله‌ای به مقدار اولیه‌ی خود بازگردانده می‌شود. تغییرات اندازه‌ی ولتاژ شین AC، فرکانس شین AC، اندازه‌ی ولتاژ شین DC، جریان باتری و جریان ابرخازن در اثر وقوع این اغتشاشات بترتیب در شکل‌های ۱۸ تا ۲۲ نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، بهنگام افزایش بار مصرفی در شین AC، ناگهان "مجموع توان انتقالی (از بخش DC) و توان تولیدی در بخش AC" از "توان مصرفی در بخش AC" کمتر شده که بنوبه‌ی خود منجر به کاهش اندازه‌ی ولتاژ و فرکانس شین AC می‌شود. لازم بذکر است که کاهش اندازه‌ی ولتاژ و فرکانس شین AC بر اندازه‌ی ولتاژ شین DC نیز تأثیر گذاشته و اندکی آن را کاهش خواهد داد. اما تغییرات فوق‌الذکر در فرکانس و اندازه‌ی ولتاژ شین‌ها توسط توان تزریقی ذخیره‌سازها به میکروشبکه سریعاً جبران خواهند شد (شکل‌های ۲۱ و ۲۲ را ببینید). در ثانیه‌ی ۶/۵، مقدار بار AC به مقدار اولیه‌ی خود (۳۰ kW) بصورت پله‌ای کاهش یافته که بر عکس حالت قبل موجب افزایش لحظه‌ای "مجموع توان انتقالی (از بخش DC) و تولیدی در بخش AC" نسبت به "توان مصرفی در بخش AC" شده و در نتیجه موجب افزایش اندازه‌ی ولتاژ و فرکانس شین AC و افزایش اندکی در اندازه‌ی ولتاژ شین DC می‌شود. البته این تغییرات نیز بسرعت توسط کاهش توان تزریقی ذخیره‌سازها جبران می‌شوند (شکل‌های ۲۱ و ۲۲ را ببینید).



شکل (۱۸): اندازه‌ی ولتاژ شین AC در حالت تغییر بار AC



شکل (۱۹): فرکانس شین AC در حالت تغییر بار AC



شکل (۲۰): اندازه‌ی ولتاژ شین DC در حالت تغییر بار AC

generators", GE-Power Systems Energy Consulting, October 2003,  
<http://www.easthavenwindfarm.com/filing/high/modeling.pdf>

### زیر نویس ها

- 1 Distributed Generation
- 2 Photo-Voltaic
- 3 Hybrid
- 4 Doubly Fed Induction Generator
- 5 Bi-directional
- 6 Back to Back
- 7 Maximum Power Point Tracking
- 8 Maximum Power Point
- 9 Perturbation and Observation
- 10 Incremental Conductance
- 11 Low-Pass Filter
- 12 Direct Torque Control
- 13 Direct Power Control

- Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 1, pp. 147-157, 2011.
- [6] Katiraei, F., Irvani, M. R., Lehn, P. W., "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, pp. 248-257, 2005.
  - [7] Wang, H., Khambadkone, A. M., Yu, X., "Control of parallel connected power converters for low voltage microgrid: Part II: Dynamic electro-thermal modeling", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, No. 12, pp. 2971- 2980, 2010.
  - [8] Tremblay, O., Dessaint, L.-A., Dekkiche, A.-I., "A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles," Vehicle Power and Propulsion Conf., September 2007, pp. 284-289.
  - [9] Strunz, K., Louie, H., "Cache energy control for storage: power system integration and education based on analogies derived from computer engineering", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 1, pp. 12-19, 2009.
  - [10] Muller, S., Deicke, M., De Doncker, R. W., "Adjustable speed generators for wind turbines based on doubly fed induction machines and 4-quadrant IGBT converters linked to the rotor", Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, Rome, Vol. 4, October 2000, pp. 2249-2254.
  - [11] ESRAM, T., Chapman, P. L., "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, pp. 439-449, 2007.
  - [12] Morales, D. S., *Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications*, M.Sc. Thesis, Aalto University, Finland, 2010.
  - [13] Khanh, L. N., Seo, J.-J., Kim, Y.-S., Won, D.-J., "Power-management strategies for a grid-connected PV-FC hybrid system", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 3, pp. 1874-1882, 2010.
  - [14] Majumder, R., Shahnia, F., Ghosh, A., Ledwich, G., Wishart M., Zare, F., "Operation and control of a microgrid containing inertial and non-inertial micro sources", IEEE Region 10 Conference (TENCON), Singapore, January 2009, pp. 1-6.
  - [15] Bryantand, B., Kazimierczuk, M. K., "Voltage loop of boost PWM DC-DC converters with peak current-mode control", IEEE Transactions on Circuits Systems I, Reg. Papers, Vol. 53, No. 1, pp. 99-105, 2006.
  - [16] Marwali, M. N., Keyhani, A., "Control of distributed generation systems-Part I: Voltages and currents control", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 6, pp. 1541-1550, 2004.
  - [17] Arnalte, S., Burgos, J. C., amenedo, J. L. R., "Direct torque control of a doubly-fed induction generator for variable speed wind turbines", Journal of Electrical Power Components & Systems, Vol. 30, No. 2, pp. 199-216, 2002.
  - [18] Zhiand, D. W., Xu, L., "Direct power control of DFIG with constant switching frequency and improved transient performance", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 1, pp. 110-118, 2007.
  - [19] Yang, L., Xu, Z., Østergaard, J., Dong, Z. Y., Wong, K. P., Ma, X., "Oscillatory stability and eigenvalue sensitivity analysis of a DFIG wind turbine system", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, No. 1, pp. 328-339, 2011.
  - [20] Miller, N. W., Price, W. W., Sanchez-Gasca, J. J., "Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 wind turbine-