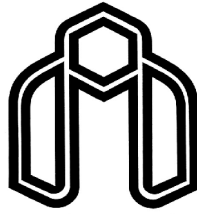


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک

گروه قدرت

## کنترل و شبیه سازی ژنراتور القایی تغذیه دابل در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه

دانشجو: احسان جوان

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

دکتر محسن اصیلی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیر ۱۳۹۰



مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره: ۷۰۸۶۷/ت.ب  
تاریخ: ۹۰/۰۴/۱۲  
ویرایش: -----

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد / آقای: **احسان جوان** رشته: **برق** گرایش: **قدرت**  
تحت عنوان: **کنترل و شبیه سازی ژنراتور القایی تغذیه دوپل در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه**  
که در تاریخ **۹۰/۰۴/۱۲** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه **بسیار خوب** امتیاز **۱۸.۷**)  / دفاع مجدد  / مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

| امضاء | مرتبه علمی | نام و نام خانوادگی | عضو هیأت داوران                 |
|-------|------------|--------------------|---------------------------------|
|       | رئیس       | احمد رازی          | ۱- استاد راهنما                 |
|       | استاد      | محسن اسینی         | ۲- استاد مشاور                  |
|       | استاد      | مخ انبازاده        | ۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی |
|       | استاد      | حمیدرضا حسین بیگ   | ۴- استاد ممتحن                  |
|       | استاد      | امین صاحب زاده     | ۵- استاد ممتحن                  |

رئیس دانشکده: **غیاث احمدی**

تقدیم به پدر و مادر عزیزم که:

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش و جهودشان که در این سردترین روزگار بهترین پشتیبانم است

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهندگان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

با سپاس از:

استاد ارجمند جناب آقای دکتر احمد دارابی که در انجام این پایان نامه همواره از راهنمایی های  
ارزنده ایشان بهره مند گردیده ام.

و با تشکر از:

استاد گرامی جناب آقای دکتر محسن اصیلی که مشاوره های ارزنده ایشان بسیار آموزنده و  
راهگشا بود.

## تعهد نامه

اینجانب ..... **احسان جهان** ..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ..... **برق قدرت** ..... دانشکده مهندسی برق و رباتیک

دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان :

**کنترل و سیم سازی ریزاتور القایی تغذیه دوپل در شرایط نامعادلی ولتاژ یک**

تحت راهنمایی آقای دکتر ..... **دلایی** ..... متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت های آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ :

امضاء دانشجو



### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

## چکیده:

کنترل ژنراتورهای القایی تغذیه دابل (DFIG) متصل به توربین بادی، بدون در نظر گرفتن شرایط نامتعادلی ولتاژ در شبکه، عملکرد آنها را با اشکال روبرو می‌کند. به طوریکه در این شرایط وقوع یک نامتعادلی ولتاژ پایین در شبکه می‌تواند جریانهای نامتعادل بالایی را در استاتور بوجود آورد و باعث ایجاد نوساناتی با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه در گشتاور الکترومغناطیسی، توان و نیز ولتاژ خازن DC-Link، گردد. در این پایان نامه، پس از مدلسازی سیستم DFIG در شرایط متعادل و تحلیل روش کنترل برداری برای کنترل آن، به مدلسازی و کنترل آن در شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه، پرداخته می‌شود. در این شرایط، برای مدلسازی و کنترل DFIG از ۲ دستگاه مرجع سنکرون مثبت و منفی  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$ ، استفاده می‌شود. کنترل مبدلها در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$ ، مشابه شرایط متعادل می‌باشد ولی برای کنترل جریانهای توالی منفی روتور و نیز جریانهای توالی منفی خروجی از مبدل سمت شبکه، در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$ ، توسط مبدلهای سمت روتور و شبکه، می‌توان اهداف کنترلی گوناگونی در نظر گرفت که از ترکیب آنها، روشهای مختلفی برای کنترل هماهنگ مبدلهای سمت روتور و شبکه، بدست می‌آید. در بین این روشها، کاملترین روش به اینصورت است که با کنترل مبدل سمت روتور، نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی از بین می‌روند و با کنترل مبدل سمت شبکه نیز نوسانات توان اکتیو استاتور توسط توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه خنثی می‌گردند و در نتیجه نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG، حذف می‌گردند. اما اشکالی که در این روش وجود دارد این است که با افزایش درصد نامتعادلی ولتاژ، دامنه نوسانات توان اکتیو استاتور نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه خنثی کردن کامل نوسانات مذکور، با توجه به محدودیت ظرفیت مبدل سمت شبکه، امکانپذیر نمی‌باشد. برای رفع مشکل فوق، ۲ روش پیشنهاد می‌گردد به طوریکه در روش پیشنهادی اول، با حذف نوسانات جریان های سه فاز روتور توسط مبدل سمت روتور، دامنه نوسانات گشتاور و توان اکتیو استاتور نیز تا حدودی کاهش

می یابد و شرایط برای کنترل مبدل سمت شبکه به منظور خنثی کردن نوسانات توان اکتیو استاتور، راحتتر می گردد. در روش دیگر، جریانهای dq توالی منفی روتور، میانگینی از جریانهای مرجع بدست آمده برای حذف نوسانات توان اکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی، در نظر گرفته می شوند. به ازای این جریانها، علاوه بر کاهش دامنه نوسانات توان اکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی، جریان های سه فاز استاتور نیز متعادل می گردند. با توجه به اینکه دامنه نوسانات توان اکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی، در این روش نسبت به روش پیشنهادی اول، کمتر می باشد بنابراین استفاده از این روش به جای روش اول، پیشنهاد می گردد. از طرفی با توجه به اینکه تخمین زاویه بردار ولتاژ استاتور بخصوص در شرایط نامتعادلی ولتاژ استاتور، دقیقتر و در عین حال ساده تر صورت می گیرد و نتایج بهتری را برای کنترل DFIG، به همراه دارد بنابراین کنترل هماهنگ مبدلهای سمت روتور و شبکه در دستگاه مرجع dq همراستا با بردار ولتاژ استاتور، پیاده سازی می گردد. نتایج شبیه سازی بدست آمده برای یک ژنراتور القایی تغذیه دوپل (KW) ۷/۵ متصل به توربین بادی به کمک نرم افزار Matlab/Simulink، صحت دلایل ارائه شده برای به کار گیری روشهای پیشنهادی فوق را تأیید می کند.

**کلمات کلیدی:** ژنراتور القایی تغذیه دوپل، توربین باد، کنترل، دستگاه مرجع، نامتعادلی ولتاژ



لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

- [1] Javan.E, Darabi. A, (2011), “A New Control Strategy of DFIG-based Wind Turbines under Unbalanced Grid Voltage Conditions,” **PEDSTC Conference**, pp. **175-180**.
- [2] Javan.E, Darabi. A, Nikzad. V.R, Shahsavari. S, (2011), “Coordinated Control of the Converters of DFIG Using Stator-Voltage Oriented Frame during Network Unbalance Considering the GSC Limits,” **UPEC Conference**.

## فهرست مطالب

| صفحه | عنوان  |
|------|--|
| ۱    | فصل اول: مقدمه   |
| ۷    | فصل دوم: مدلسازی و کنترل ژنراتور القایی تغذیه دابل در شرایط متعادل         |
| ۷    | ۱-۲- مقدمه   |
| ۷    | ۲-۲- ساختار ژنراتور القایی تغذیه دابل                                      |
| ۹    | ۳-۲- مدلسازی توربین باد  |
| ۱۳   | ۴-۲- مدلسازی ژنراتور القایی تغذیه دابل                                     |
| ۱۳   | ۱-۴-۲- مدلسازی ژنراتور القایی و مبدل سمت روتور                             |
| ۱۳   | ۱-۱-۴-۲- دستگاههای مرجع dq   |
| ۱۵   | ۲-۱-۴-۲- مدلسازی در دستگاه مرجع dq   |
| ۱۸   | ۲-۴-۲- مدلسازی مبدل سمت شبکه و خازن DC-Link                                |
| ۲۰   | ۵-۲- کنترل ژنراتور القایی تغذیه دابل                                       |
| ۲۱   | ۱-۵-۲- کنترل RSC   |
| ۲۲   | ۱-۱-۵-۲- کنترل RSC در دستگاه مرجع همراه با بردار شار استاتور               |
| ۲۳   | ۲-۱-۵-۲- کنترل RSC در دستگاه مرجع همراه با بردار ولتاژ استاتور             |
| ۲۵   | ۳-۱-۵-۲- طراحی کنترلر جریان  |
| ۲۷   | ۲-۵-۲- کنترل GSC   |
| ۲۹   | فصل سوم: مدلسازی و کنترل ژنراتور القایی تغذیه دابل در شرایط نامتعادل ولتاژ |
| ۲۹   | ۱-۳- مقدمه   |
| ۲۹   | ۲-۳- اصول مؤلفه های متقارن   |
| ۳۰   | ۳-۳- ولتاژ نامتعادل  |
| ۳۲   | ۴-۳- دلایل ایجاد نامتعادلی ولتاژ   |
| ۳۳   | ۵-۳- اثر نامتعادلی ولتاژ بر عملکرد ژنراتور القایی تغذیه دابل               |
| ۳۶   | ۶-۳- مدلسازی ژنراتور القایی تغذیه دابل در شرایط نامتعادلی ولتاژ            |
| ۳۶   | ۱-۶-۳- دستگاههای مرجع در شرایط ولتاژ نامتعادل                              |

|     |  |
|-----|--|
| ۳۹  | ۲-۶-۳- مدلسازی ژنراتور القایی و مبدل سمت روتور   |
| ۴۳  | ۳-۶-۳- مدلسازی مبدل سمت شبکه و خازن DC-Link  |
| ۴۵  | ۷-۷- کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوپل در شرایط نامتعادلی ولتاژ                                    |
| ۴۵  | ۱-۷-۳- کنترل RSC   |
| ۴۶  | ۱-۱-۷-۳- کنترل RSC در دستگاه مرجع همراستا با بردار شار توالی مثبت استاتور                        |
| ۴۹  | ۲-۱-۷-۳- کنترل RSC در دستگاه مرجع همراستا با بردار ولتاژ توالی مثبت استاتور                      |
| ۵۰  | ۳-۱-۷-۳- طراحی کنترلر جریان  |
| ۵۳  | ۲-۷-۳- کنترل GSC   |
| ۵۴  | ۱-۲-۷-۳- کنترل GSC برای متعادل کردن جریان کل خروجی از DFIG                                       |
| ۵۴  | ۲-۲-۷-۳- کنترل GSC برای از بین بردن نوسانات توان اکتیو کل خروجی                                  |
| ۵۵  | ۱-۲-۲-۷-۳- کنترل RSC و GSC به ترتیب در دستگاه همراستا با شار و ولتاژ استاتور                     |
| ۵۶  | ۲-۲-۲-۷-۳- کنترل RSC و GSC در دستگاه همراستا با ولتاژ استاتور                                    |
| ۵۷  | ۳-۲-۷-۳- طراحی کنترلر جریان  |
| ۶۰  | <b>فصل چهارم: شبیه سازی عملکرد و کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوپل در شرایط متعادل</b>             |
| ۶۰  | ۱-۴- مقدمه   |
| ۶۱  | ۲-۴- کنترل RSC و GSC به ترتیب در دستگاه های dq همراستا با بردار شار و ولتاژ استاتور              |
| ۶۱  | ۱-۲-۴- شرایط کاری در بالای سرعت سنکرون   |
| ۷۲  | ۲-۲-۴- شرایط کاری در پایین سرعت سنکرون   |
| ۸۲  | ۳-۲-۴- کنترل توان راکتیو خروجی از DFIG   |
| ۸۷  | ۳-۴- کنترل RSC و GSC به ترتیب در دستگاه dq همراستا با بردار ولتاژ استاتور                        |
| ۸۸  | ۱-۳-۴- شرایط کاری در بالای سرعت سنکرون   |
| ۹۷  | <b>فصل پنجم: شبیه سازی عملکرد و کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوپل در شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه</b> |
| ۹۷  | ۱-۵- مقدمه   |
| ۹۷  | ۲-۵- رفتار DFIG در شرایط نامتعادلی ولتاژ استاتور   |
| ۱۰۱ | ۳-۵- کنترل هماهنگ مبدل ها در شرایط نامتعادلی ولتاژ استاتور                                       |
| ۱۰۲ | ۱-۳-۵- از بین بردن نوسانات گشتاور و توان اکتیو کل خروجی از DFIG                                  |

|     |   |
|-----|---|
| ۱۰۳ | ۱-۱-۳-۵- کنترل RSC و GSC به ترتیب در دستگاه های dq همراه با بردار شار و ولتاژ استاتور |
| ۱۱۳ | ۲-۱-۳-۵- کنترل RSC و GSC در دستگاه dq همراه با بردار ولتاژ استاتور                    |
| ۱۲۲ | ۲-۳-۵- مقایسه بین سایر روشهای کنترل هماهنگ مبدلها در شرایط نامتعادل ولتاژ             |
| ۱۲۸ | <b>نتیجه گیری و پیشنهادات</b>   |
| ۱۲۸ | ۱-۵- نتیجه گیری   |
| ۱۳۱ | ۲-۵- پیشنهادات  |
| ۱۳۲ | <b>مراجع</b>  |

## فهرست شکل‌ها

| صفحه | عنوان   |
|------|---|
| ۲    | شکل (۱-۱) نمودار ظرفیت سالانه نیروگاه‌های بادی نصب شده در دنیا                        |
| ۲    | شکل (۲-۱) نمودار ظرفیت کل نیروگاه‌های بادی نصب شده در دنیا                            |
| ۸    | شکل (۱-۲) آرایش یک سیستم توربین بادی متصل به ژنراتور القایی تغذیه دابل                |
| ۸    | شکل (۲-۲) آرایش مداری مبدل‌های سمت روتور و شبکه                                       |
| ۱۰   | شکل (۳-۲) منحنی $C_p$ بر حسب $\lambda$ و به ازای $\beta$ های مختلف                    |
| ۱۱   | شکل (۴-۲) توان مکانیکی توربین بر حسب $\lambda$ به ازای سرعت‌های مختلف باد             |
| ۱۲   | شکل (۵-۲) توان مکانیکی توربین بر حسب سرعت روتور به ازای سرعت‌های مختلف باد            |
| ۱۲   | شکل (۶-۲) مدل دینامیکی توربین بادی  |
| ۱۶   | شکل (۷-۲) مدار معادل ماشین القایی سه فاز متقارن در دستگاه مرجع سنکرون                 |
| ۱۹   | شکل (۸-۲) آرایش مداری اتصال مبدل سمت شبکه به شبکه                                     |
| ۲۱   | شکل (۹-۲) شماتیک کلی کنترل مبدل های RSC و GSC   |
| ۲۶   | شکل (۱۰-۲) بلوک دیاگرام کنترلی RSC  |
| ۲۸   | شکل (۱۱-۲) بلوک دیاگرام کنترلی GSC  |
| ۳۴   | شکل (۱-۳) اتصال یک ژنراتور القایی تغذیه دابل به شبکه نامتعادل                         |
| ۳۶   | شکل (۲-۳) مدارهای معادل حالت دائمی توالی مثبت و منفی یک فاز ژنراتور القایی سه فاز     |
| ۳۷   | شکل (۳-۳) ارتباط بین دستگاه های مرجع $\alpha\beta$ ، $(dq)^+$ و $(dq)^-$              |
| ۵۳   | شکل (۴-۳) بلوک دیاگرام کنترلی RSC در شرایط نامتعادلی ولتاژ                            |
| ۵۹   | شکل (۵-۳) بلوک دیاگرام کنترلی GSC در شرایط نامتعادلی ولتاژ                            |
| ۶۳   | شکل (۱-۴) نمودار توان راکتیو استاتور  |
| ۶۴   | شکل (۲-۴) نمودار گشتاور الکترومغناطیسی  |
| ۶۴   | شکل (۳-۴) نمودار جریان $i_{dr}$ و جریان مرجع آن $i_{dref}$                            |
| ۶۴   | شکل (۴-۴) نمودار جریان $i_{qr}$ و جریان مرجع آن $i_{qref}$                            |
| ۶۶   | شکل (۵-۴) نمودارهای ولتاژ و جریان خروجی از فاز a استاتور                              |
| ۶۷   | شکل (۶-۴) نمودارهای جریان های سه فاز روتور برای زمانهایی که توان راکتیو استاتور تغییر |

می یابد

- شکل (۷-۴) نمودار توان اکتیو استاتور ۶۷
- شکل (۸-۴) نمودار گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ ) و گشتاور توربین ( $T_g$ ) ۶۸
- شکل (۹-۴) نمودار سرعت الکتریکی روتور ۶۸
- شکل (۱۰-۴) نمودارهای جریان های سه فاز روتور برای زمانهایی که گشتاور تغییر می یابد ۶۸
- شکل (۱۱-۴) نمودار ضریب کارایی (Coefficient of Performance) ۶۹
- شکل (۱۲-۴) نمودار توان اکتیو دریافتی از باد توسط توربین بادی ۶۹
- شکل (۱۳-۴) نمودار توان اکتیو انتقالی از روتور به سمت مبدل سمت روتور ۷۰
- شکل (۱۴-۴) نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه ۷۰
- شکل (۱۵-۴) نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG ۷۰
- شکل (۱۶-۴) نمودار جریان  $i_{dg}$  و جریان مرجع آن  $i_{dref}$  ۷۱
- شکل (۱۷-۴) نمودار ولتاژ DC-Link ۷۱
- شکل (۱۸-۴) نمودار جریان  $i_{qg}$  و جریان مرجع آن  $i_{qref}$  ۷۱
- شکل (۱۹-۴) نمودار توان راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه ۷۲
- شکل (۲۰-۴) نمودارهای ولتاژ استاتور و جریان خروجی از مبدل سمت شبکه ۷۲
- شکل (۲۱-۴) نمودار توان راکتیو استاتور ۷۳
- شکل (۲۲-۴) نمودار گشتاور الکترومغناطیسی ۷۴
- شکل (۲۳-۴) نمودار جریان  $i_{dr}$  و جریان مرجع آن  $i_{dref}$  ۷۴
- شکل (۲۴-۴) نمودار جریان  $i_{qr}$  و جریان مرجع آن  $i_{qref}$  ۷۵
- شکل (۲۵-۴) نمودارهای ولتاژ و جریان خروجی از استاتور ۷۵
- شکل (۲۶-۴) نمودارهای جریان های سه فاز روتور برای زمانهایی که توان راکتیو استاتور تغییر می یابد ۷۶
- شکل (۲۷-۴) نمودار توان اکتیو استاتور ۷۷
- شکل (۲۸-۴) نمودار گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ ) و گشتاور توربین ( $T_g$ ) ۷۷
- شکل (۲۹-۴) نمودار سرعت الکتریکی روتور ۷۸
- شکل (۳۰-۴) نمودارهای جریان های سه فاز روتور برای زمانهایی که گشتاور تغییر می یابد ۷۸
- شکل (۳۱-۴) نمودار ضریب کارایی (Coefficient of Performance) ۷۹
- شکل (۳۲-۴) نمودار توان اکتیو دریافتی از باد توسط توربین بادی ۷۹
- شکل (۳۳-۴) نمودار توان اکتیو انتقالی از روتور به سمت مبدل سمت روتور ۷۹
- شکل (۳۴-۴) نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه ۸۰

- ۸۰ شکل (۳۵-۴) نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG
- ۸۱ شکل (۳۶-۴) نمودار جریان  $i_{dg}$  و جریان مرجع آن  $i_{dgref}$
- ۸۱ شکل (۳۷-۴) نمودار ولتاژ DC-Link
- ۸۱ شکل (۳۸-۴) نمودار جریان  $i_{qg}$  و جریان مرجع آن  $i_{qgref}$
- ۸۲ شکل (۳۹-۴) نمودار توان راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه
- ۸۲ شکل (۴۰-۴) نمودارهای ولتاژ استاتور و جریان خروجی از مبدل سمت شبکه
- ۸۳ شکل (۴۱-۴) نمودار توان راکتیو خروجی از استاتور
- ۸۳ شکل (۴۲-۴) نمودار توان راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه
- ۸۴ شکل (۴۳-۴) نمودار توان راکتیو کل خروجی از DFIG
- ۸۴ شکل (۴۴-۴) نمودار جریان  $i_{dr}$  و جریان مرجع آن  $i_{drref}$
- ۸۴ شکل (۴۵-۴) نمودار جریان  $i_{qr}$  و جریان مرجع آن  $i_{qref}$
- ۸۵ شکل (۴۶-۴) نمودار جریان  $i_{dg}$  و جریان مرجع آن  $i_{dgref}$
- ۸۵ شکل (۴۷-۴) نمودار جریان  $i_{qg}$  و جریان مرجع آن  $i_{qgref}$
- ۸۶ شکل (۴۸-۴) نمودارهای ولتاژ استاتور و جریان خروجی از مبدل سمت شبکه
- ۸۶ شکل (۴۹-۴) نمودار ولتاژ DC-Link
- ۸۶ شکل (۵۰-۴) نمودار توان اکتیو خروجی از استاتور
- ۸۷ شکل (۵۱-۴) نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه
- ۸۷ شکل (۵۲-۴) نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG
- ۸۹ شکل (۵۳-۴) نمودار توان راکتیو استاتور
- ۸۹ شکل (۵۴-۴) نمودار گشتاور الکترومغناطیسی
- ۸۹ شکل (۵۵-۴) نمودار جریان  $i_{dr}$  و جریان مرجع آن  $i_{drref}$
- ۸۹ شکل (۵۶-۴) نمودار جریان  $i_{qr}$  و جریان مرجع آن  $i_{qref}$
- ۹۰ شکل (۵۷-۴) نمودارهای ولتاژ و جریان خروجی از استاتور
- ۹۱ شکل (۵۸-۴) نمودارهای جریان های سه فاز روتور برای زمانهایی که توان راکتیو استاتور تغییر می یابد
- ۹۱ شکل (۵۹-۴) نمودار توان اکتیو استاتور
- ۹۱ شکل (۶۰-۴) نمودار گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ ) و گشتاور توربین ( $T_g$ )
- ۹۲ شکل (۶۱-۴) نمودار سرعت الکتریکی روتور
- ۹۲ شکل (۶۲-۴) نمودارهای جریان های سه فاز روتور برای زمانهایی که گشتاور تغییر می یابد
- ۹۲ شکل (۶۳-۴) نمودار ضریب کارایی (Coefficient of Performance)

- شکل (۴-۶۴) نمودار توان اکتیو دریافتی از باد توسط توربین بادی ۹۳
- شکل (۴-۶۵) نمودار توان اکتیو انتقالی از روتور به سمت مبدل سمت روتور ۹۳
- شکل (۴-۶۶) نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه ۹۴
- شکل (۴-۶۷) نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG ۹۴
- شکل (۴-۶۸) نمودار جریان  $i_{dq}$  و جریان مرجع آن  $i_{dqref}$  ۹۵
- شکل (۴-۶۹) نمودار ولتاژ DC-Link ۹۵
- شکل (۴-۷۰) نمودار توان راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه ۹۵
- شکل (۴-۷۱) نمودار جریان  $i_{qg}$  و جریان مرجع آن  $i_{qgref}$  ۹۵
- شکل (۴-۷۲) نمودارهای ولتاژ استاتور و جریان خروجی از مبدل سمت شبکه ۹۶
- شکل (۵-۱) نمودار جریان توالی مثبت فاز a سیم پیچ روتور ۹۸
- شکل (۵-۲) نمودار جریان توالی منفی فاز a سیم پیچ روتور ۹۹
- شکل (۵-۳) نمودار جریان فاز a سیم پیچ روتور ۹۹
- شکل (۵-۴) نمودار جریانهای سه فاز روتور ۹۹
- شکل (۵-۵) نمودار جریانهای سه فاز استاتور ۹۹
- شکل (۵-۶) نمودار گشتاور الکترو مغناطیسی ۱۰۰
- شکل (۵-۷) نمودار سرعت الکتریکی روتور ۱۰۰
- شکل (۵-۸) نمودار توان اکتیو خروجی از استاتور ۱۰۰
- شکل (۵-۹) نمودار توان راکتیو خروجی از استاتور ۱۰۱
- شکل (۵-۱۰) نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه ۱۰۱
- شکل (۵-۱۱) نمودار ولتاژ DC-Link ۱۰۱
- شکل (۵-۱۲) نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG ۱۰۱
- شکل (۵-۱۳) نمودار جریانهای dq توالی مثبت و منفی روتور در دستگاههای  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$  به همراه جریانهای مرجع (۱): جریان های  $i_{dr+}^*$  و  $i_{qr+}^*$  (۲): جریان های  $i_{qr+}^*$  و  $i_{dr+}^*$  (۳):  
جریان های  $i_{dr-}^*$  و  $i_{qr-}^*$  (۴) جریان های  $i_{qr-}^*$  و  $i_{dr-}^*$  ۱۰۵
- شکل (۵-۱۴) نمودار گشتاور الکترومغناطیسی (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی ۱۰۶
- شکل (۵-۱۵) نمودار توان راکتیو خروجی از استاتور (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی ۱۰۷
- شکل (۵-۱۶) نمودار گشتاور توربین ( $T_g$ ) و گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ ) ۱۰۷
- شکل (۵-۱۷) نمودار سرعت الکتریکی روتور ۱۰۸



- شکل (۵-۱۸) نمودار جریانهای سه فاز روتور (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در بازه زمانی تغییر توان راکتیو خروجی از استاتور (۳): در بازه زمانی تغییر گشتاور الکترومغناطیسی
- شکل (۵-۱۹) نمودار جریانهای سه فاز خروجی از استاتور در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ
- شکل (۵-۲۰) نمودار توان اکتیو خروجی از استاتور در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ
- شکل (۵-۲۱) نمودار جریانهای dq توالی مثبت و منفی خروجی از مبدل سمت شبکه در دستگاههای  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$  به همراه جریانهای مرجع (۱): جریان های  $i_{dg+}^+$  و  $i_{dq+}^*$  (۲): جریان های  $i_{qg+}^+$  و  $i_{qg+}^*$  (۳): جریان های  $i_{dg-}^-$  و  $i_{dq-}^*$  (۴) جریان های  $i_{qg-}^-$  و  $i_{qg-}^*$
- شکل (۵-۲۲) نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ
- شکل (۵-۲۳) نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی
- شکل (۵-۲۴) نمودار ولتاژ DC-Link (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی
- شکل (۵-۲۵) نمودار جریانهای dq توالی مثبت و منفی روتور در دستگاههای  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$  به همراه جریانهای مرجع (۱): جریان های  $i_{dr+}^+$  و  $i_{dq+}^*$  (۲): جریان های  $i_{qr+}^+$  و  $i_{qr+}^*$  (۳): جریان های  $i_{dr-}^-$  و  $i_{dq-}^*$  (۴) جریان های  $i_{qr-}^-$  و  $i_{qr-}^*$
- شکل (۵-۲۶) نمودار گشتاور الکترومغناطیسی (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی
- شکل (۵-۲۷) نمودار توان راکتیو خروجی از استاتور (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی
- شکل (۵-۲۸) نمودار گشتاور توربین ( $T_g$ ) و گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ )
- شکل (۵-۲۹) نمودار سرعت الکتریکی روتور
- شکل (۵-۳۰) نمودار جریانهای سه فاز روتور (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در بازه زمانی تغییر توان راکتیو خروجی از استاتور (۳): در بازه زمانی تغییر گشتاور الکترومغناطیسی
- شکل (۵-۳۱) نمودار جریانهای سه فاز خروجی از استاتور در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ
- شکل (۵-۳۲) نمودار توان اکتیو خروجی از استاتور در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ

- شکل (۵-۳۳) نمودار جریانهای dq توالی مثبت و منفی روتور در دستگاههای  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$  به همراه جریانهای مرجع (۱): جریان های  $i_{dr+}$  و  $i_{dr+}^{*}$  (۲): جریان های  $i_{qr+}$  و  $i_{qr+}^{*}$  (۳): جریان های  $i_{dr-}$  و  $i_{dr-}^{*}$  (۴): جریان های  $i_{qr-}$  و  $i_{qr-}^{*}$
- شکل (۵-۳۴) نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ
- شکل (۵-۳۵) نمودار توان اکتیو کل خروجی از استاتور (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی
- شکل (۵-۳۶) نمودار ولتاژ DC-Link (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی
- شکل (۵-۳۷) نتایج شبیه سازی رفتار DFIG به ازای وقوع نامتعادلی ولتاژ ۵٪ در پایانه های استاتور، با کنترل مبدل های آن با توجه به روشهای دوم، سوم و چهارم (۱): نتایج شبیه سازی برای روش دوم (۲): نتایج شبیه سازی برای روش سوم (۳): نتایج شبیه سازی برای روش چهارم

## فهرست جدول‌ها

| صفحه | عنوان   |
|------|---|
| ۳۳   | جدول (۱-۳) حدود مجاز نامتعادلی ولتاژ  |
| ۶۰   | جدول (۱-۴) مشخصات مربوط به سیستم DFIG مورد مطالعه   |
| ۱۲۶  | جدول (۱-۵) مقایسه بین روشهای کنترل هماهنگ مبدل‌های سمت روتور و شبکه به ازای وقوع نامتعادلی ولتاژ ۵٪ در پایانه های استاتور |

# فصل اول

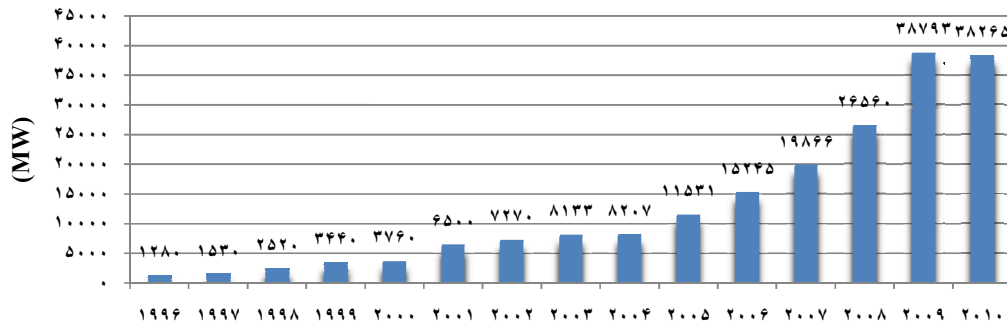
## مقدمه

**مقدمه:**

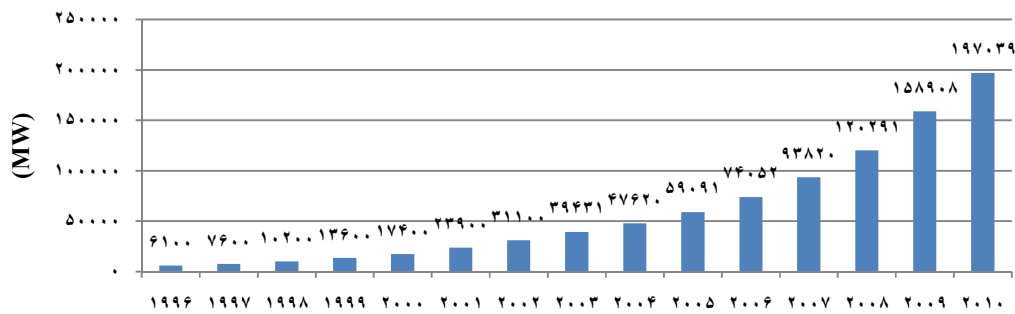
انرژی برق یکی از رایج ترین انواع انرژیها است که امروزه در جوامع بشری بصورت فراوان مورد استفاده قرار می گیرد. با افزایش روز افزون جمعیت و رشد صنعت و تکنولوژی، مصرف انرژی برق در سه دهه اخیر از افزایش چشمگیری برخوردار بوده است. از طرفی منابع طبیعی نظیر سوختهای فسیلی که در نیروگاههای برق، کارخانجات، مصارف خانگی و ... کاربرد فراوانی دارند با سرعت زیادی رو به اتمام می باشند. به طوریکه با توجه به نقش مهم اینگونه سوختها در تولید برق و از طرفی کمیاب شدن آنها، بسیاری از کشورها را برآن واداشته است که برای جایگزینی اینگونه سوختها با منابع طبیعی تجدید پذیر، استراتژی و تدابیر خاصی در نظر بگیرند. از دیدگاه دیگر، مصرف سوختهای فسیلی در نیروگاهها، منجر به تولید مواد و آلاینده های سمی در محیط زیست می گردد که گزارشات فراوان در خصوص تأثیرات سوء این مواد در محیط زیست، مؤید نامطلوب بودن مصرف اینگونه منابع انرژی است.

انرژیهای نو نظیر انرژی خورشیدی، انرژی باد، انرژی ناشی از جریانهای جزر و مد اقیانوسها و ... امروزه مورد توجه قرار گرفته اند که با توجه به تحقیقات بیشماری که در رشته های مختلف مهندسی صورت گرفته است، انرژی باد در بین انواع انرژی های نو، بعنوان یک انرژی تجدید پذیر و مقرون بصره شناخته شده است. به طوریکه در طول ۱۵ سال اخیر، استفاده از انرژی باد برای تولید برق، رشد فراوانی داشته است [۱]. در شکل (۱-۱)، نمودار ظرفیت سالانه نیروگاههای بادی نصب شده در دنیا از سال ۱۹۹۶ تا سال ۲۰۱۰، نشان داده شده است و در شکل (۲-۱) نیز نمودار ظرفیت کل نیروگاههای بادی نصب شده در دنیا در طی این سالها، آورده شده است.

به طوریکه در این مدت، تکنولوژی به کار رفته در نیروگاههای بادی از پیشرفت قابل ملاحظه ای برخوردار بوده است که این پیشرفت در خصوص توربین ها، ژنراتورها، مبدلهای قدرت و استراتژی های کنترلی بکار گرفته شده در اینگونه نیروگاهها، می باشد.



شکل (۱-۱): نمودار ظرفیت سالانه نیروگاههای بادی نصب شده در دنیا



شکل (۲-۱): نمودار ظرفیت کل نیروگاههای بادی نصب شده در دنیا

توربینهای بادی با توجه قابلیتی که برای عملکرد در سرعت ثابت و یا متغیر دارند به ۲ نوع توربین بادی سرعت ثابت و توربین بادی سرعت متغیر تقسیم می شوند. توربین های بادی سرعت ثابت دارای یک ساختار متداول و معمول می باشند که شامل یک ژنراتور القایی است که استاتور به طور مستقیم به شبکه متصل است و هیچگونه کنترلی مبتنی بر مبدل های الکترونیک قدرت برای کنترل آن در نظر گرفته نمی شود و محور روتور نیز از طریق گیربکس به محور توربین متصل است. تا اوایل سال ۱۹۹۰، استاندارد نصب و بهره برداری، بر مبنای توربین های بادی با سرعت ثابت بود. این توربین ها به گونه ای طراحی شده اند که در یک سرعت ثابت و مشخص باد، بیشترین بازدهی را داشته باشند. ولی ثابت نگه داشتن سرعت توربین و ژنراتور، وابستگی بسیار زیادی به مشخصه های کنترلی مکانیکی توربین و پره ها دارد. به طوریکه سیستم های کنترلی مکانیکی دارای ۲ اشکال اساسی می باشند، اولاً استهلاک و خرابی در اینگونه سیستمها بسیار بالا است و از طرف دیگر نیز سرعت عکس

العمل اینگونه سیستمها نسبت به سیستم های کنترلی الکترونیکی بسیار پایین تر است. بنابراین با توجه به عملکرد اینگونه توربین ها در سرعت ثابت، تمامی نوسانات سرعت باد به صورت نوسانات گشتاور مکانیکی به محور روتور منتقل می گردند و از آنجا نیز به صورت نوسانات توان الکتریکی در شبکه ظاهر می شوند. نوسانات توان در شبکه های ضعیف، می تواند منجر به ایجاد نوسانات ولتاژ با دامنه زیاد، در شبکه گردد و باعث ناپایداری شبکه نیز می گردد.

توربین های سرعت متغیر نسبت به توربین های سرعت ثابت، مدرن تر هستند و از قابلیت کنترلی پیشرفته تری برخوردارند. متداول ترین ژنراتوری که در ساختار توربین های بادی سرعت متغیر در نظر گرفته می شود ژنراتور القایی تغذیه دابل (DFIG<sup>۱</sup>) می باشد. استاتور این ژنراتور به صورت مستقیم به شبکه متصل می گردد و سیم پیچ های روتور نیز از طریق مبدل های قدرت واسطه بین شبکه و روتور تغذیه می گردند. مبدلهایی که در این ساختار مورد استفاده قرار گرفته اند به صورت Back-to-Back می باشند. این مبدلها شامل مبدل سمت شبکه (GSC<sup>۲</sup>) و مبدل سمت روتور (RSC<sup>۳</sup>) می باشند که یک خازن به عنوان DC-Link در بین این ۲ مبدل قرار می گیرد [۲]. مزایایی که برای توربین های بادی متصل به ژنراتور القایی تغذیه دابل، می توان در نظر گرفت، به شرح ذیل می باشد [۳-۷]:

۱- استفاده از مبدلهایی با ظرفیتی برابر با ۳۰٪ ظرفیت نامی ژنراتور و در نتیجه کاهش تلفات

مبدلها

۲- کاهش هزینه ساخت و طراحی فیلترهای مورد استفاده برای این مبدلها

۳- کنترل جریان سیم پیچهای روتور از طریق مبدل سمت روتور، برای تنظیم سرعت توربین و

روتور به منظور دریافت ماکزیمم توان از انرژی باد

---

1- Doubly-fed induction generators  
2- Grid side converter  
3- Rotor side converter

۴- کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو خروجی از ژنراتور، با کنترل مبدل‌های سمت شبکه و

روتور

۵- بکارگیری استراتژی‌های کنترلی خاص برای کنترل مبدل‌ها، برای بهبود رفتار ژنراتور در

شرایطی از قبیل: وقوع خطا در شبکه، نامتعادلی ولتاژ یا بار، وقوع Voltage Dip و ...

کنترل DFIG با استفاده از روش کنترل برداری dq در دستگاه‌های همراستا با ولتاژ و یا شار استاتور، برای کنترل مبدل‌های سمت روتور و شبکه، صورت می‌گیرد. به طوریکه برای کنترل مبدل سمت روتور از دستگاه مرجع dq همراستا با شار استاتور و یا دستگاه مرجع dq همراستا با ولتاژ استاتور، استفاده می‌شود و دستگاه مرجع dq همراستا با ولتاژ استاتور نیز برای کنترل مبدل سمت شبکه به کار برده می‌شود. در این دستگاه‌ها، شرایط برای کنترل مستقل گشتاور و توان اکتیو استاتور نسبت به کنترل توان راکتیو آن، فراهم می‌گردد [۸] و [۹].

از طرفی، نیروگاه‌های بادی معمولاً در مناطقی احداث می‌گردند که از لحاظ وضعیت وزش باد دارای شرایط مساعدی باشند. اینگونه مناطق معمولاً در نقاط دور دست واقع می‌باشند که از دیدگاه شبکه‌های قدرت در انتهای خطوط انتقال توان قرار گرفته‌اند به طوریکه نامتعادل شدن ولتاژ در این نقاط از شبکه، امری غیر معمول نمی‌باشد. همچنین ممکن است که نیروگاه‌های بادی به یک شبکه ضعیف دارای توزیع نامتعادل بار، متصل باشند که این امر نیز منجر به نامتعادلی ولتاژ شبکه می‌گردد [۱۰]. نامتعادلی ولتاژ شبکه در محل اتصال نیروگاه بادی به شبکه اثرات مخربی بر ژنراتور و توربین بادی نیروگاه می‌گذارد. وقوع یک نامتعادلی ولتاژ پایین می‌تواند جریان‌های نامتعادل بالایی را در سیم پیچ استاتور ژنراتور ایجاد کند. جریان‌های نامتعادل بالا، باعث افزایش حرارت نامتعادل، در سیم پیچ‌های ماشین می‌گردد و در نتیجه اثرات مخربی بر سیم پیچ‌ها و عایق و هسته ماشین می‌گذارد [۱۱]. از طرفی نیز این جریان‌های بالای نامتعادل، باعث ایجاد نوساناتی با دامنه زیاد و فرکانسی معادل با ۲ برابر فرکانس شبکه در گشتاور الکترومغناطیسی، توان اکتیو و راکتیو خروجی از استاتور و نیز ولتاژ DC-Link می‌گردد. به طوریکه این نوسانات در گشتاور الکترومغناطیسی، باعث ایجاد تنش‌های مکانیکی



شدید همراه با صداهای زیاد در گیربکس و شفت روتور و پره‌های توربین می‌گردد که می‌تواند آسیب‌های شدیدی بدنبال داشته باشد. نوسانات پدید آمده در توان‌ها و ولتاژ DC-Link نیز باعث پائین آمدن کیفیت توان اینگونه ژنراتورها در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه می‌گردد [۱۲-۱۵].

با توجه به اینکه در شرایط نامتعادل، متغیرهای ولتاژ و جریان و شار دارای مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی می‌باشند بنابراین مطلوب است که در این شرایط از ۲ دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  و دستگاه مرجع سنکرون منفی  $(dq)^-$  استفاده شود [۱۶]. سرعت و جهت چرخش محور  $d$  دستگاه‌های مذکور بدینصورت است که محور  $d$  دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  با سرعت سنکرون  $\omega_s +$  در حال چرخش می‌باشد و محور  $d$  دستگاه مرجع سنکرون منفی  $(dq)^-$  نیز در جهت خلاف آن و با سرعت  $\omega_s -$  می‌چرخد. به طوریکه کنترل DFIG در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$ ، دقیقاً مشابه با کنترل آن در شرایط متعادل است و اهدافی که برای این کنترل در نظر گرفته می‌شود دقیقاً همان اهدافی است که برای کنترل DFIG در شرایط متعادل، مشخص شده است. اما اهمیت کنترل DFIG در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$  در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه، بسیار حائز اهمیت است. به طوریکه در این شرایط، مبدل سمت روتور، جریانهای توالی منفی روتور را در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$ ، با توجه به اهداف گوناگونی که برای آن در نظر گرفته می‌شود، کنترل می‌کند. از طرف دیگر نیز، مبدل سمت شبکه، جریانهای توالی منفی خروجی خود را در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$ ، به گونه‌ای کنترل می‌کند که در واقع مکمل کنترل مبدل سمت روتور برای بهبود رفتار DFIG، باشد. بنابراین با کنترل هماهنگ مبدل‌های سمت روتور و شبکه، رفتار DFIG در شرایط نامتعادلی ولتاژ استاتور بهبود می‌یابد [۱۷].

در این پایان نامه به مدلسازی ژنراتور القایی تغذیه دابل در شرایط متعادل و نامتعادل پرداخته می‌شود. سپس با شبیه‌سازی یک ژنراتور القایی تغذیه دابل (KW) ۷/۵ متصل به توربین بادی، در شرایط متعادل، با کنترل مبدل سمت روتور آن در دستگاههای همراستا با بردار شار استاتور و نیز بردار ولتاژ استاتور، رفتار ژنراتور برای این ۲ حالت مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. همچنین با

شبیه سازی DFIG در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه، به تحلیل عملکرد آن در این شرایط پرداخته می شود و با پیاده سازی یک روش کنترل هماهنگ مبدل های سمت روتور و شبکه، بهبود رفتار آن مورد ارزیابی قرار می گیرد. این روش برای ۲ حالت زیر مورد تحلیل و مقایسه قرار می گیرد:

۱- کنترل مبدل های سمت روتور و شبکه به ترتیب در دستگاه های مرجع dq همراه با بردار شار و بردار ولتاژ استاتور

۲- کنترل مبدل های سمت روتور و شبکه در دستگاه مرجع dq همراه با بردار ولتاژ استاتور  
همچنین در ادامه، روش های دیگری برای کنترل هماهنگ مبدل ها در شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه، ارائه می گردد که با توجه به نتایج شبیه سازی بدست آمده برای آنها، به مقایسه این روشها نیز پرداخته می شود.

# فصل دوم

مدلسازی و کنترل ژنراتور القایی

تغذیه دابل در شرایط متعادل

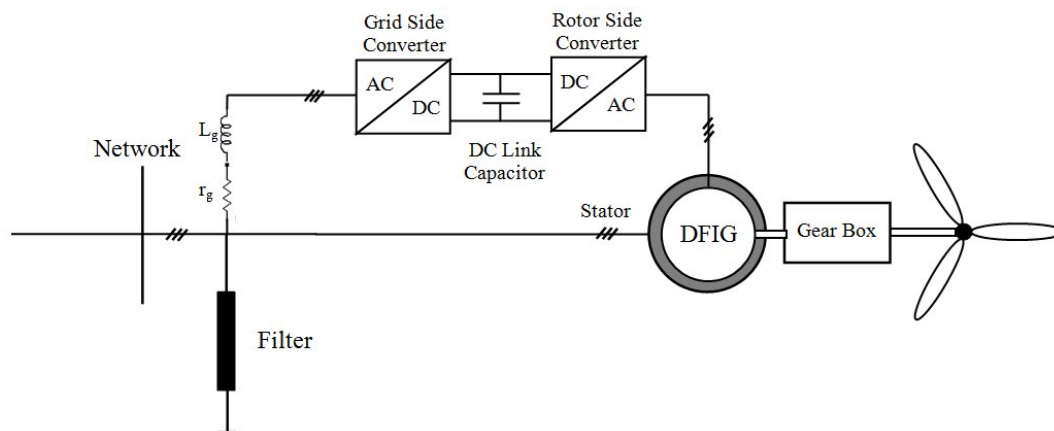
## ۲-۱- مقدمه

ساختار کلی توربینهای بادی مورد استفاده در نیروگاههای بادی بدین صورت است که محور توربین از طریق گیربکس با نسبت تبدیل ثابت به محور روتور ژنراتور متصل می گردد و پره های توربین که معمولاً ۲ یا ۳ پره می باشد با توجه به یک سیستم کنترلی، همواره در جهت و یا خلاف جهت حرکت باد قرار می گیرند که کلیه این تجهیزات بر روی یک برج (Tower) نصب می گردند. از رایجترین ژنراتورهای مورد استفاده در توربین های بادی سرعت متغیر، ژنراتور القایی تغذیه دابل می باشند. استاتور این ژنراتور مستقیماً و روتور نیز از طریق ۲ مبدل که به صورت Back-to-Back قرار گرفته اند به شبکه متصل می گردند. در این فصل به بررسی ساختار ژنراتور القایی تغذیه دابل (DFIG) و نیز مدلسازی و کنترل توربین بادی و ژنراتور در شرایط متعادل پرداخته می شود.

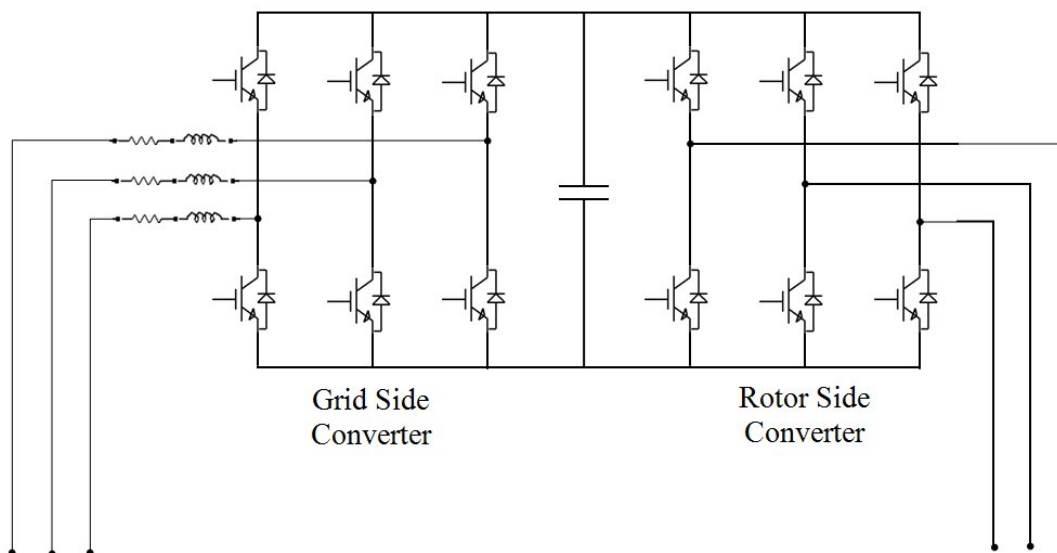
## ۲-۲- ساختار ژنراتور القایی تغذیه دابل

آرایش ساختاری توربین بادی متصل به ژنراتور القایی تغذیه دابل در شکل (۲-۱) نشان داده شده است. در این شکل، ماشین القایی روتور سیم پیچی شده مشاهده می شود که محرک آن توربین بادی است و روتور آن به واسطه دو مبدل Back-to-Back، (مبدل AC/DC/AC دوطرفه)، به شبکه متصل می گردد، در حالی که استاتور مستقیماً و بدون واسطه مبدل، به شبکه متصل گردیده است. در چنین شرایطی توانی که از روتور می گذرد، حداکثر برابر با ۳۰٪ توان نامی ژنراتور است. مبدلها شامل مبدل سمت روتور و مبدل سمت شبکه می باشند که در بین ۲ مبدل خازن DC-Link قرار می گیرد. وظایف اصلی مبدل سمت روتور در شرایط متعادل، کنترل گشتاور برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد و نیز کنترل توان راکتیو خروجی از استاتور می باشد. مبدل سمت شبکه نیز وظیفه شارژ و تثبیت ولتاژ خازن DC-Link را دارد و از طرفی نیز با کنترل توان راکتیو خروجی اش می تواند کنترل هماهنگی را با مبدل سمت روتور برای کنترل توان راکتیو کل خروجی و نیز تنظیم ولتاژ شبکه، بوجود آورد. آرایش مداری مبدل های سمت شبکه و روتور در شکل (۲-۲) آورده شده است. اساساً

این مبدل ها یک مبدل AC-DC-AC دوطرفه می باشند که از سوئیچ های IGBT/Diode در ساختار آنها استفاده می شود و با اعمال سوئیچ زنی مناسب با روشهای سوئیچینگ از قبیل PWM و یا SVPWM، ولتاژ های مطلوب مورد نظر برای کنترل جریانهای روتور و نیز جریانهای خروجی از مبدل سمت شبکه، ایجاد می گردند. نکته مهم در تعیین ولتاژ خازن DC-Link این است که ولتاژ خازن مذکور باید به گونه ای تعیین گردد که Over Modulation در سوئیچ زنی اتفاق نیفتد [۲] و [۳].



شکل (۱-۲): آرایش یک سیستم توربین بادی متصل به ژنراتور القایی تغذیه دابل



شکل (۲-۲): آرایش مداری مبدلهای سمت روتور و شبکه

## ۲-۳- مدلسازی توربین بادی

میزان توانی که توربین‌های بادی می‌توانند از انرژی باد استخراج کنند با توجه به رابطه زیر بدست می‌آید [۱۸] و [۱۹]:

$$P_m = C_p P_w \quad (۱-۲)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 V_w^3 \quad (۲-۲)$$

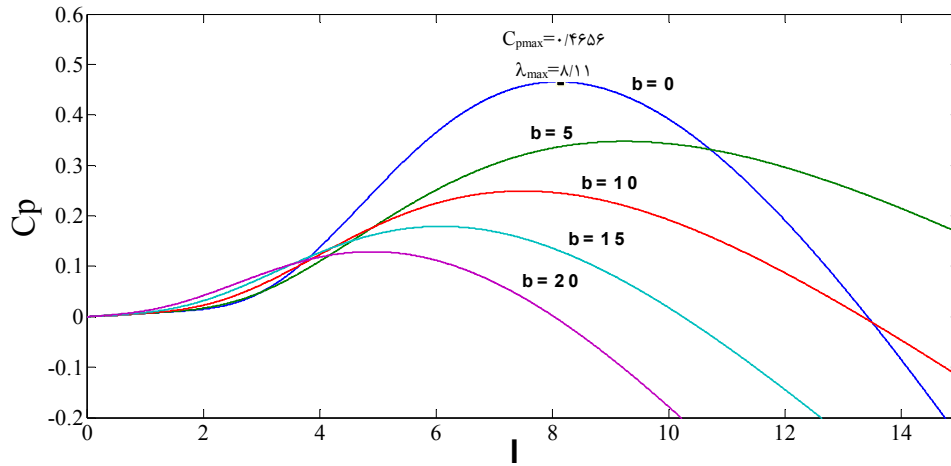
به طوریکه در روابط فوق،  $P_m$  توان مکانیکی می‌باشد که توسط توربین بادی از باد گرفته می‌شود،  $P_w$  توان موجود در باد،  $\rho$  چگالی هوا بر حسب  $(\text{Kg/m}^3)$ ،  $R$  شعاع پره‌های توربین بر حسب  $(\text{m})$ ،  $V_w$  سرعت باد بر حسب  $(\text{m/s})$  و  $C_p$  نیز ضریب کارایی (Coefficient of Performance) می‌باشد. ضریب کارایی  $C_p$  مشخص کننده درصد یا قسمتی از انرژی موجود در باد است که به وسیله توربین قابل استخراج است. بیشترین مقدار تئوریک  $C_p$  در سال ۱۹۲۶ به وسیله بتز محاسبه شده که مقدار آن  $0.593$  است و به ثابت بتز (Betz Coefficient) معروف است. یعنی در واقع بیشترین درصدی از انرژی باد که به وسیله توربین بادی قابل استخراج است  $59.3\%$  می‌باشد.

$C_p$  علاوه بر شکل آیرودینامیکی پره، طبق روابط داده شده زیر به عوامل دیگری نیز بستگی دارد.

$$C_p = F(\lambda, \beta) \quad (۳-۲)$$

$$\lambda = \frac{V_t}{V_w} = \frac{R\omega_t}{V_w} \quad (۴-۲)$$

به طوریکه  $\lambda$  نسبت سرعت نوک پره توربین به سرعت باد (Tip speed ratio)،  $\beta$  زاویه پره (Pitch angle) بر حسب درجه،  $V_t$  سرعت نوک پره توربین بر حسب  $(\text{m/s})$  و  $\omega_t$  نیز سرعت چرخشی پره‌های توربین بر حسب  $(\text{rad/sec})$  می‌باشد. در توربین‌های بادی،  $C_p$  به وسیله یک منحنی غیر خطی بر حسب  $\lambda$  و به ازای  $\beta$  های مختلف مشخص می‌شود. در شکل (۳-۲) منحنی  $C_p$  بر حسب  $\lambda$  و  $\beta$  نشان داده شده است.



شکل (۲-۳): منحنی  $C_p$  بر حسب  $\lambda$  و به ازای  $\beta$  های مختلف

تخمین منحنی فوق به صورت رابطه (۵-۲) صورت می گیرد:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (۵-۲)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (۶-۲)$$

لازم بذکر است که منحنی  $C_p$  در شبیه سازی هایی که در این پایان نامه برای یک توربین بادی KW ۷/۵ صورت گرفته است به ازای  $\beta = 0$  است. مطابق شکل (۲-۳)، ماکزیمم مقدار  $C_p$  به ازای  $\beta = 0$ ، ۰/۴۶۵۶ می باشد و بر طبق آن مقدار  $\lambda$  برای دریافت ماکزیمم توان از باد، ۸/۱۱ است.

در توربین های بادی، کنترلر سرعت روتور همراه با کنترلر زاویه پره، سرعت روتور را کنترل می کنند. اما کنترلر زاویه پره فقط در سرعت های بالای باد، فعال می شود. در چنین وضعیتی (در سرعت های بالای باد) سرعت روتور با تنظیم گشتاور الکترومکانیکی نمی تواند کنترل شود زیرا این عمل باعث اضافه بار شدن ژنراتور و مبدل سمت روتور خواهد شد. برای جلوگیری از افزایش زیاد سرعت روتور که می تواند صدمات مکانیکی شدیدی را به همراه داشته شود زاویه پره ها به نحوی تغییر می کند تا  $C_p$  کاهش یابد و در نتیجه میزان انرژی دریافتی از باد کاهش یابد.

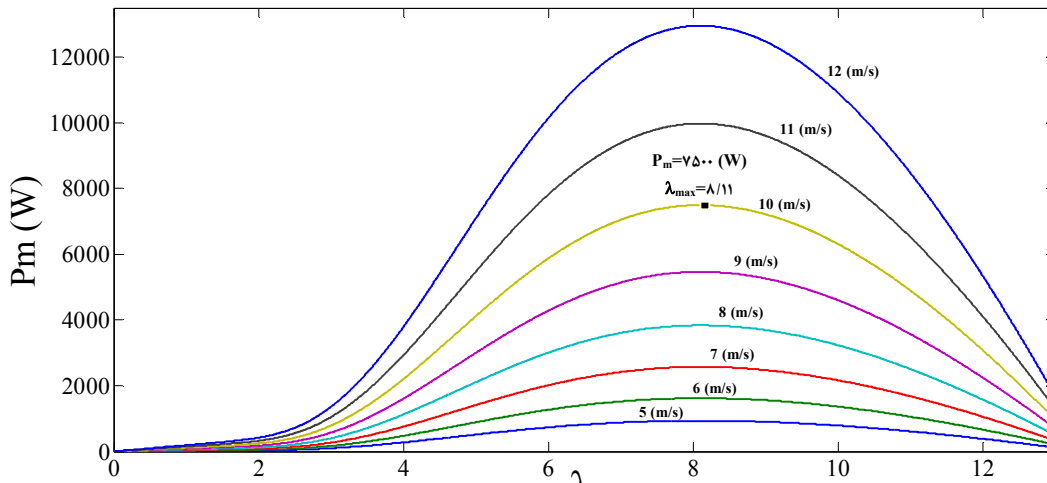
به عنوان مثال با در نظر گرفتن سرعت باد ۱۰ (m/s) به عنوان سرعت متوسط در یک سایت و شعاع

پره (m) ۲/۸۶۴۲، سرعت چرخشی پره‌های توربین برای دریافت ماکزیمم توان به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega_{t(opt)} = \frac{\lambda_{max}}{R} V_w = 28.3151 \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) = 28.3151 \times \frac{60}{2\pi} (\text{rpm}) = 270.3893 (\text{rpm})$$

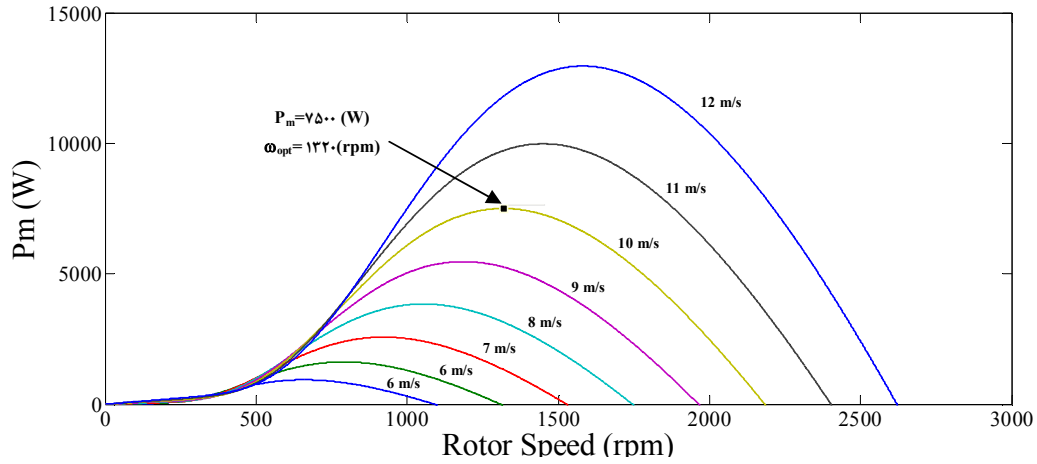
منطقی است که نسبت تبدیل سرعت در گیربکس طوری انتخاب شود که در سرعت متوسط باد، ژنراتور با سرعتی نزدیک به سرعت سنکرون خود بچرخد. البته اگر مقدار سرعت کمی از سرعت سنکرون بالاتر باشد بهتر است زیرا که در این وضعیت استاتور و روتور توأمان، توان اکتیو به شبکه تزریق می‌کنند و در نتیجه بدون اینکه ماشین دچار اضافه حرارت شود توان تولیدی از مقدار نامی ماشین بیشتر خواهد بود. به طوریکه که برای شرایط کاری بالای سرعت سنکرون، نسبت تبدیل سرعت در گیربکس ۴/۸۸ در نظر گرفته شده است. تا به ازای سرعت متوسط در سایت، سرعت ژنراتور برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد، دارای لغزش ۰/۱ و در بالای سرعت سنکرون باشد ((rpm) ۱۳۲۰ > (۴/۸۸ × ۲۷۰/۳۸۹۳ = ۱۳۲۰)).

با توجه به روابط (۱-۲) - (۲-۶)، منحنی توانی که توسط یک توربین بادی در سرعت‌های مختلف باد و به ازای  $\beta = 0$ ، از انرژی باد دریافت می‌گردد و به ژنراتور تحویل داده می‌شود در شکل های (۲-۴) و (۲-۵) نشان داده شده است.



شکل (۲-۴): توان مکانیکی توربین بر حسب  $\lambda$  به ازای سرعت‌های مختلف باد





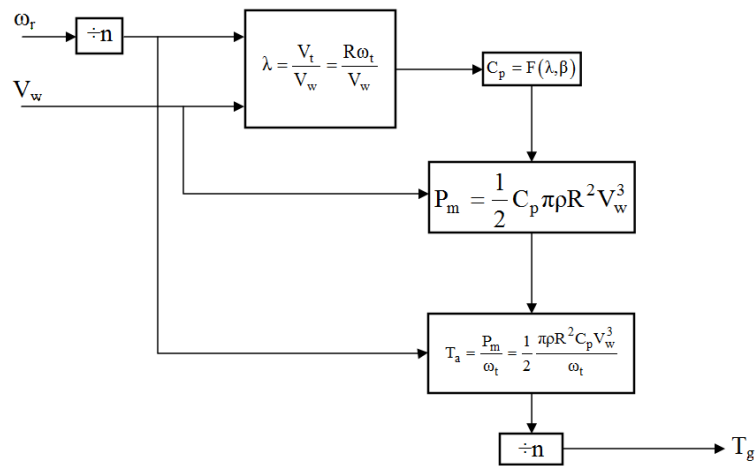
شکل (۲-۵): توان مکانیکی توربین بر حسب سرعت روتور به ازای سرعت‌های مختلف باد

بنابراین گشتاور توربین ( $T_a$ ) برای ایجاد شرایط کاری مطلوب، با توجه به رابطه (۲-۷)، به راحتی بدست می‌آید و همچنین با توجه به نسبت تبدیل گیربکس ( $n$ )، گشتاور مکانیکی اعمال شده به روتور ( $T_g$ ) نیز محاسبه می‌گردد.

$$T_a = \frac{P_m}{\omega_t} = \frac{1}{2} \frac{\pi \rho R^2 C_p V_w^3}{\omega_t} \quad (۲-۷)$$

$$T_g = \frac{T_a}{n} \quad (۲-۸)$$

در شکل (۲-۶)، دیاگرام مدلسازی دینامیکی توربین بادی نشان داده می‌شود.



شکل (۲-۶): مدل دینامیکی توربین بادی

## ۲-۴- مدلسازی ژنراتور القایی تغذیه دابل

با توجه به ساختار DFIG که تشکیل شده است از: ژنراتور القایی با روتور سیم پیچی شده، مبدل سمت روتور، مبدل سمت شبکه و خازن DC-Link، در این بخش به مدلسازی این ساختار پرداخته می شود. با توجه به اینکه مبدل سمت روتور وظیفه تغذیه روتور را دارد و مبدل سمت شبکه نیز خازن DC-Link را شارژ می نماید، بنابراین مدلسازی شامل: مدلسازی ماشین القایی و مبدل سمت روتور و نیز مدلسازی مبدل سمت شبکه و خازن DC-Link، می باشد. نکته قابل اشاره در این بخش این است که عملیات سوئیچینگ در مبدلها، مدلسازی نمی شود و فرض بر این است که مبدلها با سوئیچینگ مناسب، ولتاژهای ac مطلوب را که با توجه به روشهای کنترلی مورد نظر برای DFIG بدست آمده اند، در خروجی خود بوجود می آورند.

### ۲-۴-۱- مدلسازی ژنراتور القایی و مبدل سمت روتور

با توجه به اینکه برخی اندوکتانس های ماشین القایی تابعی از سرعت روتور هستند در اینصورت ضرایب معادله های دیفرانسیلی (معادله های ولتاژی) که رفتار ماشین را توصیف می کنند متغیر با زمان هستند مگر آنکه روتور در حالت توقف باشد. برای کاهش پیچیدگی این معادلات دیفرانسیل معمولاً از تغییر متغیرها استفاده میشود. در واقع این تغییر متغیر، یک تبدیل عمومی می باشد که متغیرهای ماشین را به دستگاه مرجع dq منتقل می کند که در یک سرعت زاویه ای اختیاری می چرخد [۲۰].

### ۲-۴-۱-۱- دستگاههای مرجع dq

در سال ۱۹۳۰، اچ. سی. استنلی نشان داد که تغییر پذیری با زمان اندوکتانس ها در معادله های ولتاژ ماشین القایی که مربوط به حرکت نسبی مدارهای الکتریکی است با تبدیل متغیرهای سیم پیچ روتور (متغیرهای روتور) به متغیرهایی مرتبط به سیم پیچهای فرضی ساکن، حذف خواهد شد. در این حالت متغیرهای روتور به دستگاه مرجع واقع در استاتور (مختصات ساکن) منتقل می شوند.

جی.کرون تغییر متغیری را ابداع کرد که تغییر پذیری با زمان اندوکتانسهای ماشین القایی را با تبدیل متغیرهای استاتور و روتور به دستگاه مرجعی که به طور همزمان با میدان مغناطیسی گردان می چرخد حذف کرد. این دستگاه مرجع عموماً دستگاه مرجع سنکرون نامیده می شود. دی.اس.بررتون و همکارانش تغییر متغیری را به کار گرفتند که تغییر پذیری با زمان اندوکتانس های ماشین القایی متقارن را به کمک انتقال متغیرهای استاتور به دستگاه مرجع ثابت شده در روتور نیز حذف می کند. این در حقیقت همان تبدیل پارک است که در مورد ماشین های القایی اعمال شد.

در سال ۱۹۶۵ مشخص شد که همه تبدیل های شناخته شده در مورد تحلیل ماشین القایی، یک تبدیل عمومی را شامل می شوند و تغییر پذیری اندوکتانس ها را با انتقال متغیرهای استاتور و روتور به دستگاه مرجعی که می تواند با هر سرعت زاویه ای دلخواهی بچرخد و یا ساکن باشد، می توان حذف کرد. در اینصورت همه تبدیل های حقیقی شناخته شده را می توان به سادگی با قرار دادن سرعت چرخشی مورد نظر در دستگاه مرجع اختیاری به دست آورد. روابط (۲-۸) و (۲-۹) برای انتقال متغیرها از دستگاه abc به دستگاه مرجع اختیاری dq استفاده می شوند [۲۰].

$$F_{dq0} = K_s F_{abc} \quad (۹-۲)$$

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (۱۰-۲)$$

در روابط فوق، زاویه  $\theta$  برابر با  $\omega.t$  می باشد به طوریکه  $\omega$  سرعت زاویه ای اختیاری دستگاه مرجع dq می باشد.

پس ازاینکه معادلات ماشین با استفاده از روش های کلاسیک در دستگاه abc بر حسب متغیرهای ماشین بدست آورده می شوند می توان با انتقال به دستگاه مرجع اختیاری dq برای انطباق با مدارهای گردان، این معادلات را اصلاح کرد. در اینصورت معادلات ولتاژ ماشین در دستگاه مرجع

اختیاری مستقیماً و بدون صرف کار مثلثاتی زیاد نوشته می شوند. به طوریکه معادلات ماشین در هر دستگاه مرجعی و با تخصیص مناسب سرعت دستگاه مرجع محاسبه می شوند.

اگرچه رفتار ماشین القایی متقارن در هر دستگاه مرجعی می تواند توصیف شود ولی از سه دستگاه مرجع عموماً استفاده می شود. یعنی دستگاه مرجع ساکن که ابتدا توسط اچ.سی. استنلی به کار گرفته شد، دستگاه مرجع روتور که تبدیل پارک اعمال شده به ماشین القایی (بررتون) است و دستگاه مرجع سنکرون. معادله های ولتاژ برای هر یک از این دستگاههای مرجع میتواند از معادله های ولتاژ در دستگاه مرجع اختیاری با قرار دادن  $\omega$  با سرعت مناسب بدست آورده شوند. یعنی  $\omega = 0$  برای ساکن،  $\omega = \omega_r$  برای روتور،  $\omega = \omega_s$  برای دستگاه مرجع گردان سنکرون. عموماً شرایط کار تعیین کننده معمولترین نوع دستگاه مرجع برای تحلیل یا شبیه سازی است. به عنوان مثال اگر مدارهای خارجی روتور نامتعادل بوده ولی ولتاژهای اعمالی به استاتور متعادل باشند آنگاه از دستگاه مرجع روتور استفاده می شود. دستگاه مرجع ساکن یا سنکرون عموماً برای تحلیل شرایط متعادل یا متقارن به کار برده می شوند. دستگاه مرجع سنکرون به ویژه در حالتی مرسوم است که مشخصه دینامیکی یک ماشین القایی را در یک برنامه کامپیوتری دیجیتالی مورد استفاده برای مطالعه پایداری گذرا و دینامیکی سیستمهای قدرت بزرگ وارد می کنیم.

## ۲-۴-۱-۲- مدلسازی در دستگاه مرجع dq

در این مدلسازی از دستگاه مرجع سنکرون برای انتقال متغیرها از دستگاه abc به دستگاه مرجع dq، استفاده شده است. در این شرایط با توجه مدار معادل ماشین در شکل (۲-۷)، معادلات ولتاژ استاتور و روتور ماشین القایی در دستگاه مرجع سنکرون بصورت زیر بدست می آیند [۸]:

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_s \lambda_{qs} \quad (11-2)$$

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_s \lambda_{ds} \quad (12-2)$$

$$V_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (13-2)$$

$$V_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (14-2)$$

در معادلات فوق  $I_s$  و  $I_r$  به ترتیب مقاومت مربوط به سیم پیچ هر فاز استاتور و روتور می باشند و  $\omega_s$  سرعت زاویه ای سنکرون و  $\omega_r$  نیز سرعت زاویه ای چرخش روتور می باشد.

شار دور استاتور و روتور در روابط فوق، نیز بصورت زیر بدست می آیند:

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \quad (15-2)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \quad (16-2)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} = \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{ds} + \sigma L_r i_{dr} \quad (17-2)$$

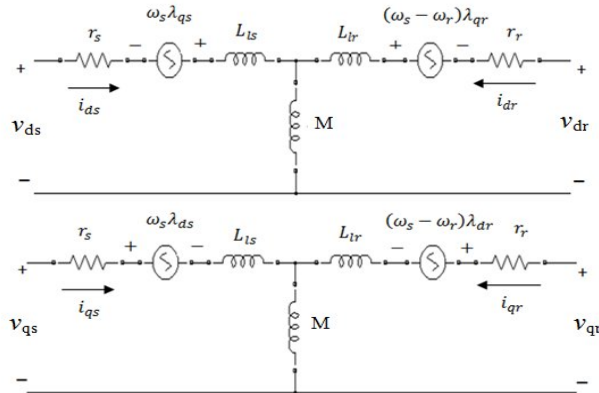
$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} = \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{qs} + \sigma L_r i_{qr} \quad (18-2)$$

در معادلات فوق  $L_s$  و  $L_r$  به ترتیب اندوکتانس مربوط به سیم پیچ هر فاز استاتور و روتور می باشند و  $M$  اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ استاتور و روتور است.  $\sigma$  نیز فاکتور نشتی می باشد که بصورت زیر بدست می آید:

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad (19-2)$$

برای محاسبه توان اکتیو و راکتیو استاتور از رابطه (۲۰-۲) استفاده می شود:

$$P_s + jQ_s = -\frac{3}{2} \cdot V_s \cdot I_s^* \quad (20-2)$$



شکل (۲-۷): مدار معادل ماشین القایی سه فاز متقارن در دستگاه مرجع سنکرون

به طوریکه:

$$V_s = V_{ds} + jV_{qs} \quad (21-2)$$

$$I_s = I_{ds} + jI_{qs} \quad (22-2)$$

$$I_s^* = I_{ds} - jI_{qs} \quad (23-2)$$

بنابراین با توجه به روابط (20-2) - (23-2)، توان اکتیو و راکتیو استاتور با توجه به روابط زیر بدست

می آیند:

$$P_s = -\frac{3}{2}(V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs}) \quad (24-2)$$

$$Q_s = -\frac{3}{2}(-V_{ds}I_{qs} + V_{qs}I_{ds}) \quad (25-2)$$

با توجه به ثابت بودن ولتاژ استاتور در دستگاه مرجع سنکرون، می توان گفت که مؤلفه های dq شار

استاتور نیز در این دستگاه ثابت می باشند و تغییرات آنها صفر خواهد بود. بنابراین با صرف نظر کردن از

مقاومت استاتور، داریم:

$$\begin{cases} V_{ds} = -\omega_s \lambda_{qs} \\ V_{qs} = \omega_s \lambda_{ds} \end{cases} \quad (26-2)$$

با توجه به روابط (15-2)، (16-2)، (24-2)، (25-2) و (26-2) توان های اکتیو و راکتیو خروجی از

استاتور بصورت زیر بدست می آیند:

$$P_s = \frac{3M\omega_s}{2L_s}(-\lambda_{qs}i_{dr} + \lambda_{ds}i_{qr}) \quad (27-2)$$

$$Q_s = \frac{3\omega_s}{2L_s}(-\lambda_{ds}(\lambda_{ds} - Mi_{dr}) - \lambda_{qs}(\lambda_{qs} - Mi_{qr})) \quad (28-2)$$

با توجه به مدار معادل ماشین در شکل (2-7)، توان ورودی از شفت روتور برابر است با مجموع توان

خروجی از منابع ولتاژ معادل  $\omega_s \lambda_s$  و  $(\omega_s - \omega_r)\lambda_r$  که مطابق زیر بدست می آید:

$$P_e = -\frac{3}{2} \cdot \text{Re}[j\omega_s \lambda_s \cdot I_s + j(\omega_s - \omega_r)\lambda_r \cdot I_r] \quad (29-2)$$

به طوریکه:

$$\lambda_s = \lambda_{ds} + j\lambda_{qs} \quad (30-2)$$

$$\lambda_r = \lambda_{dr} + j\lambda_{qr} \quad (31-2)$$

$$I_r = I_{dr} + jI_{qr} \quad (32-2)$$

بنابراین با توجه به روابط (۲۹-۲) - (۳۲-۲) داریم:

$$P_e = \frac{3M\omega_r}{2L_s} (-\lambda_{qs}i_{dr} + \lambda_{ds}i_{qr}) \quad (33-2)$$

حال می توان گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور را با توجه به توان ورودی از شفت روتور بدست آورد:

$$T_e = \frac{P}{2} \cdot \frac{P_e}{\omega_r} \quad (34-2)$$

در رابطه فوق P تعداد قطبهای ماشین می باشد.

معادله گشتاور ماشین نیز بصورت زیر بیان می شود:

$$T_g - T_e = J \left( \frac{2}{P} \right) \frac{d\omega_r}{dt} \quad (35-2)$$

در رابطه فوق J (Kg.m<sup>2</sup>) ممان اینرسی روتور و توربین می باشد.

با توجه به توان اکتیو استاتور و توان ورودی از شفت روتور، می توان توان اکتیو رد و بدل شده بین

روتور و RSC را مطابق زیر بدست آورد:

$$P_r = P_e - P_s \quad (36-2)$$

## ۲-۴-۲- مدلسازی مبدل سمت شبکه و خازن DC-Link

در شکل (۸-۲)، آرایش مداری اتصال مبدل سمت شبکه به شبکه، نشان داده شده است. با توجه به

این شکل، معادلات ولتاژ خروجی از مبدل را می توان در دستگاه abc بصورت زیر بیان کرد [۸]:

$$V_{ag} = r_g i_{ag} + L_g \frac{di_{ag}}{dt} + V_{as} \quad (37-2)$$

$$V_{bg} = r_g i_{bg} + L_g \frac{di_{bg}}{dt} + V_{bs} \quad (38-2)$$

$$V_{cg} = r_g i_{cg} + L_g \frac{di_{cg}}{dt} + V_{cs} \quad (39-2)$$

به طوریکه با انتقال معادلات فوق به دستگاه مرجع سنکرون dq، داریم:

$$V_{dg} = r_g i_{dg} + L_g \frac{di_{dg}}{dt} - \omega_s L_g i_{qg} + V_{ds} \quad (40-2)$$

$$V_{qg} = r_g i_{qg} + L_g \frac{di_{qg}}{dt} + \omega_s L_g i_{dg} + V_{qs} \quad (41-2)$$

در معادلات فوق  $r_g$  و  $L_g$  به ترتیب مقاومت و اندوکتانس مدار کوپلینگ بین مبدل سمت شبکه و شبکه می باشند.

با توجه به شکل (۸-۲)، توانهای اکتیو و راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه با صرفنظر کردن از مقاومت  $r_g$ ، در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه به صورت زیر بیان می شوند.

$$P_g + jQ_g = \frac{3}{2} V_s I_g^* \quad (42-2)$$

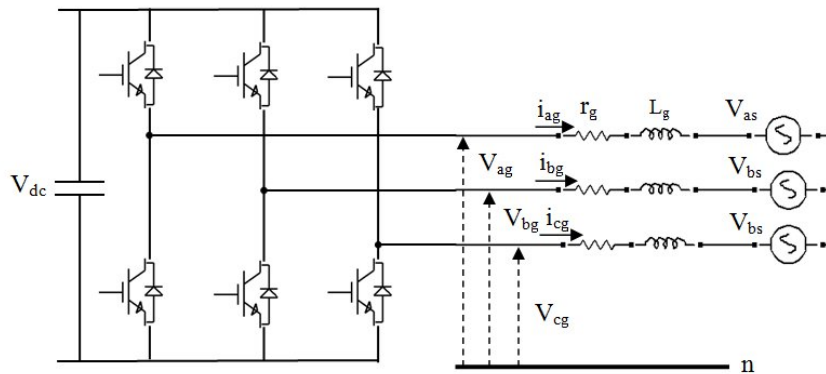
$$P_g = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{dg} + V_{qs} I_{qg}) \quad (43-2)$$

$$Q_g = \frac{3}{2} (-V_{ds} I_{qg} + V_{qs} I_{dg}) \quad (44-2)$$

از طرفی نیز با صرفنظر کردن از تلفات مبدلها، رابطه زیر برای ولتاژ DC-Link برقرار است:

$$C \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} \cdot V_{dc} = P_r - P_g = P_e - P_s - P_g \quad (45-2)$$

در رابطه فوق C ظرفیت خازن DC-Link می باشد.



شکل (۸-۲): آرایش مداری اتصال مبدل سمت شبکه به شبکه



## ۲-۵- کنترل ژنراتور القایی تغذیه دابل

همانگونه که قبلاً اشاره شد ساختار DFIG به گونه ای است که روتور از طریق ۲ مبدل که بصورت Back-to-Back قرار گرفته اند به شبکه متصل می گردد و رفتار DFIG با کنترل این ۲ مبدل سمت روتور و سمت شبکه کنترل می گردد. به طوریکه با کنترل مبدل سمت روتور، سیم پیچ های روتور به گونه ای تغذیه می گردند تا شرایط مطلوب ذیل برآورده گردد [۴] و [۵]:

۱- با کنترل گشتاور الکترومغناطیسی ماشین، سرعت ژنراتور را طوری تنظیم کرد تا ماکزیمم توان مکانیکی از باد دریافت گردد.

۲- با کنترل سرعت ماشین، توان اکتیو استاتور نیز قابل کنترل است.

۳- توان راکتیو استاتور را بصورت کاملاً مستقل از توان اکتیو استاتور و گشتاور، کنترل گردد.

از طرفی مبدل سمت شبکه نیز با توجه به اهداف زیر کنترل می گردد [۸]:

۱- ولتاژ DC-Link شارژ و مقدار آن بدون اینکه جهت انتقال توان در آن تأثیر بگذارد همواره تثبیت گردد.

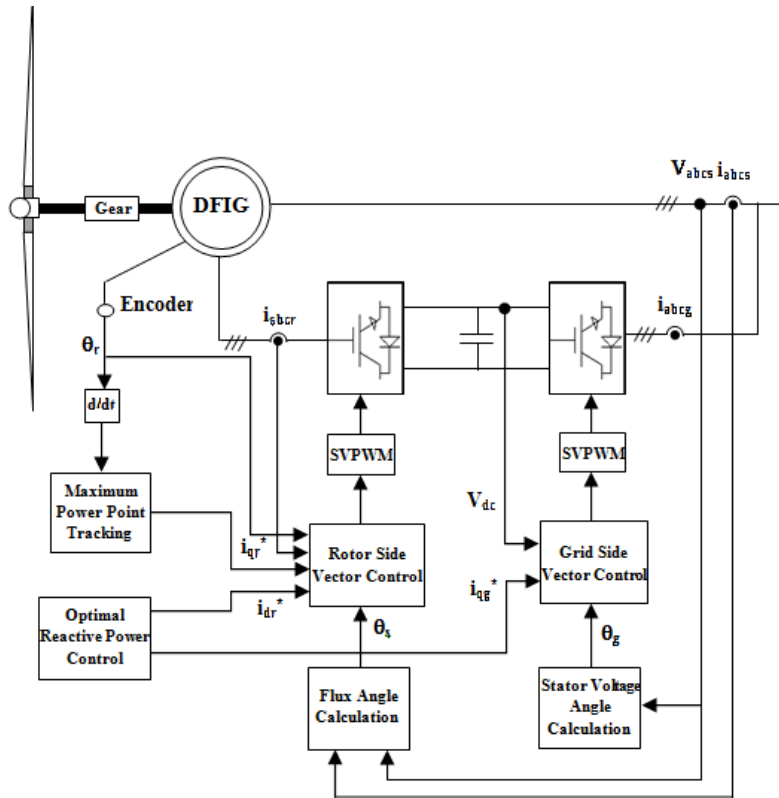
۲- توان راکتیو خروجی از این مبدل بصورت مستقل از توان اکتیو خروجی از آن، کنترل گردد.

در این بخش در خصوص روش کنترل برداری DFIG، در دستگاههای همراستا با بردار ولتاژ و شار استاتور نیز بحث می شود. با توجه به مدلسازی DFIG در دستگاه dq، می توان با در نظر گرفتن محور d دستگاه مرجع dq در راستای بردار ولتاژ و یا شار استاتور، روش کنترل برداری را در هر کدام از این ۲ دستگاه مورد بررسی قرار داد. به طوریکه مقادیر جریان مرجع برای دستیابی به شرایط عملکرد مطلوب DFIG در این دستگاه ها با یکدیگر متفاوت می باشند. بنابراین می توان با توجه به دستگاه مرجع dq مورد نظر، مقادیر جریان مرجع dq را برای برآورده شدن اهداف فوق بدست آورد. پس از محاسبه مقادیر جریان مرجع و نیز اندازه گیری مقادیر واقعی جریانهای مربوطه می توان با استفاده از کنترلرهای جریان، ولتاژهای dq مرجع برای تغذیه روتور و یا خروجی GSC بدست آورد.

بنابراین با انتقال ولتاژهای dq مرجع بدست آمده به دستگاه abc ، ولتاژهای مرجع  $V_a^*$  ،  $V_b^*$  و  $V_c^*$  بدست می آیند که می توان از طریق کنترل سوئیچینگ مبدل ها با روش PWM یا SVPWM ولتاژهای مذکور را ایجاد نمود. به طوریکه شکل (۲-۹)، روند کلی که برای کنترل مبدل های RSC و GSC توضیح داده شده است را نشان می دهد. در ادامه به بررسی دقیقتر چگونگی کنترل این مبدلها در دستگاههای همراستا با بردار ولتاژ و شار استاتور پرداخته می شود.

## ۲-۵-۱- کنترل RSC

با توجه به اهداف کنترلی که برای این مبدل در شرایط ولتاژ متعادل شبکه در نظر گرفته می شود جریانهای مرجع  $i_{dr}^*$  و  $i_{qr}^*$  در دستگاه های مرجع همراستا با بردار شار و یا ولتاژ استاتور تعیین می گردند. در نتیجه با استفاده از کنترلر مناسب می توان مقادیر ولتاژ های مطلوب برای تغذیه روتور را بدست آورد و با سوئیچ زنی مناسب مبدل، این ولتاژ ها را برای تغذیه سیم پیچ های روتور ایجاد نمود.



شکل (۲-۹): شماتیک کلی کنترل مبدل های RSC و GSC

## ۲-۵-۱-۱- کنترل RSC در دستگاه مرجع همراه با بردار شار استاتور

در دستگاه مرجع همراه با بردار شار استاتور، محور d این دستگاه در راستای بردار شار استاتور می باشد که تحت این شرایط  $\lambda_{ds}$  همواره مقداری ثابت و  $\lambda_{qs}$  صفر می شود. تخمین موقعیت بردار شار استاتور  $\theta_s$  مطابق زیر با محاسبه  $\lambda_{\beta s}$  و  $\lambda_{\alpha s}$  در دستگاه مرجع ساکن صورت می گیرد [۹]:

$$\begin{cases} \lambda_{\alpha s} = \int (V_{\alpha s} - r_s i_{\alpha s}) dt \\ \lambda_{\beta s} = \int (V_{\beta s} - r_s i_{\beta s}) dt \end{cases} \Rightarrow \theta_s = \tan^{-1} \left( \frac{\lambda_{\beta s}}{\lambda_{\alpha s}} \right) \quad (46-2)$$

در این دستگاه با توجه به ثابت بودن  $\lambda_{ds}$  و نیز صفر شدن  $\lambda_{qs}$ ، و با صرف نظر کردن از مقاومت استاتور داریم:

$$\begin{cases} V_{ds} = -\omega_s \lambda_{qs} = 0 \\ V_{qs} = \omega_s \lambda_{ds} \end{cases} \quad (47-2)$$

در این دستگاه، گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ )، توان اکتیو استاتور ( $P_s$ ) و توان راکتیو استاتور ( $Q_s$ ) بصورت زیر بدست می آیند:

$$T_e = \frac{3PM}{4L_s} \lambda_{ds} i_{qr} \quad (48-2)$$

$$P_s = \frac{3M\omega_s}{2L_s} \lambda_{ds} i_{qr} \quad (49-2)$$

$$Q_s = \frac{3\omega_s}{2L_s} (-\lambda_{ds} (\lambda_{ds} - M i_{dr})) \quad (50-2)$$

همانطور که در روابط فوق مشاهده می شود با تنظیم جریان  $i_{qr}$  برای کنترل گشتاور و توان اکتیو استاتور و نیز تنظیم جریان  $i_{dr}$  برای کنترل توان راکتیو استاتور، می توان گشتاور و توان اکتیو استاتور را بصورت کاملاً مستقل از توان راکتیو استاتور کنترل کرد. این کنترل مستقل نتایج مطلوبی را بدنبال دارد به طوریکه می توان با کنترل جریان  $i_{qr}$ ، سرعت و گشتاور را طوری تنظیم نمود تا ماکزیمم توان از انرژی باد دریافت گردد و از طرفی با تنظیم جریان  $i_{dr}$ ، توان راکتیو استاتور را بدون اینکه تغییری در توان دریافتی از باد صورت گیرد کنترل نمود.

بنابراین با مشخص شدن مقادیر مطلوب گشتاور و توان اکتیو و راکتیو استاتور، مقادیر جریان مرجع

$i_{qr}^*$  و  $i_{dr}^*$  در دستگاه مرجع همراه با بردار شار استاتور بصورت زیر بدست می آیند:

- جریان مرجع  $i_{qr}^*$  با توجه به گشتاور مورد نیاز:

$$i_{qr}^* = \frac{4L_s}{3PM} \left( \frac{T_e}{\lambda_{ds}} \right) \quad (51-2)$$

- جریان مرجع  $i_{qr}^*$  با توجه به توان اکتیو مطلوب خروجی از استاتور:

$$i_{qr}^* = \frac{2L_s}{3M\omega_s} \left( \frac{P_s}{\lambda_{ds}} \right) \quad (52-2)$$

- جریان مرجع  $i_{dr}^*$  با توجه به توان راکتیو مطلوب خروجی از استاتور:

$$i_{dr}^* = \frac{2L_s}{3M\omega_s} \left( \frac{Q_s}{\lambda_{ds}} \right) + \frac{\lambda_{ds}}{M} \quad (53-2)$$

## ۲-۵-۱-۲- کنترل RSC در دستگاه مرجع همراه با بردار ولتاژ استاتور

در دستگاه مرجع همراه با بردار ولتاژ استاتور، محور d این دستگاه در راستای بردار ولتاژ استاتور می باشد که در اینصورت  $V_{ds}$  مقداری ثابت و  $V_{qs}$  صفر خواهد شد. در این دستگاه برای تخمین بردار ولتاژ استاتور از رابطه زیر استفاده می شود:

$$\theta_s = \tan^{-1} \left( \frac{V_{\beta s}}{V_{\alpha s}} \right) \quad (54-2)$$

همانطور که در رابطه فوق مشاهده می شود برای محاسبه  $\theta_s$  کافی است که ولتاژهای استاتور به دستگاه مرجع ساکن انتقال یابند و  $V_{\alpha s}$  و  $V_{\beta s}$  بدست آیند. با توجه به اینکه در اینجا برای تخمین موقعیت محور d هیچگونه عملیات انتگرالگیری برای محاسبه  $\theta_s$  صورت نمی گیرد بنابراین محاسبه  $\theta_s$  در این دستگاه نسبت به دستگاه مرجع همراه با شار استاتور ساده تر و البته دقیقتر و با خطای کمتری همراه خواهد بود. از طرفی نیز برای تخمین زاویه بردار شار استاتور، بایستی مقدار دقیق مقاومت استاتور مشخص گردد تا با توجه به رابطه (۲-۴۶) این زاویه محاسبه شود. اما این امر نیز با

توجه به دقیق نبودن مقدار مقاومت استاتور و تغییر آن، می تواند منجر به ایجاد خطا در تخمین زاویه بردار شار استاتور گردد. لذا پیاده سازی کنترل RSC در دستگاه مرجع همراستا با بردار ولتاژ استاتور می تواند نتایج بهتری به همراه داشته باشد.

در اینجا نیز همانطور که قبلاً اشاره شد با توجه به ناچیز بودن مقاومت استاتور، روابط زیر حاصل می شود:

$$\begin{cases} V_{ds} = -\omega_s \lambda_{qs} \\ V_{qs} = \omega_s \lambda_{ds} = 0 \end{cases} \quad (55-2)$$

بنابراین با توجه به روابط فوق، گشتاور الکترومغناطیسی و توان اکتیو و راکتیو استاتور بصورت زیر بدست می آیند:

$$T_e = \frac{3PM}{4L_s \omega_s} V_{ds} i_{dr} \quad (56-2)$$

$$P_s = \frac{3M}{2L_s} V_{ds} i_{dr} \quad (57-2)$$

$$Q_s = -\frac{3V_{ds}}{2L_s} \left( \frac{V_{ds}}{\omega_s} + M i_{qr} \right) \quad (58-2)$$

در اینجا نیز با توجه به مقادیر مطلوب گشتاور و توان اکتیو و راکتیو استاتور می توان مقادیر جریان مرجع  $i_{dr}^*$  و  $i_{qr}^*$  را در دستگاه مرجع همراستا با ولتاژ استاتور بصورت زیر بدست آورد:

- جریان مرجع  $i_{dr}^*$  با توجه به گشتاور مورد نیاز:

$$i_{dr}^* = \frac{4L_s \omega_s}{3PM} \left( \frac{T_e}{V_{ds}} \right) \quad (59-2)$$

- جریان مرجع  $i_{dr}^*$  با توجه به توان اکتیو مطلوب خروجی از استاتور:

$$i_{dr}^* = \frac{2L_s}{3M} \left( \frac{P_s}{V_{ds}} \right) \quad (60-2)$$

- جریان مرجع  $i_{qr}^*$  با توجه به توان راکتیو مطلوب خروجی از استاتور:

$$i_{qr}^* = -\frac{2L_s}{3MV_{ds}}Q_s - \frac{V_{ds}}{M\omega_s} \quad (61-2)$$

### ۲-۵-۱-۳- طراحی کنترلر جریان

با مشخص شدن مقادیر جریانهای مرجع  $i_{dr}^*$  و  $i_{qr}^*$  نیاز است که از ۲ کنترلر برای تطبیق جریانهای  $i_{qr}$  و  $i_{dr}$  با مقادیر مرجع متناظر با خود، استفاده شود. معادلات ولتاژ روتور (۲-۱۳) و (۲-۱۴)، اساس طراحی کنترلرهای جریان را تشکیل می دهند به طوریکه با جاگذاری روابط (۲-۱۷) و (۲-۱۸) در معادلات ولتاژ روتور، داریم [۸]:

$$V_{dr} = \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} + r_r i_{dr} - s\omega_s \sigma L_r i_{qr} - s\omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{qs} \quad (62-2)$$

$$V_{qr} = \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + r_r i_{qr} + s\omega_s \sigma L_r i_{dr} + s\omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{ds} \quad (63-2)$$

در معادلات فوق s لغزش روتور می باشد.

حال با توجه به روابط فوق، روابط زیر برای طراحی کنترلرهای جریان در نظر گرفته می شوند:

$$V_{dr} = \sigma L_r V_{dr}' + r_r i_{dr} - s\omega_s \sigma L_r i_{qr} - s\omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{qs} \quad (64-2)$$

$$V_{qr} = \sigma L_r V_{qr}' + r_r i_{qr} + s\omega_s \sigma L_r i_{dr} + s\omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{ds} \quad (65-2)$$

در روابط (۲-۶۴) و (۲-۶۵)، ولتاژهای کنترلی  $V_{dr}'$  و  $V_{qr}'$ ، با استفاده از کنترلر های PI و با مقایسه

جریانهای  $i_{dr}$  و  $i_{qr}$  بدست آمده با مقادیر مرجع  $i_{dr}^*$  و  $i_{qr}^*$  مطابق زیر بدست می آیند:

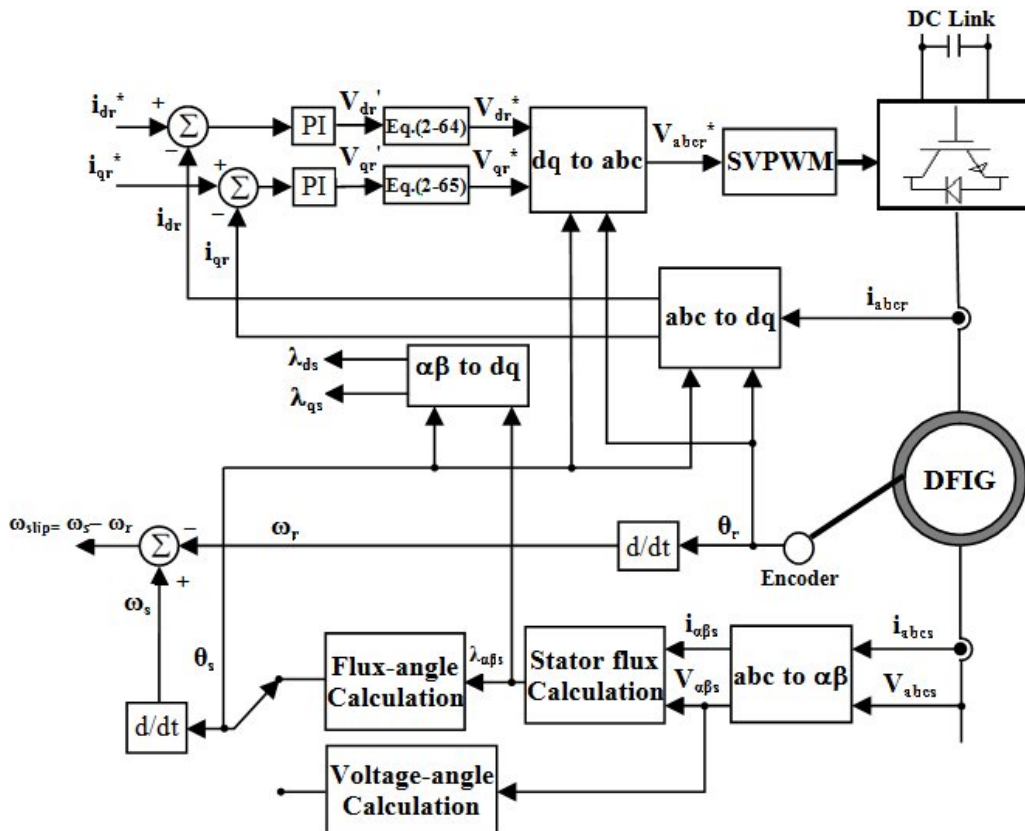
$$V_{dr}' = \frac{di_{dr}}{dt} = K_{p1} (i_{dr}^* - i_{dr}) + K_{i1} \int (i_{dr}^* - i_{dr}) dt \quad (66-2)$$

$$V_{qr}' = \frac{di_{qr}}{dt} = K_{p1} (i_{qr}^* - i_{qr}) + K_{i1} \int (i_{qr}^* - i_{qr}) dt \quad (67-2)$$

در روابط (۲-۶۶) و (۲-۶۷)، ضرایب  $K_{p1}$  و  $K_{i1}$  به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالگیر کنترلر PI می

باشند.

با توجه به معادلات فوق، مقادیر ولتاژ مرجع  $V_{dr}^*$  و  $V_{qr}^*$  بدست می آیند که با در نظر گرفتن زاویه  $\theta_s$  (زاویه محور d دستگاه مرجع همراستا با بردار شار استاتور) و نیز زاویه مربوط به موقعیت روتور  $\theta_r$ ، ولتاژهای مرجع بدست آمده، به دستگاه abc انتقال می یابند. حال می توان به کمک روشهای سوئیچینگ از قبیل PWM و یا SVPWM ولتاژهای مورد نظر را در خروجی مبدل سمت روتور برای تغذیه سیم پیچ های روتور ایجاد کرد. در شکل (۲-۱۰)، بلوک دیاگرام کنترلی مبدل سمت روتور نشان داده شده است به طوریکه کلیه مراحل کنترلی تشریح شده در این بخش را می توان به صورت واضح در این بلوک دیاگرام مشاهده نمود.



شکل (۲-۱۰): بلوک دیاگرام کنترلی RSC

## ۲-۵-۲- کنترل GSC

کنترل مبدل سمت شبکه در دستگاه مرجع همراستا با بردار ولتاژ استاتور پیاده سازی می شود. به طوریکه در این دستگاه، ولتاژ DC-Link و توان راکتیو خروجی از GSC بصورت مستقل از هم کنترل می گردند. در این دستگاه، توان های اکتیو و راکتیو خروجی از GSC به سمت شبکه، بصورت زیر بدست می آیند:

$$P_g = \frac{3}{2} V_{ds} I_{dg} \quad (۶۸-۲)$$

$$Q_g = -\frac{3}{2} V_{ds} I_{qg} \quad (۶۹-۲)$$

با توجه به معادلات فوق، می توان دریافت که توان اکتیو خروجی از GSC با کنترل  $i_{dg}$  و توان راکتیو خروجی از GSC با کنترل  $i_{qg}$ ، بصورت کاملاً مستقل از هم کنترل می گردند. همچنین با توجه به رابطه (۴۵-۲) کنترل ولتاژ DC-Link از طریق تنظیم جریان  $i_{dg}$  امکان پذیر است. بنابراین با تعیین توان راکتیو مرجع،  $i_{qg}^*$  مرجع بدست می آید. از طرفی دیگر با توجه به ولتاژ DC-Link،  $V_{dc}^*$  و مقایسه آن با مقدار واقعی بدست آمده، می توان با استفاده از کنترلر PI جریان  $i_{dg}^*$  مرجع را بدست آورد.

طراحی کنترلر جریان برای GSC مشابه با طراحی کنترلر جریان RSC می باشد. به طوریکه روابط (۴۰-۲) و (۴۱-۲) مربوط به معادلات ولتاژ GSC، اساس طراحی کنترلر را تشکیل میدهند. با توجه به روابط مذکور، روابط زیر برای طراحی کنترلرهای جریان در نظر گرفته می شوند:

$$V_{dg} = L_g V'_{dg} + r_g i_{dg} - \omega_s L_g i_{qg} + V_{ds} \quad (۷۰-۲)$$

$$V_{qg} = L_g V'_{qg} + r_g i_{qg} + \omega_s L_g i_{dg} + V_{qs} \quad (۷۱-۲)$$

در روابط فوق با استفاده از کنترلر های PI و با مقایسه جریانهای  $i_{dg}$ ،  $i_{qg}$  بدست آمده با مقادیر مرجع  $i_{dg}^*$  و  $i_{qg}^*$ ، ولتاژهای کنترلی  $V_{dg}'$  و  $V_{qg}'$ ، مطابق زیر بدست می آیند:

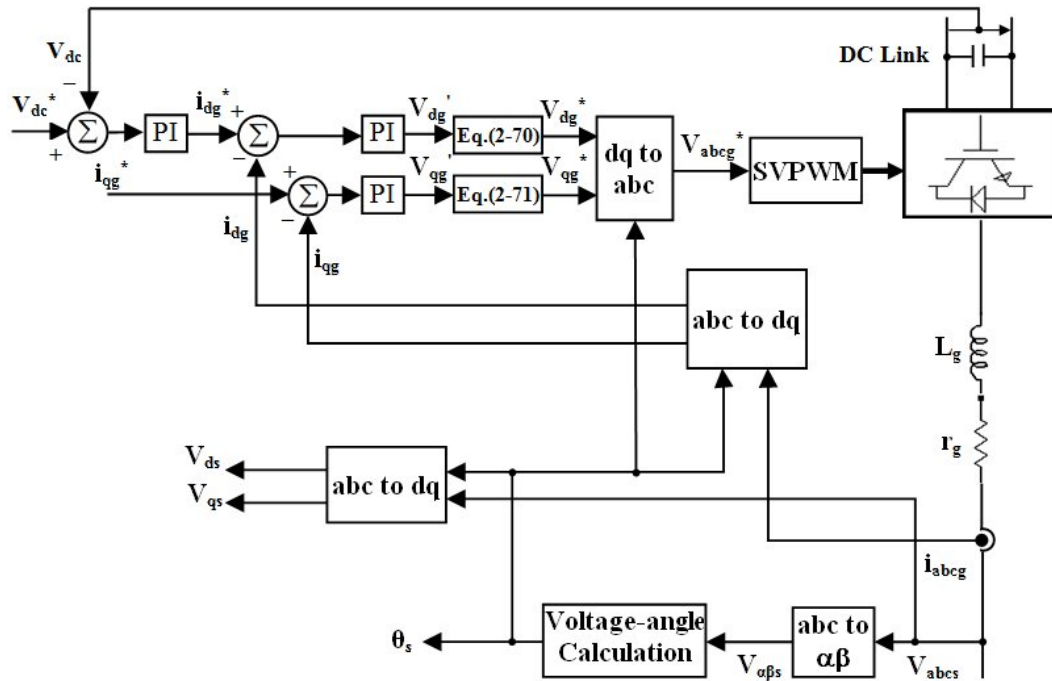
$$V'_{dg} = \frac{di_{dg}}{dt} = K_{p2} (i_{dg}^* - i_{dg}) + K_{i2} \int (i_{dg}^* - i_{dg}) dt \quad (۷۲-۲)$$



$$V'_{qg} = \frac{di_{qg}}{dt} = K_{p2}(i_{qg}^* - i_{qg}) + K_{i2} \int (i_{qg}^* - i_{qg}) dt \quad (۷۳-۲)$$

در معادلات فوق  $K_{p2}$  و  $K_{i2}$  به ترتیب ضرایب کنترلر PI می باشند.

با توجه به معادلات فوق، مقادیر ولتاژ مرجع  $V_{dg}^*$  و  $V_{qg}^*$  بدست می آیند. شکل (۲-۱۱) بلوک دیاگرام کنترل مبدل سمت شبکه را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با پیاده سازی کنترلرهای جریان، ولتاژهای مرجع  $V_{dg}^*$  و  $V_{qg}^*$  بدست می آیند که با انتقال این ولتاژها به دستگاه abc (با لحاظ کردن زاویه  $\theta_s$  مربوط به موقعیت بردار ولتاژ استاتور) ولتاژهای مرجع  $V_a^*$ ،  $V_b^*$  و  $V_c^*$  بدست می آیند. حال مشابه با کنترل RSC، در اینجا نیز با استفاده از روشهای سوئیچینگ PWM یا SVPWM، ولتاژهای مورد نظر در خروجی GSC ایجاد می گردند تا اهداف کنترلی در نظر گرفته شده برای این مبدل بر آورده گردند.



شکل (۲-۱۱): بلوک دیاگرام کنترلی GSC

# فصل سوم

مدلسازی و کنترل ژنراتور القایی

تغذیه دابل در شرایط نامتعادل ولتاژ

### ۳-۱- مقدمه

نیروگاههای بادی معمولاً در مناطقی احداث می گردند که از لحاظ وضعیت وزش باد دارای شرایط مساعدی باشند. اینگونه مناطق معمولاً در نقاط دور دست واقع می شوند و از دیدگاه شبکه های قدرت در انتهای خطوط انتقال توان قرار می گیرند که نامتعادل بودن ولتاژ در این قسمتها از شبکه، امری غیر معمول نمی باشد. همچنین ممکن است که نیروگاههای بادی به یک شبکه ضعیف متصل باشند که توزیع بار در این شبکه به صورت نامتعادل صورت گرفته است و این نامتعادلی برای مدت طولانی در شبکه وجود داشته باشد که منجر به نامتعادلی ولتاژ شبکه می گردد. نامتعادلی ولتاژ شبکه در محل اتصال نیروگاه بادی به شبکه اثرات مخربی بر ژنراتور و توربین بادی نیروگاه می گذارد. در این بخش پس از بررسی رفتار DFIG در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه به مدلسازی و کنترل آن در این شرایط پرداخته می شود.

### ۳-۲- اصول مؤلفه های متقارن

با استفاده از مؤلفه های متقارن می توان کمیت های نامتقارن فاز مانند جریان ها و ولتاژها را با سه مؤلفه متقارن جداگانه جایگزین نمود. روش مؤلفه های متقارن توسط دکتر C.L.Fortescue در سال ۱۹۱۸ معرفی شد. بر اساس این نظریه، فازورهای نامتقارن سه فاز از یک سیستم سه فاز را می توان به سه سیستم متقارن از فازورها به شرح زیر تبدیل کرد [۲۱]:

۱- مؤلفه های توالی مثبت<sup>۴</sup> شامل مجموعه مؤلفه های سه فاز متقارن با توالی abc

۲- مؤلفه های توالی منفی<sup>۵</sup> شامل مجموعه مؤلفه های سه فاز متقارن با توالی acb

۳- مؤلفه های توالی صفر<sup>۶</sup> شامل سه مؤلفه تک فاز که اندازه آنها با هم مساوی بوده و دارای

زاویه فاز یکسان می باشند.

---

4- Positive sequence components  
5- Negative sequence components  
6- Zero sequence components

برای تبدیل فازورهای نامتقارن سه فاز به سه سیستم متقارن از فازورهای توالی مثبت و منفی و صفر از روابط زیر استفاده می شود:

$$\begin{cases} V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\ V_{a1} = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \\ V_{a2} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \end{cases} \quad (1-3)$$

در روابط فوق زیر نویس های ۱، ۲ و ۰ به ترتیب نشان دهنده کمیت های توالی مثبت، منفی و صفر هستند.

همچنین در روابط فوق عملگر  $a$  به عنوان عامل چرخش  $120^\circ$  در خلاف گردش عقربه های ساعت تعریف می شود:

$$\begin{cases} a = 1 \angle 120^\circ = -.5 + .866j \\ a^2 = 1 \angle 240^\circ = -.5 - .866j \\ 1 + a + a^2 = 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

اگر از تبدیل فوق برای تبدیل جریانهای سه فاز نامتقارن استفاده شود در اینصورت مؤلفه توالی صفر جریان با یک سوم مجموع جریان فازها برابر است. بنابراین، هنگامی که جمع جریان فازها صفر نیست، در یک سیستم سه فاز با نقطه خنثی زمین نشده، جریان توالی صفر وجود ندارد ولی اگر نقطه خنثی سیستم قدرت، زمین شده باشد در اینصورت جریان توالی صفر بین نقطه خنثی و زمین، جاری می گردد.

### ۳-۳- ولتاژ نامتعادل

تعریفی که استاندارد IEC 60034-26 ( International Electro Technical Commission ) از نامتعادلی ولتاژ ( Voltage Unbalance Factor ) ارائه کرده است [۲۲]، عبارت است از نسبت دامنه ولتاژ توالی منفی به دامنه ولتاژ توالی مثبت، که به صورت رابطه (۳-۳) بیان می شود:

$$\%VUF = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (3-3)$$

در رابطه (3-3)،  $V_2$  دامنه ولتاژ توالی منفی و  $V_1$  دامنه ولتاژ توالی مثبت می باشد.

برای ولتاژ نامتعادل  $V_{ab}$ ،  $V_{bc}$  و  $V_{ca}$  ولتاژهای توالی منفی و مثبت بصورت زیر بدست می آیند:

$$V_{ab1} = \frac{V_{ab} + a \cdot V_{bc} + a^2 \cdot V_{ca}}{3} \quad (4-3)$$

$$V_{ab2} = \frac{V_{ab} + a^2 \cdot V_{bc} + a \cdot V_{ca}}{3} \quad (5-3)$$

در برخی مراجع به جای توالی منفی از توالی صفر استفاده می شود به طوریکه:

$$\%VUF = \frac{V_0}{V_1} \times 100 \quad (6-3)$$

ولی این تعریف کاربرد عملی کمتری دارد زیرا جریان مؤلفه صفر در سیستمهای سه فازی مثل ژنراتورها و موتورهای القایی سه فاز با نقطه خنثی زمین نشده، عملاً نمی تواند جاری گردد. برعکس تعریف ارائه شده در رابطه (3-3) که نسبت مؤلفه منفی به مثبت را مشخص می سازد از اهمیت بالایی به خصوص در مورد ژنراتورها و موتورهای القایی برخوردار می باشد. زیرا میزان نیروی مخالف اعمالی به روتور که باعث ایجاد گشتاور در جهت عکس چرخش روتور می شود را مشخص می کند.

دومین تعریفی که در اتحادیه ملی تولیدکنندگان وسایل الکتریکی (National Electrical Manufacturers Association) ارائه شده است به صورت رابطه (7-3) تعریف می گردد:

$$\%VUF = \frac{V_{max} - V_{avg}}{V_{avg}} \times 100 \quad (7-3)$$

در رابطه فوق  $V_{avg}$  دامنه ولتاژ متوسط و  $V_{max}$  دامنه ولتاژ ماکزیمم می باشد.

تعریفی که استاندارد NEMA از نامتعادلی ولتاژ ارائه کرده است، از اختلاف فاز بین ولتاژها اجتناب کرده و صرفاً دامنه ولتاژها را مد نظر قرار داده است. به هر حال هر یک از تعاریف فوق نتایج مختلفی از نامتعادلی ولتاژ را بدست می دهد.

به عنوان مثال اگر ولتاژ سه فاز نامتعادل شده خط به خط به صورت زیر باشد:

$$V_{ab} = 450 < 0^\circ$$

$$V_{ab} = 363.6 < -121.44^\circ$$

$$V_{ca} = 405 < 130^\circ$$

با استفاده از رابطه (۳-۱)، مؤلفه های مثبت و منفی ولتاژ به صورت زیر بدست می آیند:

$$V_{ab1} = 404.62522 < 2.89^\circ$$

$$V_{ab2} = 50.217 < -2398^\circ$$

با استفاده از تعریف استاندارد IEC از نامتعادلی ولتاژ طبق تعریف رابطه (۳-۳)، خواهیم داشت:

$$\%VUF = \frac{50.217}{404.625} \times 100 = 12.41\%$$

اما بر اساس تعریف استاندارد NEMA خواهیم داشت:

$$V_{avg} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} = 406.2(v)$$

$$450 - 406.2 = 43.8(v)$$

$$363.6 - 406.2 = -42.6(v)$$

$$405 - 406.2 = -1.2(v)$$

بنابراین درصد نامتعادلی با توجه به اینکه حداکثر اختلاف ولتاژ معادل ۴۳/۸ می باشد، برابر است با:

$$\%VUF = \frac{43.8}{406.2} \times 100 = 10.78\%$$

بدین ترتیب مشاهده می شود که استفاده از ۲ روش مختلف، منجر به ۲ پاسخ و نتیجه متفاوت خواهد شد.

### ۳-۴- دلایل ایجاد نامتعادلی ولتاژ

عمده ترین عوامل مؤثر بر نامتعادلی ولتاژ در یک شبکه به قرار زیر است [۱۰]:

- ۱- ولتاژ ترمینال ژنراتورها
- ۲- ترانسپوز نشدن خطوط انتقال
- ۳- جریان کشیده شده توسط بارها و ترانس ها
- ۴- وقوع اتصال کوتاه

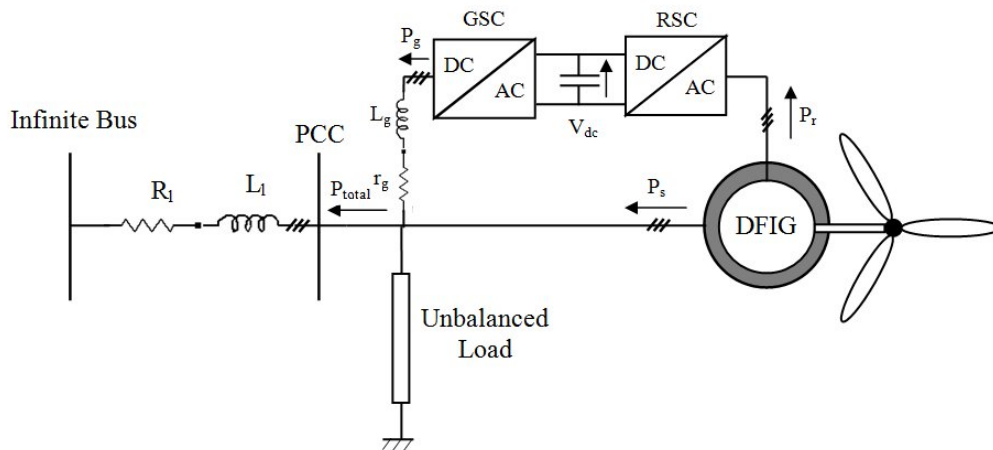
عمدتاً ولتاژ خروجی ژنراتورهای سنکرون و یا ژنراتور های القایی به دلیل عملکرد و ساختار متقارن آنها متعادل است و هیچگاه عملکرد اینگونه ژنراتورها باعث نامتعادل شدن شبکه نمی گردد. عامل دیگری که ممکن است منجر به نامتعادلی ولتاژ شبکه گردد عدم ترانسپوز شدن هادیهای سه فاز خط است. به طوریکه در خطوط انتقال طولانی، متفاوت بودن امپدانس هر فاز منجر به نامتعادل شدن شبکه می شود. بنابراین ترانسپوز کردن هادیها باعث می شود که امپدانس هادیها در یک دوره کامل جابجایی، یکسان شود. دلیل مهم دیگر نامتعادلی ولتاژ، توزیع نامتعادل بار در شبکه می باشد. امپدانسهای نامتعادل مانند ترانسفورماتورها و نحوه اتصال آنها نیز در نامتعادلی ولتاژ سهم بسزایی دارند. جدول (۱-۳) مقادیر حدود مجاز نامتعادلی ولتاژ را در استانداردهای مختلف نشان می دهد.

جدول (۱-۳): حدود مجاز نامتعادلی ولتاژ

| درصد نامتعادلی |       |       | استاندارد |
|----------------|-------|-------|-----------|
| EHV            | HV    | LV-MV |           |
| ۱              | ۱     | ۲     | ایران     |
| ۱              | ۱     | ۲     | IEC1000   |
| -----          | ----- | <۲    | EN50160   |

### ۳-۵- اثر نامتعادلی ولتاژ بر عملکرد ژنراتور القایی تغذیه دوپل

در شکل (۱-۳)، اتصال یک ژنراتور القایی تغذیه دوپل به یک شبکه نامتعادل، نشان داده شده است که محل اتصال می تواند در انتهای خطوط انتقال قدرت طولانی و یا یک شبکه ضعیف قدرت باشد. توزیع نامتعادل بار را می توان با اتصال یک بار تک فاز بزرگ در محل اتصال ژنراتور به شبکه نشان داد. نامتعادل بودن بار در این نقطه منجر به نامتعادل شدن افت ولتاژ در خطوط انتقال توان می گردد و در نتیجه باعث نامتعادلی ولتاژ در پایانه های ژنراتور می شود.



شکل (۳-۱): اتصال یک ژنراتور القایی تغذیه دویل به شبکه نامتعادل

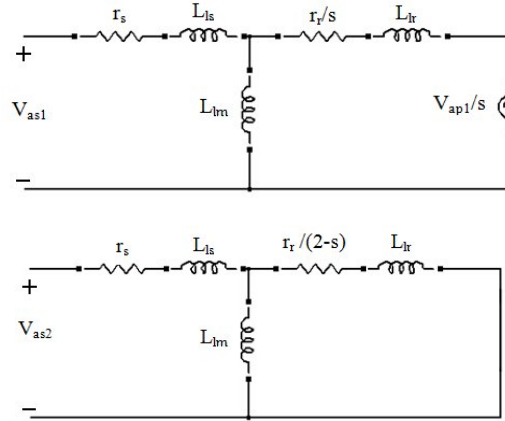
وقوع یک نامتعادلی ولتاژ پایین می‌تواند جریانهای نامتعادل بالایی را در سیم پیچ استاتور ژنراتور ایجاد کند. این جریانهای بالای نامتعادل باعث بالا رفتن حرارت سیم پیچ‌های ماشین بصورت نامتعادل می‌گردد و در نتیجه اثرات مخربی بر سیم پیچ‌ها و عایق و هسته ماشین می‌گذارد [۱۱].

در شکل (۳-۲)، مدارهای معادل حالت دائمی توالی مثبت و منفی یک فاز ژنراتور القایی سه فاز، نشان داده می‌شود [۱۳]. ولتاژهای  $V_{as1}$  و  $V_{as2}$  به ترتیب ولتاژهای توالی مثبت و منفی پایانه‌های استاتور می‌باشند و ولتاژ  $V_{ap1}$  نیز ولتاژ توالی مثبت برای تغذیه سیم پیچ روتور می‌باشد. اساساً نوع کارکرد ماشین القایی در مقابل ولتاژ توالی مثبت، مشابه رفتار آن در شرایط متعادل می‌باشد و جهت میدان اصلی ناشی از جریان توالی مثبت استاتور، مخالف جهت میدان ناشی از جریان توالی منفی استاتور، می‌باشد. همچنین اگر لغزش روتور در حضور ولتاژ توالی مثبت برابر  $s$  باشد در آن صورت لغزش آن در برابر ولتاژ توالی منفی برابر  $2-s$  خواهد بود. نکته مهم در این مدارهای معادل، عدم وجود ولتاژ توالی منفی برای تغذیه و کنترل جریانهای توالی منفی روتور است. با توجه به مدار معادل توالی منفی ژنراتور، ولتاژ توالی منفی استاتور با جریان توالی منفی استاتور دارای رابطه خطی می‌باشد. همانطور که در مدار معادل توالی منفی مشاهده می‌شود امپدانس مربوط به مقاومت  $r_T/(2-s)$  و اندوکتانس  $L_{lr}$  نسبت به امپدانس مغناطیس کننده بسیار ناچیز می‌باشد. از طرفی نیز مقاومت  $r_T/(2-s)$  با توجه به پایین بودن لغزش  $s$ ، تقریباً ثابت است و می‌توان آنرا برابر با  $r_T/2$  فرض کرد. بنابراین مدار معادل توالی



منفی را می توان ساده تر کرد، بطوریکه این مدار فقط شامل مقاومت استاتور و روتور و اندوکتانس های نشتی استاتور و روتور می شود که همگی مقادیر ناچیزی دارند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که ولتاژ توالی منفی استاتور با جریان توالی منفی آن دارای رابطه تقریباً خطی می باشد. با توجه به ناچیز بودن امپدانس کل در مدار مربوط به توالی منفی، وقوع یک نامتعادلی ولتاژ پایین در پایانه های استاتور، می تواند منجر به ایجاد جریانهای بالای توالی منفی گردد که این جریانهای بالای توالی منفی باعث نامتعادل شدن شدید جریانهای استاتور می گردد. بنابراین جریانهای بالای نامتعادل استاتور تلفات مسی شدیدی را در سیم پیچ استاتور بوجود می آورد که حرارت شدید و البته نامتعادلی را در سیم پیچها بدنبال دارد. از آنجاییکه ولتاژ شبکه در محل اتصال ژنراتور به شبکه ممکن است برای زمانهای طولانی نامتعادل باشد بنابراین حرارت بوجود آمده در سیم پیچ های استاتور می تواند اثرات مخربی بر عایق ها داشته باشد.

جریانهای نامتعادل استاتور، نوساناتی با دامنه زیاد و با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه در گشتاور الکترومغناطیسی بوجود می آورد [۱۵]. نوسانات گشتاور نیز منجر به نوسان سرعت روتور می گردد ولی با توجه به اینرسی بالای روتور که متصل به محور توربین می باشد اثر این نوسانات بر روی سرعت روتور ناچیز می باشد. اما نامتعادلی جریانهای استاتور باعث ایجاد نوسانات با دامنه زیاد و با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه در توان های اکتیو و راکتیو خروجی از استاتور نیز می گردد. مبدل سمت شبکه نیز تحت تأثیر نامتعادلی ولتاژ قرار گرفته و توان اکتیو خروجی از آن دچار نوسان می شود و ولتاژ DC-Link نیز تحت تأثیر این نوسانات ریپل دار می گردد. نوسانات توانهای اکتیو خروجی از استاتور و مبدل سمت شبکه، باعث می گردند که توان اکتیو کل خروجی از DFIG نیز دارای نوساناتی با دامنه زیاد و با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه باشد.



در شکل (۲-۳): مدارهای معادل حالت دائمی توالی مثبت و منفی یک فاز ژنراتور القایی سه فاز

### ۳-۶- مدلسازی ژنراتور القایی تغذیه دوپل در شرایط نامتعادلی ولتاژ

در این شرایط، با توجه به وجود مؤلفه های توالی مثبت و منفی ولتاژ و جریان و نیز اهمیتی که کنترل جریانهای توالی منفی روتور و نیز کنترل جریانهای توالی منفی خروجی از مبدل سمت شبکه برای بهبود رفتار DFIG دارند، نیاز است که از ۲ دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  و دستگاه مرجع سنکرون منفی  $(dq)^-$  استفاده شود. به طوریکه مدلسازی و کنترل مؤلفه های مثبت ولتاژ و جریان در دستگاه مرجع  $(dq)^+$  و مدلسازی و کنترل مؤلفه های منفی ولتاژ و جریان در دستگاه مرجع  $(dq)^-$  صورت می گیرد [۲۳].

### ۳-۶-۱- دستگاههای مرجع در شرایط ولتاژ نامتعادل

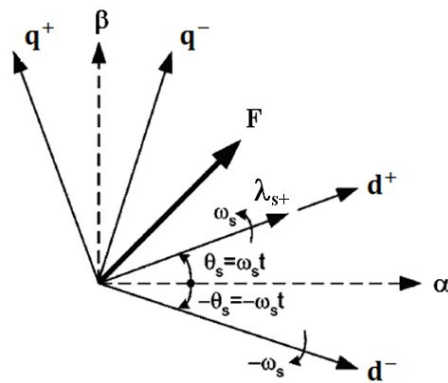
همانگونه که اشاره شد در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه، متغیرهای سه فاز در حالت دائمی به سه مؤلفه مثبت، منفی و صفر تجزیه می شوند که با فرض اینکه سیستم مورد بحث زمین نشده باشد، عملاً جریان توالی صفر در سیستم جاری نمی شود. در سیستم DFIG نیز فرض می کنیم نقطه خنثی سیستم به زمین متصل نشده است، بنابراین بحث اصلی فقط در مورد مؤلفه های توالی مثبت و منفی متغیرهای سه فاز، صورت می گیرد.

همانطور که در فصل قبل اشاره شد مدلسازی DFIG در دستگاه مرجع سنکرون dq انجام می شود. با توجه به اینکه در شرایط نامتعادل، متغیرهای ولتاژ و جریان و شار دارای مؤلفه های توالی مثبت و منفی می باشند بنابراین بهتر است در این شرایط، از ۲ دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  و دستگاه مرجع سنکرون منفی  $(dq)^-$  استفاده شود. سرعت و جهت چرخش محور d دستگاه های مذکور بدینصورت است که محور d دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  با سرعت سنکرون  $\omega_s$  در حال چرخش می باشد و محور d دستگاه مرجع سنکرون منفی  $(dq)^-$  نیز در جهت خلاف آن و با سرعت  $-\omega_s$  می چرخد.

با تجزیه متغیر سه فاز F به مؤلفه های توالی مثبت و منفی و انتقال آنها به دستگاه مرجع ساکن  $\alpha\beta$  داریم:

$$F_{\alpha\beta} = F_{\alpha\beta+} + F_{\alpha\beta-} \quad (۸-۳)$$

به طوریکه در (۸-۳) علامت های مثبت و منفی به ترتیب مربوط به مؤلفه توالی مثبت و منفی متغیر F در دستگاه مرجع ساکن می باشد. در شکل (۳-۳)، ارتباط بین دستگاه های مرجع  $\alpha\beta$ ،  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$  نشان داده شده است [۲۳].



شکل (۳-۳): ارتباط بین دستگاه های مرجع  $\alpha\beta$ ،  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$

با توجه به شکل (۳-۳) بین دستگاه های مرجع  $\alpha\beta$ ،  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$  روابط زیر برقرار می باشد:

$$\begin{cases} F_{dq}^+ = F_{\alpha\beta} e^{-j\theta_s} \\ F_{dq}^- = F_{\alpha\beta} e^{+j\theta_s} \\ F_{dq}^+ = F_{dq}^- e^{-j2\theta_s} \\ F_{dq}^- = F_{dq}^+ e^{+j2\theta_s} \end{cases} \quad (۹-۳)$$

در روابط (۹-۳)، بالانویس (+) مربوط به متغیر F در دستگاه مرجع  $(dq)^+$  و بالانویس (-) مربوط به متغیر F در دستگاه مرجع  $(dq)^-$  می باشد.

بنابراین با در نظر گرفتن مؤلفه های توالی مثبت و منفی متغیر F و انتقال این متغیر به دستگاههای مرجع سنکرون  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$  داریم:

$$\begin{cases} F_{dq}^+ = F_{dq+}^+ + F_{dq-}^+ = F_{dq+}^+ + F_{dq-}^- e^{-j2\theta_s} \\ F_{dq}^- = F_{dq-}^- + F_{dq+}^- = F_{dq-}^- + F_{dq+}^+ e^{+j2\theta_s} \end{cases} \quad (۱۰-۳)$$

همانطور که در روابط (۱۰-۳) مشاهده می شود، متغیر F در دستگاه  $(dq)^+$  از ۲ جمله تشکیل شده است. قسمت اول مربوط به مؤلفه های توالی مثبت متغیر F در دستگاه  $(dq)^+$  می باشد که همواره مقداری ثابت است و قسمت دوم مربوط به مؤلفه های توالی منفی متغیر F در دستگاه  $(dq)^-$  است که با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه در حال تغییر می باشد. برای متغیر F در دستگاه  $(dq)^-$  نیز وضعیت به همین منوال می باشد.

با توجه به ثابت بودن مؤلفه های توالی مثبت و منفی متغیر F به ترتیب در دستگاه های  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$ ، از این دستگاه برای کنترل مجزا و مستقل جریانهای توالی مثبت و منفی DFIG استفاده می گردد. به طوریکه در شرایط نامتعادل، متغیر F به مؤلفه های توالی مثبت و منفی تجزیه می گردد و سپس مؤلفه های توالی مثبت به دستگاه  $(dq)^+$  و مؤلفه های توالی منفی به دستگاه  $(dq)^-$ ، انتقال می یابد تا مؤلفه های مذکور به راحتی کنترل گردند.

### ۳-۶-۲- مدل‌سازی ژنراتور القایی و مبدل سمت روتور

همانطور که اشاره شد در شرایط نامتعادلی ولتاژ با توجه به وجود مؤلفه های توالی مثبت و منفی از ۲ دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  و دستگاه مرجع سنکرون منفی  $(dq)^-$  برای مدل‌سازی و کنترل DFIG استفاده می‌گردد. در این شرایط معادلات ولتاژ توالی مثبت استاتور و روتور ماشین در دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  بصورت زیر بدست می‌آیند [۲۴]:

$$V_{ds+}^+ = r_s i_{ds+}^+ + \frac{d\lambda_{ds+}^+}{dt} - \omega_s \lambda_{qs+}^+ \quad (۱۱-۳)$$

$$V_{qs+}^+ = r_s i_{qs+}^+ + \frac{d\lambda_{qs+}^+}{dt} + \omega_s \lambda_{ds+}^+ \quad (۱۲-۳)$$

$$V_{dr+}^+ = r_r i_{dr+}^+ + \frac{d\lambda_{dr+}^+}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qr+}^+ \quad (۱۳-۳)$$

$$V_{qr+}^+ = r_r i_{qr+}^+ + \frac{d\lambda_{qr+}^+}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{dr+}^+ \quad (۱۴-۳)$$

در معادلات فوق  $I_r$  و  $I_s$  به ترتیب مقاومت مربوط به سیم پیچ هر فاز استاتور و روتور می‌باشند و  $\omega_s$  سرعت زاویه ای سنکرون و  $\omega_r$  نیز سرعت زاویه ای چرخش روتور می‌باشد.

شار دور توالی مثبت استاتور و روتور در دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  نیز بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$\lambda_{ds+}^+ = L_s i_{ds+}^+ + M i_{dr+}^+ \quad (۱۵-۳)$$

$$\lambda_{qs+}^+ = L_s i_{qs+}^+ + M i_{qr+}^+ \quad (۱۶-۳)$$

$$\lambda_{dr+}^+ = L_r i_{dr+}^+ + M i_{ds+}^+ = \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{ds+}^+ + \sigma L_r i_{dr+}^+ \quad (۱۷-۳)$$

$$\lambda_{qr+}^+ = L_r i_{qr+}^+ + M i_{qs+}^+ = \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{qs+}^+ + \sigma L_r i_{qr+}^+ \quad (۱۸-۳)$$

در معادلات فوق  $L_r$  و  $L_s$  به ترتیب اندوکتانس مربوط به سیم پیچ هر فاز استاتور و روتور می‌باشند و  $M$  اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ استاتور و روتور است،  $\sigma$  نیز فاکتور نشتی می‌باشد.

به همین ترتیب می توان معادلات مربوط به ولتاژ و شار توالی منفی استاتور و روتور را در دستگاه مرجع سنکرون منفی  $(dq)^-$  نیز بصورت زیر بدست آورد:

$$V_{ds-}^- = r_s i_{ds-}^- + \frac{d\lambda_{ds-}^-}{dt} + \omega_s \lambda_{qs-}^- \quad (19-3)$$

$$V_{qs-}^- = r_s i_{qs-}^- + \frac{d\lambda_{qs-}^-}{dt} - \omega_s \lambda_{ds-}^- \quad (20-3)$$

$$V_{dr-}^- = r_r i_{dr-}^- + \frac{d\lambda_{dr-}^-}{dt} + (\omega_s + \omega_r) \lambda_{qr-}^- \quad (21-3)$$

$$V_{qr-}^- = r_r i_{qr-}^- + \frac{d\lambda_{qr-}^-}{dt} - (\omega_s + \omega_r) \lambda_{dr-}^- \quad (22-3)$$

همچنین شار دور توالی منفی استاتور و روتور در دستگاه مرجع سنکرون منفی  $(dq)^-$  نیز بصورت زیر بدست می آیند:

$$\lambda_{ds-}^- = L_s i_{ds-}^- + M i_{dr-}^- \quad (23-3)$$

$$\lambda_{qs-}^- = L_s i_{qs-}^- + M i_{qr-}^- \quad (24-3)$$

$$\lambda_{dr-}^- = L_s i_{dr-}^- + M i_{ds-}^- = \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{ds-}^- + \sigma L_r i_{dr-}^- \quad (25-3)$$

$$\lambda_{qr-}^- = L_s i_{qr-}^- + M i_{qs-}^- = \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{qs-}^- + \sigma L_r i_{qr-}^- \quad (26-3)$$

محاسبه توان اکتیو و راکتیو استاتور، در یکی از ۲ دستگاه مذکور انجام می گردد. به طوریکه در دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  داریم:

$$P_s + jQ_s = -\frac{3}{2} V_s^+ \cdot I_s^{+*} \quad (27-3)$$

به طوریکه:

$$V_s^+ = V_{ds}^+ + jV_{qs}^+ \quad (28-3)$$

$$I_s^{+*} = I_{ds}^+ - jI_{qs}^+ \quad (29-3)$$

بنابراین با توجه به روابط (۲۷-۳) - (۲۹-۳) داریم:

$$\begin{cases} P_s = P_{so} + P_{s\sin 2} \sin(2\theta_s) + P_{s\cos 2} \cos(2\theta_s) \\ Q_s = Q_{so} + Q_{s\sin 2} \sin(2\theta_s) + Q_{s\cos 2} \cos(2\theta_s) \end{cases} \quad (30-3)$$

به طوریکه:

$$\begin{bmatrix} P_{so} \\ P_{s\sin 2} \\ P_{s\cos 2} \end{bmatrix} = -\frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_{ds+}^+ & V_{qs+}^+ & V_{ds-}^- & V_{qs-}^- \\ V_{qs-}^- & -V_{ds-}^- & -V_{qs+}^+ & V_{ds+}^+ \\ V_{ds-}^- & V_{qs-}^- & V_{ds+}^+ & V_{qs+}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds+}^+ \\ i_{qs+}^+ \\ i_{ds-}^- \\ i_{qs-}^- \end{bmatrix} \quad (31-3)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{so} \\ Q_{s\sin 2} \\ Q_{s\cos 2} \end{bmatrix} = -\frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_{qs+}^+ & -V_{ds+}^+ & V_{qs-}^- & -V_{ds-}^- \\ -V_{ds-}^- & -V_{qs-}^- & V_{ds+}^+ & V_{qs+}^+ \\ V_{qs-}^- & -V_{ds-}^- & V_{qs+}^+ & -V_{ds+}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds+}^+ \\ i_{qs+}^+ \\ i_{ds-}^- \\ i_{qs-}^- \end{bmatrix} \quad (32-3)$$

در معادلات فوق  $\theta_s$  زاویه بین محور d دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$  و محور  $\alpha$  دستگاه مرجع ساکن  $\alpha\beta$  می باشد به طوریکه محور d دستگاه مذکور که برای مدلسازی و کنترل مبدل سمت روتور به کار برده می شود می تواند در راستای بردار شار توالی مثبت و یا بردار ولتاژ توالی مثبت استاتور باشد. با توجه به ثابت بودن مؤلفه توالی مثبت و منفی ولتاژ استاتور به ترتیب در دستگاه های مرجع سنکرون  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$ ، می توان گفت که مؤلفه های توالی مثبت و منفی شار استاتور نیز در این ۲ دستگاه ثابت می باشند و تغییرات آنها صفر خواهد بود و نیز با صرفنظر کردن از مقاومت استاتور، داریم:

$$\begin{cases} V_{ds-}^- = -\omega_s \lambda_{qs+}^+ \\ V_{qs+}^+ = \omega_s \lambda_{ds+}^+ \\ V_{ds-}^- = \omega_s \lambda_{qs-}^- \\ V_{qs-}^- = -\omega_s \lambda_{ds-}^- \end{cases} \quad (33-3)$$

بنابراین با توجه به روابط (31-3) - (33-3) داریم:

$$\begin{bmatrix} P_{so} \\ Q_{s\sin 2} \\ Q_{s\cos 2} \end{bmatrix} = \frac{3M\omega_s}{2L_s} \begin{bmatrix} -\lambda_{qs+}^+ & \lambda_{ds+}^+ & \lambda_{qs-}^- & -\lambda_{ds-}^- \\ -\lambda_{qs-}^- & \lambda_{ds-}^- & -\lambda_{qs+}^+ & \lambda_{ds+}^+ \\ -\lambda_{ds-}^- & -\lambda_{qs-}^- & \lambda_{ds+}^+ & \lambda_{qs+}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr+}^+ \\ i_{qr+}^+ \\ i_{dr-}^- \\ i_{qr-}^- \end{bmatrix} \quad (34-3)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{so} \\ P_{s \sin 2} \\ P_{s \cos 2} \end{bmatrix} = \frac{3\omega_s}{2L_s} \begin{bmatrix} -\lambda_{ds+}^+ & -\lambda_{qs+}^+ & \lambda_{ds-}^- & -\lambda_{qs-}^- \\ \lambda_{ds-}^- & \lambda_{qs-}^- & \lambda_{ds+}^+ & \lambda_{qs+}^+ \\ -\lambda_{qs-}^- & \lambda_{ds-}^- & \lambda_{qs+}^+ & -\lambda_{ds+}^+ \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \lambda_{ds+}^+ \\ \lambda_{qs+}^+ \\ \lambda_{ds-}^- \\ \lambda_{qs-}^- \end{bmatrix} - M \begin{bmatrix} i_{dr+}^+ \\ i_{qr+}^+ \\ i_{dr-}^- \\ i_{qr-}^- \end{bmatrix} \right) \quad (35-3)$$

همچنین همانطور در فصل قبل نیز اشاره گردید، توان ورودی از شفت روتور برابر است با مجموع توان خروجی از منابع ولتاژ معادل  $\omega_s \lambda_s$  و  $(\omega_s - \omega_r) \lambda_r$  که مطابق زیر بدست می آید [۱۷]:

$$P_e = -\frac{3}{2} \cdot \text{Re} \left[ j\omega_s \lambda_s^+ I_s^* + j(\omega_s - \omega_r) \lambda_r^+ I_r^+ \right] \quad (36-3)$$

بنابراین با توجه به رابطه فوق داریم:

$$P_e = P_{eo} + P_{e \sin 2} \sin(2\theta_s) + P_{e \cos 2} \cos(2\theta_s) \quad (37-3)$$

به طوریکه:

$$\begin{bmatrix} P_{eo} \\ P_{e \sin 2} \\ P_{e \cos 2} \end{bmatrix} = \frac{3M\omega_r}{2L_s} \begin{bmatrix} -\lambda_{qs+}^+ & \lambda_{ds+}^+ & -\lambda_{qs-}^- & \lambda_{ds-}^- \\ \lambda_{ds-}^- & \lambda_{qs-}^- & -\lambda_{ds+}^+ & -\lambda_{qs+}^+ \\ -\lambda_{qs-}^- & \lambda_{ds-}^- & -\lambda_{qs+}^+ & \lambda_{ds+}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr+}^+ \\ i_{qr+}^+ \\ i_{dr-}^- \\ i_{qr-}^- \end{bmatrix} \quad (38-3)$$

بنابراین در شرایط نامتعادلی ولتاژ، گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور با توجه به توان ورودی از شفت روتور بدست می آید:

$$T_e = \frac{P}{\omega_r} \cdot \frac{P_e}{P} \quad (39-3)$$

بنابراین گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$T_e = T_{eo} + T_{e \sin 2} \sin(2\theta_s) + T_{e \cos 2} \cos(2\theta_s) \quad (40-3)$$

به طوریکه:

$$\begin{bmatrix} T_{eo} \\ T_{e \sin 2} \\ T_{e \cos 2} \end{bmatrix} = \frac{3PM}{4L_s} \begin{bmatrix} -\lambda_{qs+}^+ & \lambda_{ds+}^+ & -\lambda_{qs-}^- & \lambda_{ds-}^- \\ \lambda_{ds-}^- & \lambda_{qs-}^- & -\lambda_{ds+}^+ & -\lambda_{qs+}^+ \\ -\lambda_{qs-}^- & \lambda_{ds-}^- & -\lambda_{qs+}^+ & \lambda_{ds+}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr+}^+ \\ i_{qr+}^+ \\ i_{dr-}^- \\ i_{qr-}^- \end{bmatrix} \quad (41-3)$$

در رابطه فوق  $P$  تعداد قطبهای ماشین می باشد.



با توجه به توان اکتیو استاتور و توان ورودی از شفت روتور، می توان توان اکتیو رد و بدل شده بین روتور و RSC را مطابق زیر بدست آورد:

$$P_r = P_e - P_s = P_{ro} + P_{r\sin 2} \sin(2\theta_s) + P_{r\cos 2} \cos(2\theta_s) \quad (42-3)$$

به طوریکه داریم:

$$\begin{cases} P_{ro} = P_{eo} - P_{so} \\ P_{r\sin 2} = P_{e\sin 2} - P_{s\sin 2} \\ P_{r\cos 2} = P_{e\cos 2} - P_{s\cos 2} \end{cases} \quad (43-3)$$

همانطور که در روابط بدست آمده برای گشتاور و توانهای اکتیو و راکتیو مشاهده می گردد در این روابط جملات سینوسی و کسینوسی ظاهر شده است که فرکانس زاویه ای آنها ۲ برابر فرکانس زاویه شبکه می باشد. بنابراین در شرایط نامتعادلی ولتاژ، با توجه به روابط فوق، وجود نوسانات با دامنه بالا و با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه در گشتاور و توان، اثبات می گردد.

### ۳-۶-۳- مدلسازی مبدل سمت شبکه و خازن DC-Link

در شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه، معادلات ولتاژ توالی مثبت و منفی مبدل سمت شبکه در دستگاه های مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  و منفی  $(dq)^-$  بصورت زیر بدست می آیند [۱۷]:

$$V_{dg+}^+ = r_g i_{dg+}^+ + L_g \frac{di_{dg+}^+}{dt} - \omega_s L_g i_{qg+}^+ + V_{ds+}^+ \quad (44-3)$$

$$V_{qg+}^+ = r_g i_{qg+}^+ + L_g \frac{di_{qg+}^+}{dt} + \omega_s L_g i_{dg+}^+ + V_{qs+}^+ \quad (45-3)$$

$$V_{dg-}^- = r_g i_{dg-}^- + L_g \frac{di_{dg-}^-}{dt} + \omega_s L_g i_{qg-}^- + V_{ds-}^- \quad (46-3)$$

$$V_{qg-}^- = r_g i_{qg-}^- + L_g \frac{di_{qg-}^-}{dt} - \omega_s L_g i_{dg-}^- + V_{qs-}^- \quad (47-3)$$

در معادلات فوق  $r_g$  و  $L_g$  به ترتیب مقاومت و اندوکتانس مدار کوپلینگ بین مبدل سمت شبکه و شبکه می باشند.

در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه، توانهای اکتیو و راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه با صرفنظر کردن از مقاومت  $r_g$ ، در دستگاه  $(dq)^+$  به صورت زیر بیان می شوند.

$$P_g + jQ_g = \frac{3}{2} V_s^+ I_g^{*+} \quad (48-3)$$

به طوریکه:

$$V_s^+ = V_{ds}^+ + jV_{qs}^+ \quad (49-3)$$

$$I_g^{*+} = I_{dg}^+ - jI_{qg}^+ \quad (50-3)$$

بنابراین با جاگذاری مؤلفه های  $dq$  مربوط به توالی مثبت و منفی ولتاژ و جریان در رابطه (3-46)،

توان های اکتیو و راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه به صورت زیر بدست می آیند:

$$\begin{cases} P_g = P_{go} + P_{g\sin 2} \sin(2\theta_g) + P_{g\cos 2} \cos(2\theta_g) \\ Q_g = Q_{go} + Q_{g\sin 2} \sin(2\theta_g) + Q_{g\cos 2} \cos(2\theta_g) \end{cases} \quad (51-3)$$

به طوریکه:

$$\begin{bmatrix} P_{go} \\ P_{g\sin 2} \\ P_{g\cos 2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_{ds+}^+ & V_{qs+}^+ & V_{ds-}^- & V_{qs-}^- \\ V_{qs-}^- & -V_{ds-}^- & -V_{qs+}^+ & V_{ds+}^+ \\ V_{ds-}^- & V_{qs-}^- & V_{ds+}^+ & V_{qs+}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dg+}^+ \\ i_{qg+}^+ \\ i_{dg-}^- \\ i_{qg-}^- \end{bmatrix} \quad (52-3)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{go} \\ Q_{g\sin 2} \\ Q_{g\cos 2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_{qs+}^+ & -V_{ds+}^+ & V_{qs-}^- & -V_{ds-}^- \\ -V_{ds-}^- & -V_{qs-}^- & V_{ds+}^+ & V_{qs+}^+ \\ V_{qs-}^- & -V_{ds-}^- & V_{qs+}^+ & -V_{ds+}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dg+}^+ \\ i_{qg+}^+ \\ i_{dg-}^- \\ i_{qg-}^- \end{bmatrix} \quad (53-3)$$

در معادلات فوق  $\theta_g$  زاویه بین محور  $d$  دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$  و محور  $\alpha$  دستگاه مرجع ساکن

$\alpha\beta$  می باشد به طوریکه محور  $d$  دستگاه مذکور که برای مدلسازی و کنترل مبدل سمت شبکه به کار

برده می شود در راستای بردار ولتاژ توالی مثبت استاتور می باشد.

همچنین ولتاژ خازن DC Link نیز بصورت زیر بدست می آید:

$$C \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} \cdot V_{dc} = P_r - P_g = P_e - P_s - P_g \quad (54-3)$$

همانطور که در روابط بدست آمده برای توانهای اکتیو و راکتیو خروجی از مبدل مشاهده می گردد، در این روابط، جملات سینوسی و کسینوسی ظاهر شده است که فرکانس زاویه ای آنها ۲ برابر فرکانس زاویه شبکه می باشد. بنابراین با توجه به این نوسانات و نیز با توجه به روابط (۳-۴۰) و (۳-۵۲)، در ولتاژ خازن DC-Link نیز ریپل هایی با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه، ایجاد می شود.

### ۳-۷- کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوپل در شرایط نامتعادلی ولتاژ

در شرایط نامتعادلی ولتاژ، علاوه بر اهدافی که در فصل قبل برای کنترل مبدل های سمت روتور و شبکه در نظر گرفته شد، بایستی جریانهای توالی منفی روتور و نیز جریانهای توالی منفی خروجی از مبدل سمت شبکه توسط مبدلهای مذکور به نحوی کنترل گردند که رفتار DFIG را در این شرایط بهبود یابد. به طوریکه در شرایط نامتعادل، اهداف اصلی کنترلی با کنترل مؤلفه های توالی مثبت ولتاژ و جریان در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$  برآورده می شوند و نیز با کنترل مؤلفه های توالی منفی ولتاژ و جریان در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$ ، با توجه به اهداف کنترلی در نظر گرفته شده برای مبدل ها در این شرایط، رفتار DFIG بهبود می یابد.

### ۳-۷-۱- کنترل RSC

وظیفه اصلی این مبدل در شرایط متعادل، تغذیه سیم پیچ های روتور است به نحوی که حداکثر توان مکانیکی از توربین باد دریافت گردد و در عین حال توان راکتیو خروجی از استاتور ماشین به صورت کاملاً مستقل از گشتاور الکترومغناطیسی کنترل شود. ولی در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه علاوه بر وظایف فوق، این مبدل، بایستی با توجه به اهداف کنترلی که در این شرایط برای آن تعریف می گردد، سیم پیچ روتور را تغذیه نماید. برای رسیدن به اهداف فوق، مؤلفه های توالی مثبت و منفی ولتاژ و جریان روتور در ۲ دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  و منفی  $(dq)^-$  کنترل می شوند. به طوریکه اهداف اصلی کنترلی، با کنترل مؤلفه های توالی مثبت ولتاژ و جریان روتور در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$  و اهداف دیگر برای بهبود رفتار DFIG، با کنترل مؤلفه های توالی منفی ولتاژ و

جریان روتور در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$ ، بر آورده می‌گردند. حال با توجه به اینکه محور  $d$  دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$ ، می‌تواند در راستای بردار شار توالی مثبت و یا بردار ولتاژ توالی مثبت استاتور قرار بگیرد بنابراین در این بخش نیز مانند فصل قبل، در خصوص کنترل RSC در این دستگاه‌ها بحث می‌گردد.

### ۳-۷-۱-۱- کنترل RSC در دستگاه مرجع همراستا با بردار شار توالی مثبت استاتور

در دستگاه مرجع همراستا با بردار شار توالی مثبت استاتور، محور  $d$  دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$  در راستای بردار شار توالی مثبت استاتور قرار دارد به طوری که زاویه بین محور  $d$  دستگاه مذکور و محور  $\alpha$  دستگاه مرجع ساکن  $\alpha\beta$ ،  $\theta_s$  می‌باشد و از طرفی زاویه بین محور  $d$  دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$  و محور  $\alpha$  دستگاه مرجع ساکن  $\alpha\beta$ ،  $-\theta_s$  خواهد بود. بنابراین برای تعیین موقعیت بردار شار توالی مثبت استاتور، زاویه  $\theta_s$ ، کافی است مؤلفه‌های  $\alpha\beta$  شار توالی مثبت محاسبه گردند و با توجه به مقادیر آنها در هر لحظه، زاویه  $\theta_s$  بدست می‌آید به طوری که داریم:

$$\begin{cases} \lambda_{as+} = \int (V_{as+} - r_s i_{as+}) dt \\ \lambda_{\beta s+} = \int (V_{\beta s+} - r_s i_{\beta s+}) dt \end{cases} \Rightarrow \theta_s = \tan^{-1} \left( \frac{\lambda_{\beta s+}}{\lambda_{as+}} \right) \quad (۵۵-۳)$$

بنابراین تحت این شرایط در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$ ،  $\lambda_{ds+}$  همواره مقداری ثابت و  $\lambda_{qs+}$  نیز صفر خواهد شد و همانطور که در فصل قبل در زمینه کنترل DFIG در شرایط متعادل، بحث گردید تحت این شرایط برای دریافت حداکثر توان مکانیکی از انرژی باد توسط توربین باد، گشتاور الکترومغناطیسی مرجع مشخص و با توجه به آن جریان مرجع  $i_{qr+}^{+*}$  تعیین می‌گردد و از طرفی با توجه به مقدار توان راکتیو خروجی استاتور، جریان مرجع  $i_{dr+}^{+*}$  نیز بدست خواهد آمد.

اما همانطور که اشاره شد در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه علاوه بر اهداف کنترلی اصلی، می‌توان برای کنترل مؤلفه‌های توالی منفی ولتاژ و جریان روتور در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$  نیز اهداف خاصی را در نظر گرفت که البته برآورده کردن تمام این اهداف کنترلی به طور همزمان، غیر ممکن می‌باشد و فقط می‌توان یکی از این اهداف را بر حسب نیاز و شرایط، مد نظر قرار داد. اهداف کنترلی

RSC برای کنترل مؤلفه های توالی منفی ولتاژ و جریان روتور در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$  در شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه، شامل موارد ذیل می باشد [۲۵].

### ۱- از بین بردن نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی:

همانطور که اشاره شد با توجه به رابطه (۳-۴۰)، گشتاور الکترومغناطیسی دارای نوساناتی سینوسی با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه می باشد که این گشتاور نوسانی، تنشهای مکانیکی شدیدی را در پره های توربین و شفت روتور و گیربکس بوجود می آورد. برای به حداقل رساندن این نوسانات، مؤلفه های توالی منفی ولتاژ و جریان روتور در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$  کنترل می گردند. برای از بین بردن اثر گشتاور نوسانی با توجه به رابطه (۳-۴۰) کافی است که جملات سینوسی و کسینوسی گشتاور الکترومغناطیسی، صفر گردند.

$$\begin{cases} T_{e\sin 2} = 0 \\ T_{e\cos 2} = 0 \end{cases} \quad (۳-۵۶)$$

بنابراین تحت این شرایط جریانهای مرجع  $i_{dr}^{-*}$  و  $i_{qr}^{-*}$  به صورت زیر بدست خواهند آمد:

$$\begin{cases} i_{dr}^{-*} = \frac{\lambda_{ds-}^-}{\lambda_{ds+}^+} i_{dr+}^+ + \frac{\lambda_{qs-}^-}{\lambda_{ds+}^+} i_{qr+}^+ \\ i_{qr}^{-*} = \frac{\lambda_{qs-}^-}{\lambda_{ds+}^+} i_{dr+}^+ - \frac{\lambda_{ds-}^-}{\lambda_{ds+}^+} i_{qr+}^+ \end{cases} \quad (۳-۵۷)$$

از طرفی با توجه به رابطه (۳-۳۴)، به ازای جریانهای مرجع بدست آمده در رابطه فوق، علاوه بر حذف نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی، نوسانات بوجود آمده در توان راکتیو خروجی از استاتور نیز حذف می گردند.

### ۲- از بین بردن نوسانات توان اکتیو خروجی از استاتور:

همچنین با توجه به رابطه (۳-۳۰)، مشاهده می گردد که نوساناتی با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه در توان اکتیو خروجی از استاتور، ظاهر می گردند که برای از بین بردن این نوسانات کافی است با توجه به رابطه (۳-۳۵) جملات سینوسی و کسینوسی توان اکتیو خروجی از استاتور، صفر گردند.

$$\begin{cases} P_{s\sin 2} = 0 \\ P_{s\cos 2} = 0 \end{cases} \quad (58-3)$$

تحت این شرایط جریانهای مرجع  $i_{dr}^{-*}$  و  $i_{qr}^{-*}$  بدست خواهند آمد:

$$\begin{cases} i_{dr}^{-*} = \frac{2\lambda_{ds-}^-}{L_m} - \frac{\lambda_{ds-}^-}{\lambda_{ds+}^+} i_{dr+}^+ - \frac{\lambda_{qs-}^-}{\lambda_{ds+}^+} i_{qr+}^+ \\ i_{qr}^{-*} = \frac{2\lambda_{qs-}^-}{L_m} - \frac{\lambda_{qs-}^-}{\lambda_{ds+}^+} i_{dr+}^+ + \frac{\lambda_{ds-}^-}{\lambda_{ds+}^+} i_{qr+}^+ \end{cases} \quad (59-3)$$

### ۳- متعادل کردن جریان استاتور:

وجود مؤلفه توالی منفی جریان در جریان استاتور باعث نامتعادل شدن جریان استاتور می‌گردد. بنابراین برای متعادل کردن جریان استاتور بایستی جریان های توالی منفی روتور طوری کنترل گردند که جریانهای توالی منفی استاتور صفر گردند به طوریکه با توجه به رابطه (۲۳-۳) و (۲۴-۳)، جریانهای مرجع  $i_{dr}^{-*}$  و  $i_{qr}^{-*}$  برای رسیدن به این هدف، بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{cases} i_{dr}^{-*} = \frac{\lambda_{ds-}^-}{L_m} \\ i_{qr}^{-*} = \frac{\lambda_{qs-}^-}{L_m} \end{cases} \quad (60-3)$$

### ۴- ارزیابی بردن نوسانات جریان روتور:

تحت شرایط ولتاژ نامتعادل شبکه، جریان روتور نیز دارای مؤلفه های توالی مثبت و منفی می‌باشد به طوریکه فرکانس جریانهای توالی مثبت و منفی با یکدیگر متفاوت می‌باشند. فرکانس جریان توالی مثبت روتور مانند شرایط متعادل برابر با فرکانس لغزش می‌باشد بنابراین برای شرایط کاری در بالای سرعت سنکرون، فرکانس این جریان  $(\omega_r - \omega_s)$  می‌باشد. ولی با توجه به اینکه میدان گردان ناشی از جریانهای توالی منفی استاتور در خلاف جهت میدان گردان اصلی و با سرعت  $\omega_s -$  می‌چرخد بنابراین فرکانس جریان توالی منفی روتور،  $(\omega_r + \omega_s)$  می‌باشد.

حال با توجه به اینکه دامنه جریان توالی مثبت روتور نسبت به دامنه جریان توالی منفی آن قابل ملاحظه می باشد بنابراین جریان توالی مثبت به عنوان مؤلفه اصلی جریان روتور ظاهر می گردد و جریان توالی منفی نیز بر روی آن نوسان می کند. برای از بین بردن نوسانات جریان روتور بایستی جریان های توالی منفی روتور حذف گردند که تحت این شرایط جریانهای مرجع  $i_{dr}^{-*}$  و  $i_{qr}^{-*}$  به سادگی و بصورت زیر تعریف می گردند:

$$\begin{cases} i_{dr}^{-*} = 0 \\ i_{qr}^{-*} = 0 \end{cases} \quad (61-3)$$

### ۳-۷-۱-۲- کنترل RSC در دستگاه مرجع همراستا با بردار ولتاژ توالی مثبت استاتور

در دستگاه مرجع همراستا با بردار ولتاژ توالی مثبت استاتور، محور d دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$  در راستای بردار ولتاژ توالی مثبت استاتور قرار دارد به طوریکه زاویه بین محور d دستگاه مذکور و محور  $\alpha$  دستگاه مرجع ساکن  $\alpha\beta$ ،  $\theta_s$  می باشد و از طرفی زاویه بین محور d دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$  و محور  $\alpha$  دستگاه مرجع ساکن  $\alpha\beta$ ،  $-\theta_s$  خواهد بود. تحت این شرایط در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$ ،  $V_{ds}^+$  همواره مقداری ثابت و  $V_{qs}^+$  نیز صفر خواهد شد. بنابراین برای تعیین زاویه  $\theta_s$ ، بایستی موقعیت بردار ولتاژ توالی مثبت استاتور تعیین گردد که برای این منظور لازم است مؤلفه های  $\alpha\beta$  ولتاژ توالی مثبت محاسبه گردند و با توجه به مقادیر لحظه ای آنها، زاویه  $\theta_s$  در هر لحظه بدست خواهد آمد، به طوریکه داریم:

$$\theta_g = \tan^{-1} \left( \frac{V_{\beta s^+}}{V_{\alpha s^+}} \right) \quad (62-3)$$

در این دستگاه، جریانهای مرجع  $i_{dr}^{+*}$  و  $i_{qr}^{+*}$  نسبت به جریانهای مرجع بدست آمده در دستگاه مرجع همراستا با شار استاتور متفاوت می باشند. از آنجاییکه اهداف مورد نظر برای کنترل مبدل سمت روتور در شرایط متعادل را می توان با کنترل مؤلفه های توالی مثبت جریان روتور در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$  بدست آورد بنابراین با توجه به مباحث فصل قبل در زمینه کنترل DFIG در

شرایط متعادل، مقادیر جریانهای مرجع  $i_{dr}^{+*}$  و  $i_{qr}^{+*}$  نیز بدست خواهند آمد. به طوریکه با توجه به حداکثر توان مکانیکی دریافتی از انرژی باد توسط توربین باد، گشتاور الکترومغناطیسی مرجع تعیین می گردد و با توجه به آن، جریان مرجع  $i_{dr}^{+*}$  بدست می آید و از طرفی نیز با توجه به مقدار توان راکتیو خروجی استاتور، جریان مرجع  $i_{qr}^{+*}$  بدست خواهد آمد.

جریانهای مرجع توالی منفی روتور  $i_{dr}^{-*}$  و  $i_{qr}^{-*}$ ، برای از بین بردن نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی و توان اکتیو خروجی از استاتور، نیز در این دستگاه، نسبت به دستگاه مرجع همراستا با بردار شار توالی مثبت استاتور متفاوت می باشند. به طوریکه مقادیر جریان مرجع برای رسیدن به هر یک از اهداف مذکور، بصورت زیر بدست می آیند.

### ۱- از بین بردن نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی:

$$\begin{cases} i_{dr}^{-*} = \frac{V_{ds-}^-}{V_{ds+}^+} i_{dr+}^+ + \frac{V_{qs-}^-}{V_{ds+}^+} i_{qr+}^+ \\ i_{qr}^{-*} = \frac{V_{qs-}^-}{V_{ds+}^+} i_{dr+}^+ - \frac{V_{ds-}^-}{V_{ds+}^+} i_{qr+}^+ \end{cases} \quad (۶۳-۳)$$

### ۲- از بین بردن نوسانات توان اکتیو خروجی از استاتور:

$$\begin{cases} i_{ds}^{-*} = -\frac{V_{ds-}^-}{V_{ds+}^+} i_{ds+}^+ - \frac{V_{qs-}^-}{V_{ds+}^+} i_{qs+}^+ \\ i_{qs}^{-*} = -\frac{V_{qs-}^-}{V_{ds+}^+} i_{ds+}^+ + \frac{V_{ds-}^-}{V_{ds+}^+} i_{qs+}^+ \end{cases} \quad (۶۴-۳)$$

به طوریکه جریانهای مرجع توالی منفی روتور  $i_{dr}^{-*}$  و  $i_{qr}^{-*}$  نیز با توجه به روابط (۶۳-۳) و (۶۴-۳) و (۲۴) بدست خواهند آمد.

### ۳-۱-۷-۳- طراحی کنترلر جریان

پس از تعیین جریانهای مرجع  $i_{dr}^{+*}$ ،  $i_{qr}^{+*}$ ،  $i_{dr}^{-*}$  و  $i_{qr}^{-*}$ ، جریانهای dq توالی مثبت و منفی روتور باید به گونه ای کنترل گردند تا برابر با مقادیر جریانهای مرجع متناظر خود گردند. به طوریکه برای



طراحی کنترلر مبدل سمت روتور از معادلات ولتاژ روتور در دستگاههای مرجع  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$  استفاده می گردد [۲۳].

معادلات ولتاژ روتور  $(۱۳-۳)$ ،  $(۱۴-۳)$ ،  $(۲۱-۳)$  و  $(۲۲-۳)$ ، اساس طراحی کنترلرهای جریان های توالی مثبت و منفی روتور را تشکیل می دهند. به طوریکه با جاگذاری روابط  $(۱۷-۳)$  و  $(۱۸-۳)$  در معادلات ولتاژ توالی مثبت روتور در دستگاه مرجع  $(dq)^+$ ، معادلات مربوطه به صورت زیر بدست می آیند:

$$V_{dr+}^+ = \sigma L_r \frac{di_{dr+}^+}{dt} + r_r i_{dr+}^+ - s\omega_s \sigma L_r i_{qr+}^+ - s\omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{qs+}^+ \quad (۶۵-۳)$$

$$V_{qr+}^+ = \sigma L_r \frac{di_{qr+}^+}{dt} + r_r i_{qr+}^+ + s\omega_s \sigma L_r i_{dr+}^+ + s\omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{ds+}^+ \quad (۶۶-۳)$$

همچنین با جاگذاری روابط  $(۲۵-۳)$  و  $(۲۶-۳)$  در معادلات ولتاژ توالی منفی روتور در دستگاه مرجع  $(dq)^-$ ، این معادلات نیز به صورت زیر بدست می آیند:

$$V_{dr-}^- = \sigma L_r \frac{di_{dr-}^-}{dt} + r_r i_{dr-}^- + (\omega_s + \omega_r) \sigma L_r i_{qr-}^- + (\omega_s + \omega_r) \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{qs-}^- \quad (۶۷-۳)$$

$$V_{qr-}^- = \sigma L_r \frac{di_{qr-}^-}{dt} + r_r i_{qr-}^- + (\omega_s + \omega_r) \sigma L_r i_{dr-}^- + (\omega_s + \omega_r) \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{ds-}^- \quad (۶۸-۳)$$

حال مشابه طراحی کنترلرها در شرایط متعادل، با توجه به روابط  $(۶۵-۳)$  -  $(۶۶-۳)$ ، می توان روابط مربوط به کنترلرهای جریان را بدست آورد. به طوریکه با توجه به روابط  $(۶۵-۳)$  و  $(۶۶-۳)$ ، روابط زیر برای طراحی کنترلرهای جریان توالی مثبت روتور در دستگاه مرجع  $(dq)^+$ ، در نظر گرفته می شوند:

$$V_{dr+}^+ = \sigma L_r V_{dr+}^+ + r_r i_{dr+}^+ - s\omega_s \sigma L_r i_{qr+}^+ - s\omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{qs+}^+ \quad (۶۹-۳)$$

$$V_{qr+}^+ = \sigma L_r V_{qr+}^+ + r_r i_{qr+}^+ + s\omega_s \sigma L_r i_{dr+}^+ + s\omega_s \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{ds+}^+ \quad (۷۰-۳)$$

در روابط فوق ولتاژهای کنترلی  $V_{dr+}^{+'}$  و  $V_{qr+}^{+'}$ ، با استفاده از کنترلر های PI و با مقایسه جریانهای  $i_{qr+}^+$  و  $i_{dr+}^+$  بدست آمده با مقادیر مرجع  $i_{qr+}^{+*}$ ،  $i_{dr+}^{+*}$ ، مطابق زیر بدست می آیند:

$$V_{dr+}' = \frac{di_{dr+}^+}{dt} = K_{p1} (i_{dr+}^{+*} - i_{dr+}^+) + K_{i1} \int (i_{dr+}^{+*} - i_{dr+}^+) dt \quad (71-3)$$

$$V_{qr+}' = \frac{di_{qr+}^+}{dt} = K_{p1} (i_{qr+}^{+*} - i_{qr+}^+) + K_{i1} \int (i_{qr+}^{+*} - i_{qr+}^+) dt \quad (72-3)$$

در روابط فوق ضرایب  $K_{p1}$  و  $K_{i1}$  به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالگیر کنترلر PI می باشند.

همچنین با توجه به روابط (۶۷-۳) و (۶۸-۳)، روابط زیر برای طراحی کنترلرهای جریان توالی منفی

روتور در دستگاه مرجع  $(dq)^-$ ، در نظر گرفته می شوند:

$$V_{dr-}' = \sigma L_r V_{dr-}' + r_r i_{dr-}' + (\omega_s + \omega_r) \sigma L_r i_{qr-}' + (\omega_s + \omega_r) \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{qs-}' \quad (73-3)$$

$$V_{qr-}' = \sigma L_r V_{qr-}' + r_r i_{qr-}' + (\omega_s + \omega_r) \sigma L_r i_{dr-}' + (\omega_s + \omega_r) \left( \frac{L_m}{L_s} \right) \lambda_{ds-}' \quad (74-3)$$

ولتاژهای کنترلی  $V_{dr-}'$  و  $V_{qr-}'$ ، نیز با استفاده از کنترلر های PI و با مقایسه جریانهای  $i_{dr-}'$  و  $i_{qr-}'$

بدست آمده با مقادیر مرجع  $i_{dr-}^{*-}$  و  $i_{qr-}^{*-}$ ، مطابق زیر بدست می آیند:

$$V_{dr-}' = \frac{di_{dr-}'}{dt} = K_{p2} (i_{dr-}^{*-} - i_{dr-}') + K_{i2} \int (i_{dr-}^{*-} - i_{dr-}') dt \quad (75-3)$$

$$V_{qr-}' = \frac{di_{qr-}'}{dt} = K_{p2} (i_{qr-}^{*-} - i_{qr-}') + K_{i2} \int (i_{qr-}^{*-} - i_{qr-}') dt \quad (76-3)$$

پس از بدست آوردن ولتاژهای مطلوب  $V_{dr+}^+$ ،  $V_{qr+}^+$ ،  $V_{dr-}'$  و  $V_{qr-}'$ ، بایستی ولتاژ های مذکور از

دستگاه dq به دستگاه abc انتقال داده شوند که در اینصورت ولتاژ های سه فاز توالی مثبت و منفی

روتور بدست می آیند. مجموع ولتاژهای توالی مثبت و منفی هر فاز، ولتاژ آن فاز را نتیجه می دهد و

در کل مقادیر ولتاژ سه فاز مطلوبی که می بایست برای تغذیه روتور به کار برده شوند، محاسبه می

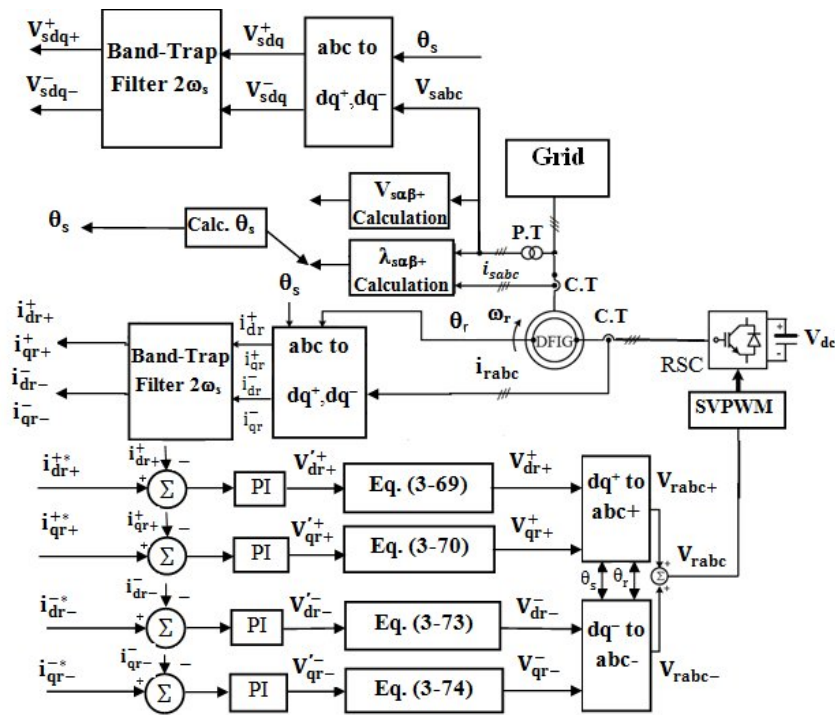
گردد. حال می توان به کمک روشهای سوئیچینگ از قبیل PWM و یا SVPWM ولتاژهای مورد نظر

را در خروجی مبدل سمت روتور برای تغذیه سیم پیچ های روتور ایجاد کرد. در شکل (۴-۳)، بلوک

دیگرام کنترلی مبدل سمت روتور در شرایط نامتعادلی ولتاژ، نشان شده است به طوری که در این بلوک

دیگرام، کلیه مراحل کنترلی که در این بخش تشریح گردید را می توان به صورت واضح مشاهده

نمود.



شکل (۳-۴): بلوک دیاگرام کنترلی RSC در شرایط نامتعادلی ولتاژ

### ۳-۷-۲- کنترل GSC

همانطور که اشاره شد برای رسیدن به اهداف کنترلی مورد نظر مبدل سمت شبکه در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه، بایستی مؤلفه های توالی مثبت و منفی ولتاژ و جریان خروجی از GSC در ۲ دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  و منفی  $(dq)^-$  کنترل گردند. به طوریکه در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه، با کنترل مؤلفه های توالی مثبت ولتاژ و جریان در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$ ، اهداف اصلی کنترلی GSC، برآورده می شوند و با کنترل مؤلفه های توالی منفی ولتاژ و جریان در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$ ، می توان اهداف کنترلی مورد نظر در شرایط نامتعادل را بدست آورد [۱۷] و [۲۶].

باتوجه به اینکه یکی از وظایف اصلی این مبدل در شرایط متعادل، شارژ ولتاژ خازن DC Link و همچنین تثبیت ولتاژ آن به صورت مستقل از جهت توان رد و بدل شده بین شبکه و سیم پیچ روتور است بنابراین می توان با تنظیم جریان  $i_{dg+}^+$  در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه به این هدف دست یافت.

از طرفی نیز با کنترل جریان  $i_{dg}^+$  در این شرایط، توان راکتیو خروجی از آن بصورت مستقل از توان اکتیو انتقالی بین شبکه و مبدل، کنترل می گردد.

برای کنترل مؤلفه های توانی منفی ولتاژ و جریان در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$ ، می توان اهداف کنترلی خاصی را بر حسب شرایط در نظر گرفت.

### ۳-۷-۲-۱- کنترل GSC برای متعادل کردن جریان کل خروجی از DFIG

در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه، به علت وجود جریان توانی منفی استاتور، جریان استاتور نامتعادل می گردد. همچنین اگر جریان توانی منفی استاتور در شبکه جاری گردد باعث می شود که جریان کل خروجی از DFIG نیز نامتعادل شود. بنابراین برای جلوگیری از جاری شدن جریان توانی منفی استاتور در شبکه، جریان توانی منفی خروجی از GSC باید طوری کنترل گردد که جریان توانی منفی کل خروجی از DFIG که در واقع برآیند جریان توانی منفی استاتور و جریان توانی منفی خروجی از GSC می باشد صفر گردد. بنابراین تحت این شرایط جریان های مرجع  $i_{dg}^{-*}$  و  $i_{qg}^{-*}$  بصورت زیر بدست می آیند:

$$\begin{cases} i_{dg}^{-*} = i_{ds}^- \\ i_{qg}^{-*} = i_{qs}^- \end{cases} \quad (۷۷-۳)$$

نکته بسیار حائز اهمیت در رابطه فوق این است که در صورتی که اگر مؤلفه های جریانی dq استاتور در دستگاه همراستا با شار استاتور بدست آورده شده باشند در این صورت با توجه به اینکه از دستگاه همراستا با ولتاژ استاتور برای مدلسازی و کنترل مبدل سمت شبکه استفاده گردیده است بنابراین در رابطه (۷۷-۳) بایستی مقادیر جریانه های توانی منفی استاتور نیز در دستگاه همراستا با ولتاژ استاتور بدست آورده شوند.

### ۳-۷-۲-۲- کنترل GSC برای از بین بردن نوسانات توان اکتیو کل خروجی

با توجه به شکل (۳-۱)، توان اکتیو کل خروجی از DFIG در واقع مجموع توان های اکتیو خروجی از استاتور و مبدل سمت شبکه می باشد بنابراین داریم:

$$P_{total} = P_s + P_g \quad (۷۸-۳)$$

از طرفی با توجه به روابط (۳۰-۳) و (۵۱-۳)، بعلت وجود نوسانات با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه در توان های اکتیو خروجی از استاتور و مبدل سمت شبکه، می توان نتیجه گرفت که توان اکتیو کل خروجی از DFIG نیز دارای نوساناتی با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه می باشد. بنابراین برای از بین بردن نوسانات توان اکتیو کل خروجی، کافی است که نوسانات توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه، نوسانات متناظر با خود در توان اکتیو خروجی استاتور را خنثی سازند [۱۷]. با توجه به این امر، جریان های مرجع  $i_{dg}^{-*}$  و  $i_{qg}^{-*}$  محاسبه می گردند.

حال با توجه به اینکه برای کنترل و مدلسازی مبدل سمت روتور و ماشین می توان از ۲ دستگاه همراستا با شار استاتور و یا دستگاه همراستا با ولتاژ استاتور استفاده کرد بنابراین ۲ حالت برای بدست آوردن جریان های مرجع  $i_{dg}^{-*}$  و  $i_{qg}^{-*}$  بوجود می آید که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می شود.

### ۳-۷-۲-۲-۱- کنترل RSC و GSC به ترتیب در دستگاه همراستا با شار و ولتاژ

#### استاتور

در این شرایط با توجه به اینکه برای کنترل و مدلسازی مبدل سمت روتور و ماشین از دستگاه همراستا با بردار شار توالی مثبت استاتور استفاده می گردد و نیز از دستگاه همراستا با بردار ولتاژ توالی مثبت استاتور برای کنترل مبدل سمت شبکه استفاده می گردد بنابراین بین زاویه  $\theta_s$  و  $\theta_g$ ، با توجه به اختلاف فاز تقریبی ۹۰ درجه بین ولتاژ و شار استاتور، اختلاف زاویه ۹۰ درجه وجود دارد، به طوریکه داریم:

$$\theta_g = \theta_s + \frac{\pi}{2} \quad (۷۹-۳)$$

بنابراین با توجه به روابط (۳۰-۳)، (۵۱-۳)، (۷۸-۳) و (۷۹-۳)، توان اکتیو کل خروجی از DFIG بصورت زیر بدست می آید:

$$P_{total} = (P_{so} + P_{go}) + (P_{g\sin 2} - P_{s\sin 2})\sin(2\theta_g) + (P_{g\cos 2} - P_{s\cos 2})\cos(2\theta_g) \quad (۸۰-۳)$$

از طرفی با توجه به روابط (۳-۵۴) و (۳-۷۹)، ولتاژ خازن DC-Link نیز بصورت زیر بدست می آید:

$$C \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} \cdot V_{dc} = (P_{eo} - P_{so} - P_{go}) + (-P_{esin2} + P_{ssin2} - P_{gsin2}) \cdot \sin(2\theta_g) + (-P_{ecos2} + P_{scos2} - P_{gcos2}) \cdot \cos(2\theta_g) \quad (۳-۸۱)$$

بنابراین تحت این شرایط برای از بین بردن نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG بایستی بین

نوسانات توان های اکتیو خروجی از استاتور و مبدل سمت شبکه رابطه زیر برقرار باشد:

$$\begin{cases} P_{gsin2} = P_{ssin2} \\ P_{gcos2} = P_{scos2} \end{cases} \quad (۳-۸۲)$$

بنابراین با توجه به روابط (۳-۳۵)، (۳-۵۲) و (۳-۸۲) جریان های مرجع های  $i_{dg}^{-*}$  و  $i_{qg}^{-*}$  بصورت

زیر تعریف می گردند [۱۷]:

$$\begin{cases} i_{dg}^{-*} = \frac{2 P_{scos2}}{3 V_{ds+}^+} - \frac{V_{ds-}^-}{V_{ds+}^+} i_{dg+}^+ - \frac{V_{qs-}^-}{V_{ds+}^+} i_{qg+}^+ \\ i_{qg}^{-*} = \frac{2 P_{ssin2}}{3 V_{ds+}^+} - \frac{V_{qs-}^-}{V_{ds+}^+} i_{dg+}^+ - \frac{V_{ds-}^-}{V_{ds+}^+} i_{qg+}^+ \end{cases} \quad (۳-۸۳)$$

تحت این شرایط با توجه به اینکه نوسانات توان های اکتیو خروجی از استاتور و مبدل سمت شبکه،

یکدیگر را خنثی می سازند و از طرفی نیز نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی با کنترل مبدل سمت

روتور از بین رفته اند، بنابراین با توجه به رابطه (۳-۸۱)، ولتاژ خازن DC-Link نیز هیچگونه رپلی

نخواهد داشت.

### ۳-۷-۲-۲-۲-۲- کنترل RSC و GSC در دستگاه همراستا ولتاژ استاتور

در این حالت با توجه به اینکه از یک دستگاه برای کنترل و مدلسازی مبدل ها و ماشین استفاده می

گردد بنابراین بین زاویه  $\theta_s$  و  $\theta_g$ ، هیچگونه اختلاف زاویه ای بوجود نمی آید، به طوریکه داریم:

$$\theta_g = \theta_s \quad (۳-۸۴)$$

با توجه به روابط (۳-۳۰)، (۳-۵۱)، (۳-۷۸) و (۳-۸۴)، توان اکتیو کل خروجی از DFIG بصورت زیر

بدست می آید:

$$P_{total} = (P_{so} + P_{go}) + (P_{g\sin 2} + P_{s\sin 2})\sin(2\theta_g) + (P_{g\cos 2} + P_{s\cos 2})\cos(2\theta_g) \quad (۸۵-۳)$$

همچنین ولتاژ خازن DC Link نیز با توجه به روابط (۳-۵۴) و (۳-۸۴)، بصورت زیر بدست می آید:

$$C \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} \cdot V_{dc} = (P_{co} - P_{so} - P_{go}) + (P_{e\sin 2} - P_{s\sin 2} - P_{g\sin 2}) \cdot \sin(2\theta_g) + (P_{e\cos 2} - P_{s\cos 2} - P_{g\cos 2}) \cdot \cos(2\theta_g) \quad (۸۶-۳)$$

تحت این شرایط برای از بین بردن نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG بایستی بین نوسانات توان های اکتیو خروجی از استاور و مبدل سمت شبکه رابطه زیر برقرار باشد:

$$\begin{cases} P_{g\sin 2} = -P_{s\sin 2} \\ P_{g\cos 2} = -P_{s\cos 2} \end{cases} \quad (۸۷-۳)$$

با توجه به روابط (۳-۳۵)، (۳-۵۲) و (۳-۸۷)، جریان های مرجع های مرجع  $i_{dg}^{-*}$  و  $i_{qg}^{-*}$  بصورت زیر تعریف گردند:

$$\begin{cases} i_{dg}^{-*} = -\frac{2}{3} \frac{P_{s\cos 2}}{V_{ds+}^+} - \frac{V_{ds-}^-}{V_{ds+}^+} i_{dg+}^+ - \frac{V_{qs-}^-}{V_{ds+}^+} i_{qg+}^+ \\ i_{qg}^{-*} = -\frac{2}{3} \frac{P_{s\sin 2}}{V_{ds+}^+} - \frac{V_{qs-}^-}{V_{ds+}^+} i_{dg+}^+ + \frac{V_{ds-}^-}{V_{ds+}^+} i_{qg+}^+ \end{cases} \quad (۸۸-۳)$$

در اینجا نیز با توجه به جریانهای مرجع بدست آمده، ولتاژ خازن DC-Link هیچگونه رپلی نخواهد داشت.

### ۳-۲-۷-۳- طراحی کنترلر جریان

در اینجا نیز مشابه با طراحی کنترلر جریان برای مبدل سمت روتور، پس از تعیین جریانهای مرجع  $i_{dg}^{-*}$ ،  $i_{qg}^{-*}$ ،  $i_{dg+}^{+*}$ ،  $i_{qg+}^{+*}$  و منفی توالی مثبت و منفی خروجی از مبدل سمت شبکه به کمک کنترلر تنظیم می گردند تا برابر با مقادیر جریانهای مرجع متناظر خود گردند. برای طراحی کنترلر مبدل سمت شبکه از معادلات ولتاژ این مبدل در دستگاههای مرجع  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$  استفاده می گردد.

به طوریکه با توجه به روابط (۳-۴۴) و (۳-۴۵)، روابط زیر برای طراحی کنترلرهای جریان توالی مثبت مبدل سمت شبکه در دستگاه مرجع  $(dq)^+$ ، در نظر گرفته می شوند:

$$V_{dg+}^+ = L_g V_{dg+}' + r_g i_{dg+}^+ - \omega_s L_g i_{qg+}^+ + V_{ds+}^+ \quad (۳-۸۹)$$

$$V_{qg+}^+ = L_g V_{qg+}' + r_g i_{qg+}^+ + \omega_s L_g i_{dg+}^+ + V_{qs+}^+ \quad (۳-۹۰)$$

در روابط فوق ولتاژهای کنترلی  $V_{dg+}'$  و  $V_{qg+}'$ ، با استفاده از کنترلر های PI و با مقایسه جریانهای  $i_{qg+}^+$ ،  $i_{dg+}^+$  بدست آمده با مقادیر مرجع  $i_{qg+}^{+*}$ ،  $i_{dg+}^{+*}$ ، مطابق زیر بدست می آیند:

$$V_{dg+}' = \frac{di_{dg+}^+}{dt} = K_{p3} (i_{dg+}^{+*} - i_{dg+}^+) + K_{i3} \int (i_{dg+}^{+*} - i_{dg+}^+) dt \quad (۳-۹۱)$$

$$V_{qg+}' = \frac{di_{qg+}^+}{dt} = K_{p3} (i_{qg+}^{+*} - i_{qg+}^+) + K_{i3} \int (i_{qg+}^{+*} - i_{qg+}^+) dt \quad (۳-۹۲)$$

در روابط فوق ضرایب  $K_{p3}$  و  $K_{i3}$  به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالگیر کنترلر PI می باشند.

همچنین با توجه به روابط (۳-۴۶) و (۳-۴۷)، روابط زیر برای طراحی کنترلرهای جریان توالی مثبت مبدل سمت شبکه در دستگاه مرجع  $(dq)^-$ ، در نظر گرفته می شوند:

$$V_{dg-}^- = L_g V_{dg-}' + r_g i_{dg-}^- + \omega_s L_g i_{qg-}^- + V_{ds-}^- \quad (۳-۹۳)$$

$$V_{qg-}^- = L_g V_{qg-}' + r_g i_{qg-}^- - \omega_s L_g i_{dg-}^- + V_{qs-}^- \quad (۳-۹۴)$$

در روابط فوق نیز ولتاژهای کنترلی  $V_{dg-}'$  و  $V_{qg-}'$ ، با استفاده از کنترلر های PI و با مقایسه جریانهای  $i_{qg-}^-$  و  $i_{dg-}^-$  بدست آمده با مقادیر مرجع  $i_{qg-}^{-*}$  و  $i_{dg-}^{-*}$ ، مطابق زیر بدست می آیند:

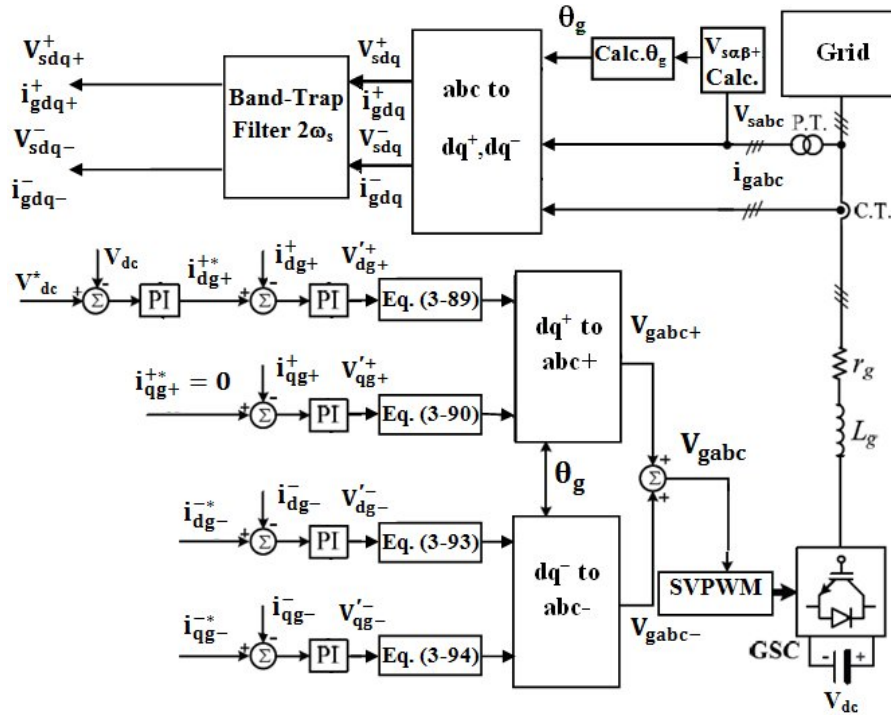
$$V_{dg-}' = \frac{di_{dg-}^-}{dt} = K_{p4} (i_{dg-}^{-*} - i_{dg-}^-) + K_{i4} \int (i_{dg-}^{-*} - i_{dg-}^-) dt \quad (۳-۹۵)$$

$$V_{qg-}' = \frac{di_{qg-}^-}{dt} = K_{p4} (i_{qg-}^{-*} - i_{qg-}^-) + K_{i4} \int (i_{qg-}^{-*} - i_{qg-}^-) dt \quad (۳-۹۶)$$

حال پس از اینکه ولتاژهای مطلوب  $V_{dr+}$ ،  $V_{qr+}$ ،  $V_{dr-}$  و  $V_{qr-}$ ، تعیین گردیدند بایستی ولتاژهای مذکور از دستگاه dq به دستگاه abc انتقال داده شوند. در اینصورت ولتاژهای سه فاز توالی مثبت و منفی خروجی از مبدل سمت شبکه بدست می آیند. حاصلجمع ولتاژهای توالی مثبت و منفی بدست آمده برای هر فاز، مقادیر مطلوب ولتاژهای سه فاز را که می بایست در خروجی این مبدل ایجاد



گردند، نتیجه می دهد. حال با استفاده از روشهای سوئیچینگ از قبیل PWM و یا SVPWM می توان ولتاژهای مورد نظر را در خروجی مبدل سمت شبکه ایجاد کرد. در شکل (۳-۵)، بلوک دیاگرام کنترلی مبدل سمت شبکه در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه، نشان داده شده است به طوریکه در این بلوک دیاگرام، می توان چگونگی کنترل جریانهای توالی مثبت و منفی خروجی از این مبدل را به صورت واضح مشاهده نمود.



شکل (۳-۵): بلوک دیاگرام کنترلی GSC در شرایط نامتعادلی ولتاژ

# فصل چهارم

شبیه سازی عملکرد و کنترل ژنراتور

القایی تغذیه دابل در شرایط متعادل

#### ۴-۱- مقدمه

در این بخش به کمک شبیه سازی، با اعمال روشهای مختلف کنترلی بر روی مبدل های ژنراتور القایی تغذیه دوپل (KW) ۷/۵ در شرایط متعادل ولتاژ شبکه، رفتار آن مورد بحث و بررسی قرار می گیرد. شبیه سازی مطابق با آنچه که در فصل (۲) اشاره شد با پیاده سازی مدل ژنراتور به همراه کنترل آن، در محیط MATLAB/SIMULINK صورت گرفته است. پارامترهای ژنراتور مورد نظر در جدول (۴-۱) آورده شده است.

همانطور که در فصل (۲) بحث شد برای کنترل مبدل سمت روتور می توان از ۲ دستگاه dq همراستا با بردار شار استاتور و یا دستگاه dq همراستا با بردار ولتاژ استاتور استفاده کرد. از طرفی با توجه به اینکه مبدل سمت شبکه در دستگاه dq همراستا با ولتاژ استاتور کنترل می گردد بنابراین شبیه سازی ها برای ۲ روش کنترل هماهنگ مبدل های سمت شبکه و روتور، مطابق زیر بدست آمده است:

۱- کنترل RSC و GSC به ترتیب در دستگاه های dq همراستا با بردار شار و ولتاژ استاتور

۲- کنترل RSC و GSC در دستگاه dq همراستا با بردار ولتاژ استاتور

جدول (۴-۱): مشخصات مربوط به سیستم DFIG مورد مطالعه

|                                       |                                     |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| توان نامی                             | ۷/۵ (KW)                            |
| ولتاژ نامی استاتور                    | ۲۲۰ (V)                             |
| فرکانس نامی                           | ۶۰ (Hz)                             |
| مقاومت سیم پیچ هر فاز استاتور         | $r_s = 0.0453 \text{ p.u.}$         |
| اندوکتانس ناشی سیم پیچ هر فاز استاتور | $L_{ls} = 0.0775 \text{ p.u.}$      |
| مقاومت سیم پیچ هر فاز روتور           | $r_r = 0.0222 \text{ p.u.}$         |
| اندوکتانس ناشی سیم پیچ هر فاز روتور   | $L_{lr} = 0.0322 \text{ p.u.}$      |
| اندوکتانس متقابل                      | $M = 2/0.42 \text{ p.u.}$           |
| تعداد قطبها                           | $P = 6$                             |
| ثابت اینرسی                           | $H = 3/5 \text{ (Sec)}$             |
| ولتاژ نامی DC-Link                    | $V_{dc} = 450 \text{ (V)}$          |
| مقاومت مدار کوپلینگ بین شبکه و GSC    | $r_g = 0/1 \text{ (}\Omega\text{)}$ |
| اندوکتانس مدار کوپلینگ بین شبکه و GSC | $L_g = 12 \text{ (mH)}$             |
| ظرفیت خازنی DC-Link                   | $C = 2400 \text{ (}\mu\text{F)}$    |

## ۴-۲- کنترل RSC و GSC به ترتیب در دستگاه های dq همراه با بردار

### شار و ولتاژ استاتور

در این روش، مبدل سمت روتور در دستگاه مرجع همراه با بردار شار استاتور کنترل می گردد. همانطور که قبلاً اشاره شده است، در این دستگاه، محور d در راستای بردار شار استاتور می باشد که تحت این شرایط  $\lambda_{ds}$  همواره مقداری ثابت و  $\lambda_{qs}$  صفر می گردد. برای تخمین موقعیت بردار شار استاتور  $\theta_s$  در دستگاه مذکور، بایستی مقادیر شار استاتور  $\lambda_{ds}$  و  $\lambda_{qs}$  در دستگاه مرجع ساکن محاسبه گردند. بنابراین در این دستگاه، با تنظیم جریان  $i_{qr}$  برای کنترل گشتاور و توان اکتیو استاتور و نیز تنظیم جریان  $i_{dr}$  برای کنترل توان راکتیو استاتور، می توان گشتاور و توان اکتیو استاتور را بصورت کاملاً مستقل از توان راکتیو استاتور کنترل کرد. این کنترل مستقل، نتایج مطلوبی را بدنبال دارد به طوریکه می توان با کنترل جریان  $i_{qr}$  سرعت و گشتاور را طوری تنظیم نمود تا ماکزیمم توان از انرژی باد دریافت گردد و از طرفی با تنظیم جریان  $i_{dr}$  توان راکتیو استاتور بدون اینکه تغییری در توان دریافتی از باد صورت گیرد کنترل نمود. از طرفی، کنترل مبدل سمت شبکه در دستگاه مرجع همراه با بردار ولتاژ استاتور پیاده سازی می شود. در این دستگاه محور d دستگاه مرجع در راستای بردار ولتاژ استاتور می باشد که در اینصورت  $V_{ds}$  مقداری ثابت و  $V_{qs}$  صفر خواهد شد. بنابراین، ولتاژ DC-Link با تنظیم جریان  $i_{dg}$  کنترل می گردد و با تنظیم جریان  $i_{qg}$  نیز توان راکتیو خروجی از GSC بصورت مستقل از ولتاژ DC-Link کنترل می گردد. برای بررسی جامع تر این روش کنترلی، رفتار DFIG با لحاظ کردن این روش در شرایط کاری مختلف، شبیه سازی شده است که در ادامه نتایج شبیه سازی بدست آمده برای این شرایط کاری، مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۴-۲-۱- شرایط کاری در بالای سرعت سنکرون

همانگونه که در بخش مربوط به مدلسازی توربین باد در فصل (۲) اشاره شد، با توجه به منحنی  $C_p$  بر حسب  $\lambda$ ، به ازای  $\beta=0$  ماکزیمم مقدار  $C_p$  برابر با  $0.4656$  می باشد و بر طبق آن، مقدار  $\lambda$  برای

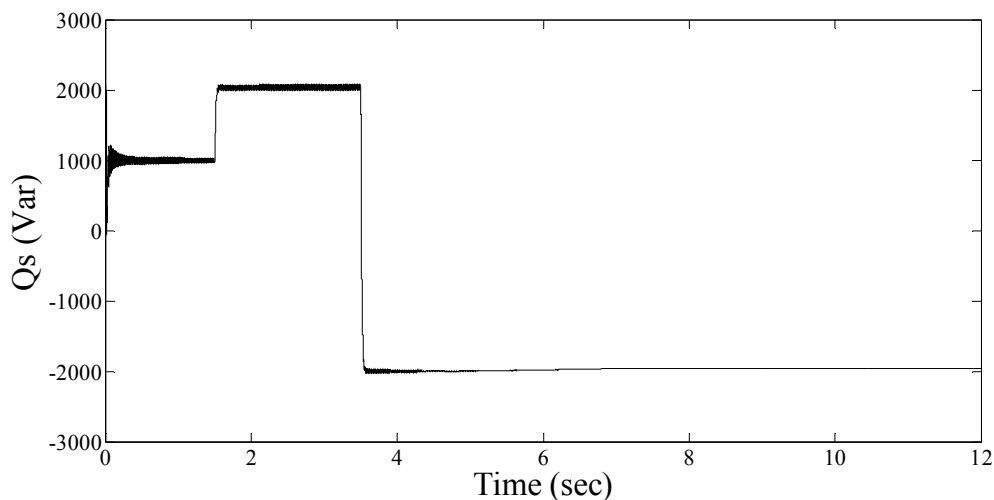
دریافت ماکزیمم توان از باد برابر با  $8/11$  بدست می آید. بنابراین برای یک توربین بادی (KW)  $7/5$ ، در سرعت باد  $10$  (m/s) به عنوان سرعت متوسط باد در یک سایت، شعاع پره های توربین برابر با  $2/8642$  (m) بدست می آید و سرعت چرخشی پره های توربین برای دریافت ماکزیمم توان نیز  $28/3151$  (rad/sec) مکانیکی می شود که معادل با  $270/3893$  (rpm) می باشد. از طرفی برای اینکه سرعت ژنراتور برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد، دارای لغزش  $0/1$  و در بالای سرعت سنکرون باشد بایستی روتور با سرعت  $1320$  (rpm) بچرخد. بنابراین نسبت تبدیل مورد نیاز برای گیربکس برابر با  $4/88$  بدست خواهد آمد.

در این شرایط کاری، مدت زمان اجراء برنامه برای شبیه سازی رفتار DFIG مورد نظر،  $12$  ثانیه می باشد. به طوریکه در ابتدا، گشتاور مرجع برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد برابر با  $54/28$  (Nm) و توان راکتیو مرجع استاتور نیز  $1000$  (Var) در نظر گرفته می شوند. در زمان  $t=1/5$  (sec)، توان راکتیو مرجع استاتور از  $1000$  (Var) به  $2000$  (Var) تغییر می یابد ولی مقدار گشتاور مرجع هیچگونه تغییری نمی یابد. در زمان  $t=3/5$  (sec) توان راکتیو از  $2000$  (Var) به  $-2000$  (Var) تغییر می یابد ولی همچنان مقدار گشتاور مرجع ثابت است تا اینکه در بازه زمانی  $t=5$  (sec) الی  $t=7$  (sec) گشتاور مرجع با شیب  $(54/28-45)/2$  از  $54/28$  (Nm) به  $45$  (Nm) تغییر می یابد. در تمامی مدت زمان شبیه سازی، ولتاژ DC-Link به اندازه  $450$  (V) و توان راکتیو مرجع خروجی از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه نیز، صفر در نظر گرفته شده است. حال با کنترل مبدلهای سمت شبکه و روتور DFIG، برای ایجاد گشتاور و توان های مطلوب مطابق با مقادیر گشتاور و توان های مرجع مورد نظر، به بررسی رفتار آن پرداخته می شود.

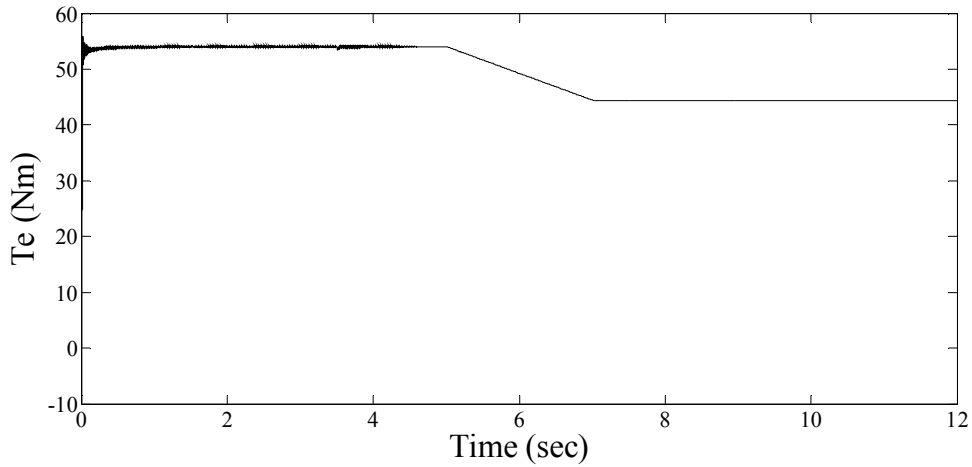
همانطور که در شکل های (۱-۴) و (۲-۴) مشاهده می شود، توان راکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی مطابق با مقادیر مرجعی که برای آنها در نظر گرفته شده است در زمان های مورد نظر تولید شده اند. نکته قابل توجه در این ۲ شکل، ثابت بودن گشتاور در زمان تغییر توان راکتیو استاتور و نیز ثابت بودن توان راکتیو استاتور در حین تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی است که این

نشان دهنده مستقل بودن کنترل گشتاور نسبت به کنترل توان راکتیو استاتور می باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد، در واقع این کنترل مستقل با کنترل جریانهای  $i_{dr}$  و  $i_{qr}$  در دستگاه مرجع  $dq$  همراستا با بردار شار استاتور، بدست می آید.

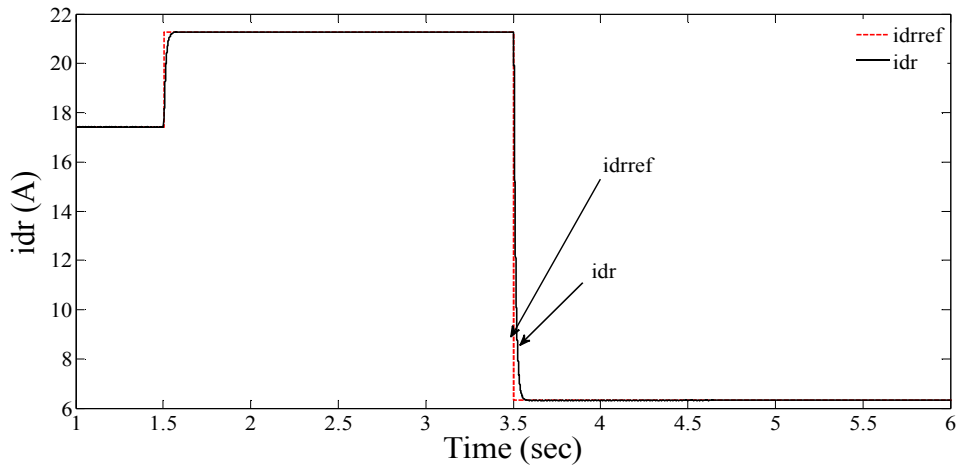
در شکل های (۳-۴) و (۴-۴)، نمودار جریانهای  $i_{dr}$  و  $i_{qr}$  را که به ترتیب برای کنترل توان راکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی، تنظیم می گردند نشان داده شده است. در این اشکال نمودار جریانها به همراه جریانهای مرجع شان که بر اساس مقادیر مرجع گشتاور و توان راکتیو استاتور محاسبه شده اند نمایش داده می شود. به طوریکه با توجه به این نمودارها، مستقل بودن کنترل گشتاور و توان راکتیو استاتور نیز به خوبی مشخص می گردد. نکته قابل توجه در این ۲ شکل، عدم تغییر جریان ها در حین تغییر دیگری است که شرایط را برای کنترل مستقل توان راکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی، فراهم می سازد.



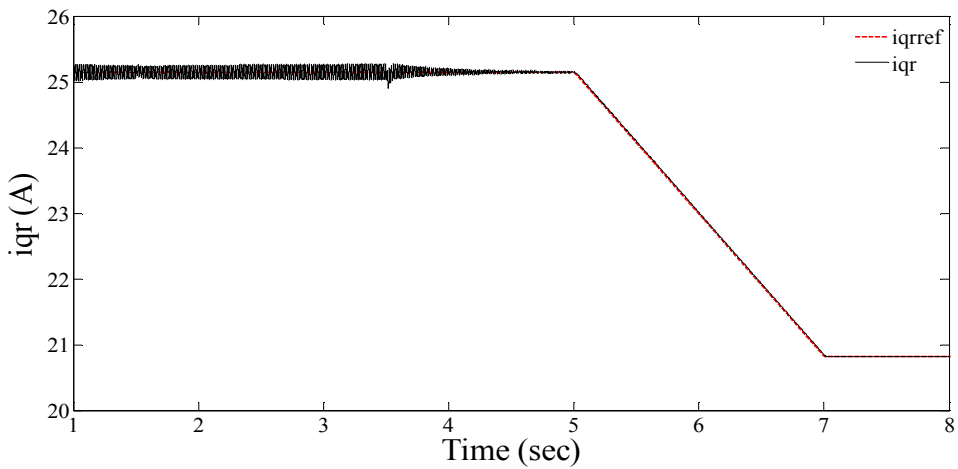
شکل (۴-۱): نمودار توان راکتیو استاتور



شکل (۲-۴): نمودار گشتاور الکترومغناطیسی



شکل (۳-۴): نمودار جریان  $i_{dr}$  و جریان مرجع آن  $i_{drref}$

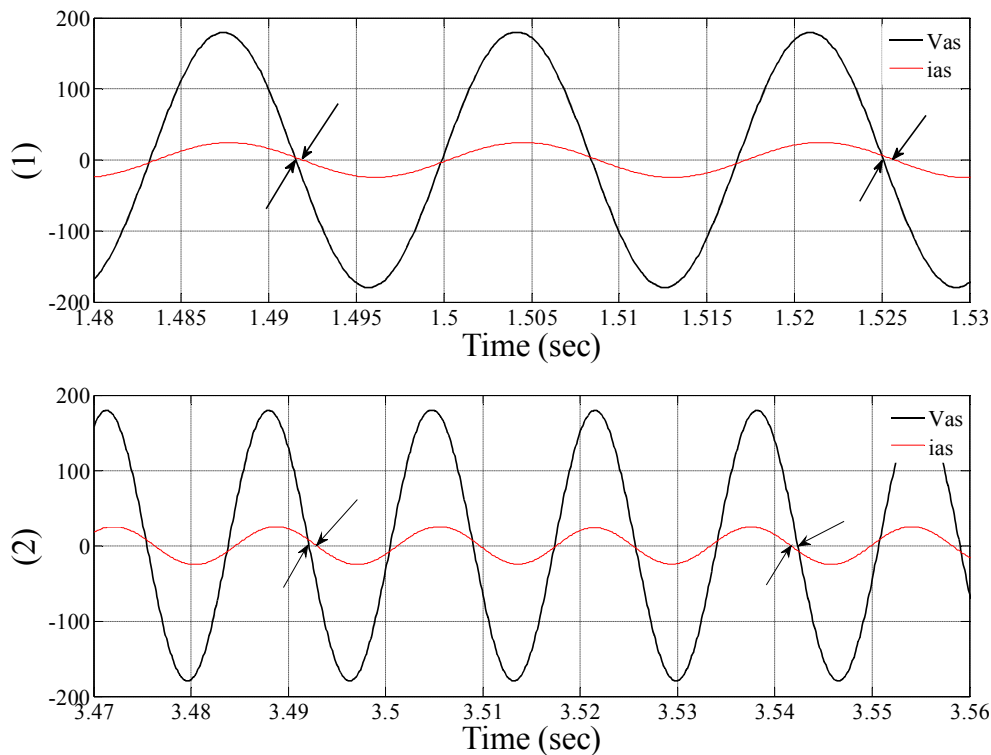


شکل (۴-۴): نمودار جریان  $i_{qr}$  و جریان مرجع آن  $i_{qref}$

در شکل (۴-۵)، نمودارهای ولتاژ و جریان خروجی از یک فاز استاتور برای زمان هایی که توان راکتیو مرجع استاتور تغییر می یابد نشان داده شده است. به طوریکه ابتدا در شکل (۴-۵-۱)، نمودار ولتاژ و جریان استاتور در زمانهای قبل و بعد از تغییر توان راکتیو استاتور مرجع از  $(Var) 1000$  به  $(Var) 2000$  ( $t=1/5$  (sec)) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد در این زمان ها، با توجه به مثبت بودن توان راکتیو استاتور که نشان دهنده تولید توان راکتیو توسط DFIG می باشد، جریان خروجی از استاتور نسبت به ولتاژ استاتور پس فاز می باشد. از طرفی با افزایش توان راکتیو استاتور در زمان های بعد از  $(t=1/5$  (sec)) از  $(Var) 1000$  به  $(Var) 2000$ ، اختلاف فاز بین جریان خروجی از استاتور و ولتاژ استاتور نیز افزایش یافته است. در شکل (۴-۵-۲)، نمودار ولتاژ و جریان استاتور در زمانهای قبل و بعد از تغییر توان راکتیو استاتور مرجع از  $(Var) 2000$  به  $(Var) -2000$  ( $t=3/5$  (sec)) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در زمان های قبل از  $(t=3/5$  (sec)) با توجه به مثبت بودن توان راکتیو استاتور و تولید توان راکتیو توسط DFIG، جریان خروجی از استاتور نسبت به ولتاژ استاتور پس فاز می باشد و از طرفی در زمان های بعد از  $(t=3/5$  (sec)) با توجه به منفی شدن توان راکتیو استاتور و در نتیجه مصرف توان راکتیو توسط DFIG، جریان خروجی از استاتور نسبت به ولتاژ استاتور، پیش فاز می گردد.

در شکل (۴-۶)، نمودار جریان های سه فاز روتور، برای زمان هایی که توان راکتیو خروجی از استاتور تغییر می یابد نشان داده شده است. با توجه به ثابت بودن گشتاور الکترومغناطیسی در زمان های مذکور، بنابراین سرعت روتور نیز در این زمان ها ثابت می باشد. از طرفی فرکانس جریان های روتور نیز که با سرعت و لغزش روتور دارای رابطه مستقیم می باشد ثابت می باشد و فقط دامنه جریانها با توجه به تغییر توان راکتیو استاتور، تغییر می یابد. به طوریکه در شکل (۴-۶)، تغییر دامنه و همچنین ثابت بودن فرکانس جریانهای سه فاز روتور به خوبی نمایان می باشد.

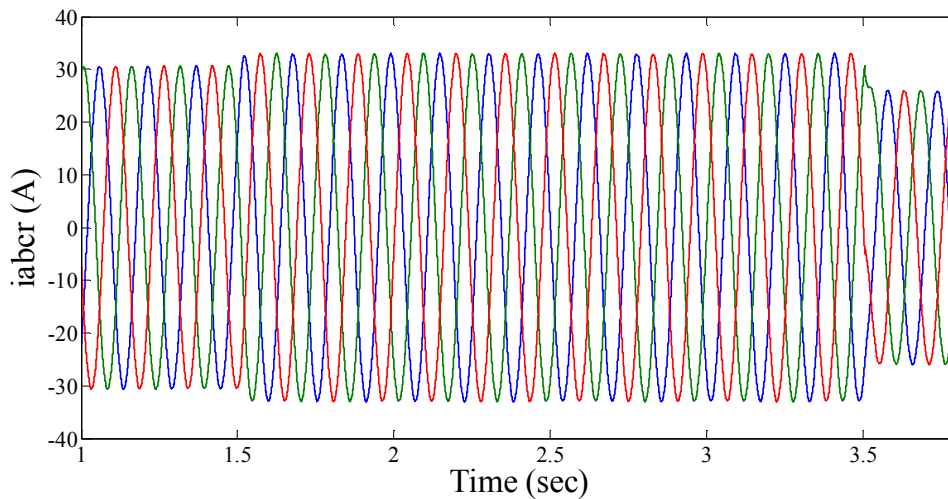




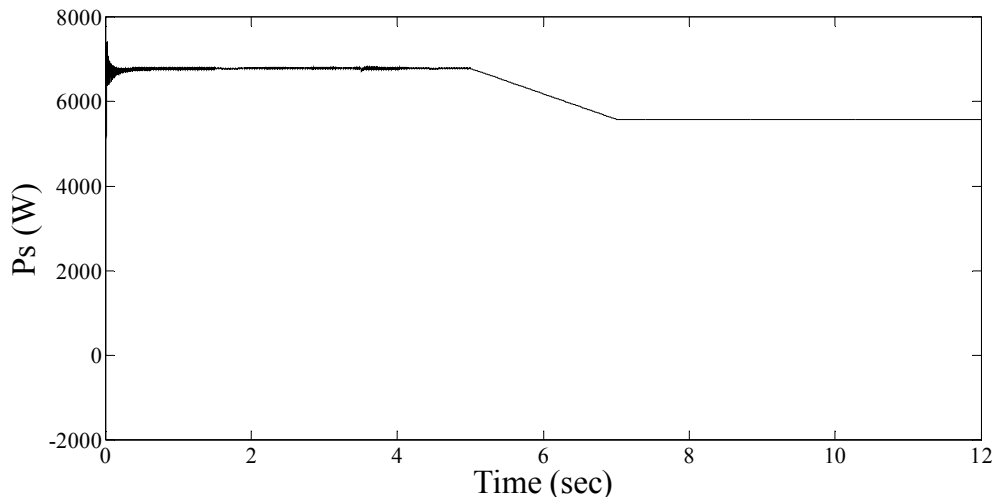
شکل (۴-۵): نمودارهای ولتاژ و جریان خروجی از فاز a استاتور

در شکل (۴-۷)، نمودار توان اکتیو خروجی از استاتور نشان داده شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد، با تنظیم جریان  $i_{qr}$ ، گشتاور الکترومغناطیسی و در نتیجه میزان توان دریافتی از باد توسط توربین بادی قابل کنترل می باشد. از طرفی در دستگاه مرجع  $dq$  همراستا با بردار شار استاتور نیز می توان با تنظیم جریان مذکور توان اکتیو استاتور را به صورت کاملاً مستقل از توان راکتیو آن کنترل نمود به طوری که این کنترل مستقل در شکل (۴-۷)، کاملاً مشهود می باشد.

همانطور که می دانیم گشتاور توربین باد، تابع سرعت باد و روتور می باشد و از آنجایی که سرعت باد ثابت و برابر با  $10 \text{ (m/s)}$  فرض شده است بنابراین گشتاور توربین فقط در اثر تغییر سرعت روتور، تغییر می یابد. از طرفی نیز محور روتور متصل به محور توربین می باشد به طوری که این امر باعث افزایش ممان اینرسی ( $J$ ) روتور و در نتیجه کندی تغییر سرعت روتور، می گردد. حال زمانی که گشتاور الکترومغناطیسی کاهش می یابد، با توجه به اینکه در ابتدا سرعت روتور به کندی تغییر می یابد.

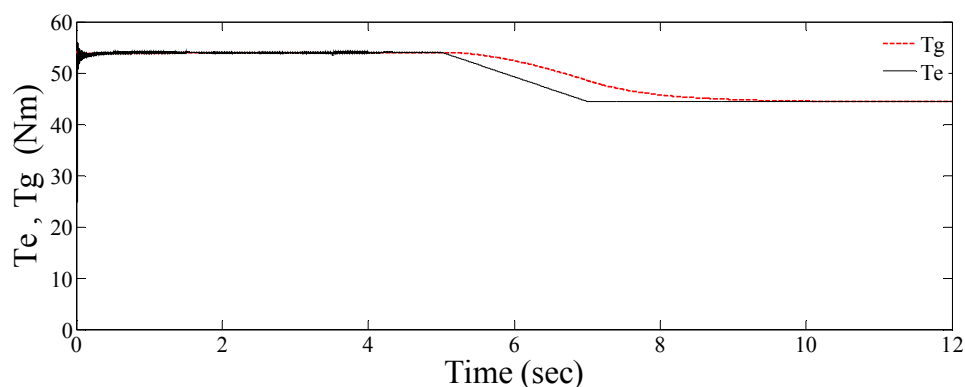


شکل (۴-۶): نمودارهای جریان های سه فاز روتور برای زمانهایی که توان راکتیو استاتور تغییر می یابد

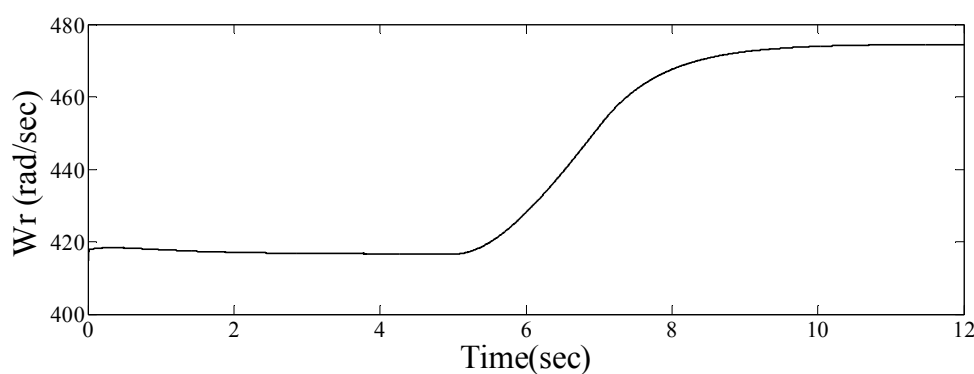


شکل (۴-۷): نمودار توان اکتیو استاتور

بنابراین گشتاور توربین نیز دارای تغییرات کمی می باشد با توجه به بیشتر بودن گشتاور توربین نسبت به گشتاور الکترومغناطیسی در این لحظات، سرعت روتور شروع به افزایش می کند و گشتاور توربین نیز به کندی شروع به کاهش می نماید. این سیکل افزایش سرعت روتور — کاهش گشتاور توربین تا زمانی ادامه پیدا می کند که گشتاور توربین و گشتاور الکترومغناطیسی با هم برابر شوند که در این زمان، سرعت روتور ثابت می گردد. روند تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور توربین و نیز سرعت الکتریکی روتور به خوبی در شکل های (۴-۸) و (۴-۹) نشان داده شده است.

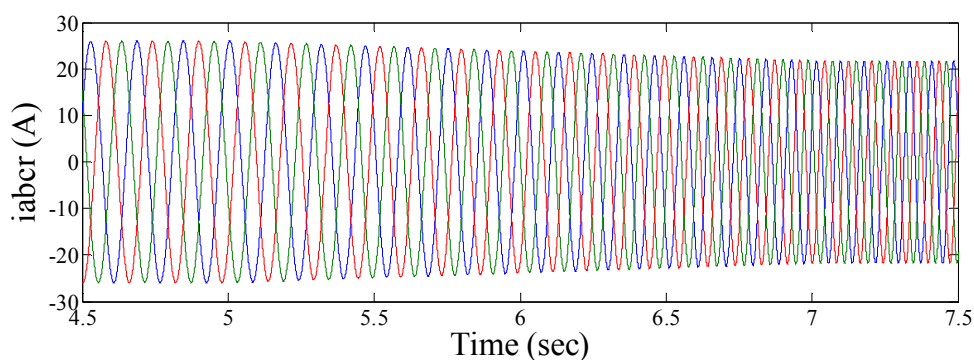


شکل (۸-۴): نمودار گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ ) و گشتاور توربین ( $T_g$ )

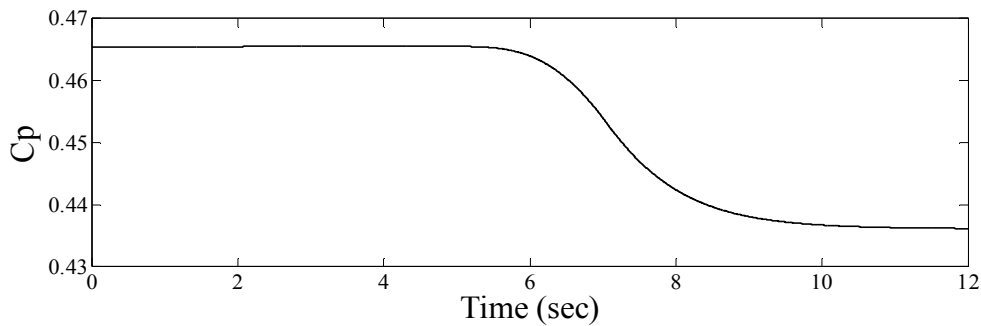


شکل (۹-۴): نمودار سرعت الکتریکی روتور

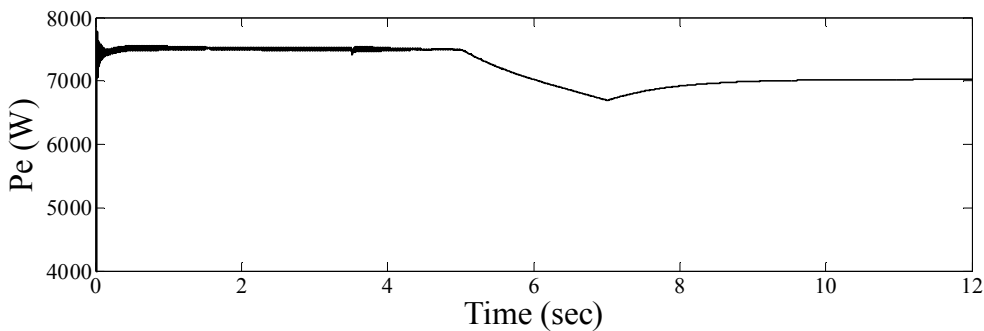
در شکل (۴-۱۰) نیز، روند تغییرات سرعت روتور و در نتیجه تغییر فرکانس جریانهای روتور، نمایش داده شده است. با کاهش گشتاور توربین، میزان توان دریافتی از انرژی باد توسط توربین باد کاهش می یابد که این امر در شکل های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) به خوبی مشهود می باشد.



شکل (۴-۱۰): نمودارهای جریان های سه فاز روتور برای زمانهایی که گشتاور تغییر می یابد

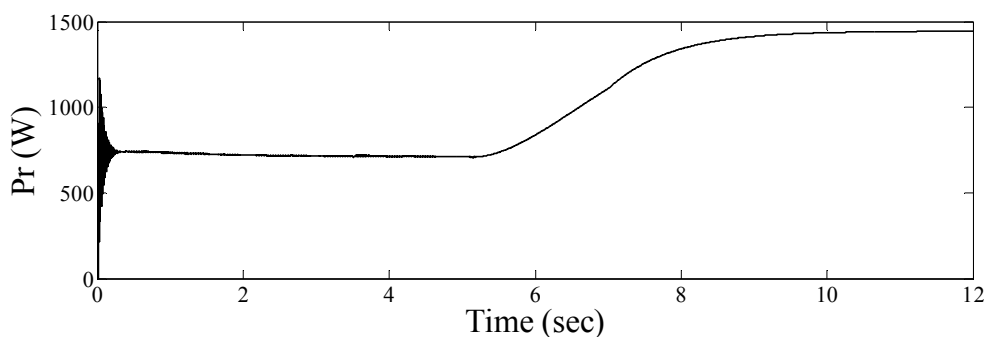


شکل (۴-۱۱): نمودار ضریب کارایی (Coefficient of Performance)

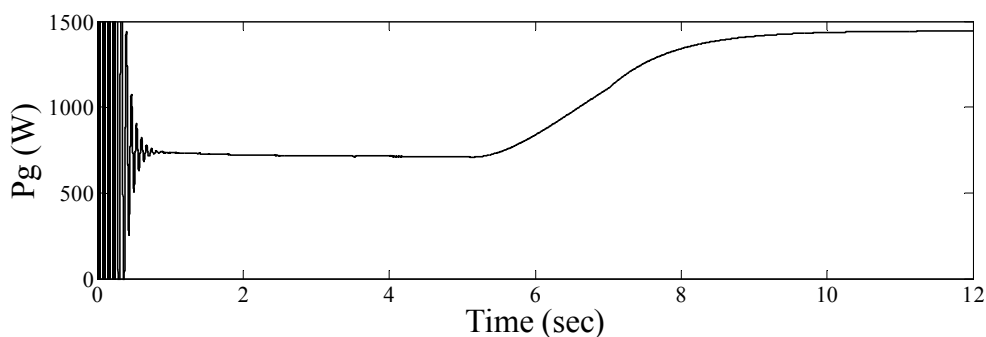


شکل (۴-۱۲): نمودار توان اکتیو دریافتی از باد توسط توربین بادی

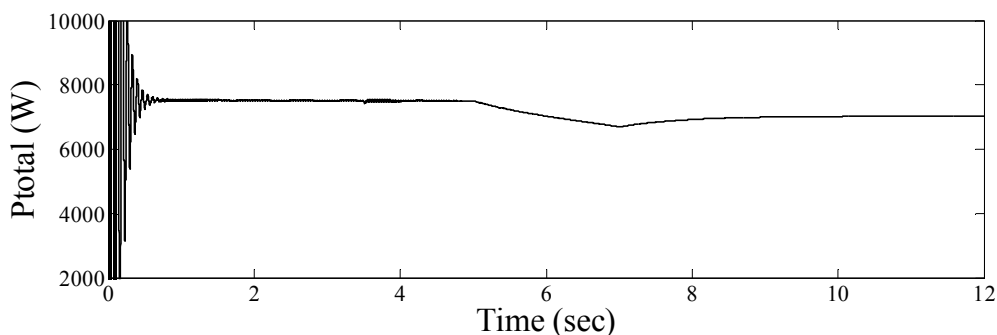
همانطور که در ابتدای این بخش اشاره شد برای اینکه سرعت نقطه کار روتور برای دریافت حداکثر توان از انرژی باد، در بالای سرعت سنکرون واقع گردد بایستی نسبت تبدیل گیربکس  $4/88$  در نظر گرفته شود. بنابراین تحت این شرایط، توان اکتیو انتقالی از روتور به سمت مبدل سمت روتور همواره مقداری مثبت می باشد که با کاهش گشتاور الکترومغناطیسی و در نتیجه افزایش سرعت روتور، این توان در جهت مثبت افزایش می یابد. حال با توجه به اینکه بین ۲ مبدل سمت روتور و شبکه، خازن DC-Link واقع شده است و این خازن هیچگونه توان اکتیوی مصرف نمی کند بنابراین با صرفنظر کردن از تلفات مبدل ها، توان اکتیو انتقالی از روتور به سمت مبدل سمت روتور، از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه، خارج می گردد. به طوریکه با توجه به شکل های (۴-۱۳) و (۴-۱۴)، نمودارهای توان اکتیو انتقالی از روتور به سمت مبدل سمت روتور و توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه، شبیه یکدیگر می باشند و در حالت دائمی نیز دامنه آنها با هم برابر می گردد. مجموع توان های اکتیو خروجی از استاتور و مبدل سمت شبکه، توان اکتیو کل خروجی از DFIG را نتیجه می دهد به طوریکه در شکل (۴-۱۵)، نمودار توان اکتیو کل نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۳): نمودار توان اکتیو انتقالی از روتور به سمت مبدل سمت روتور



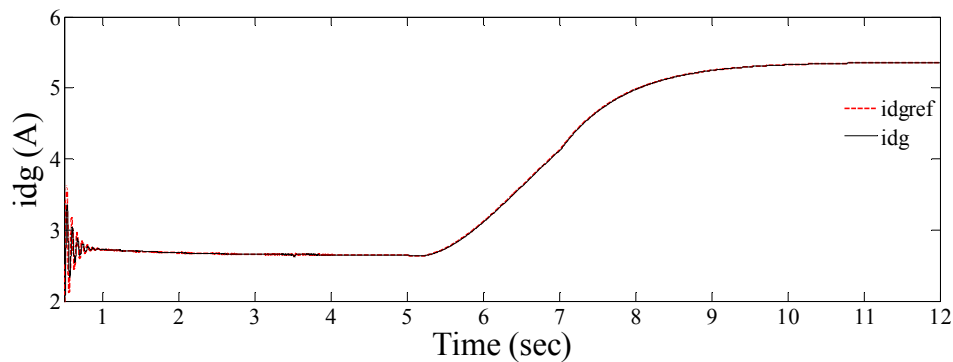
شکل (۴-۱۴): نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه



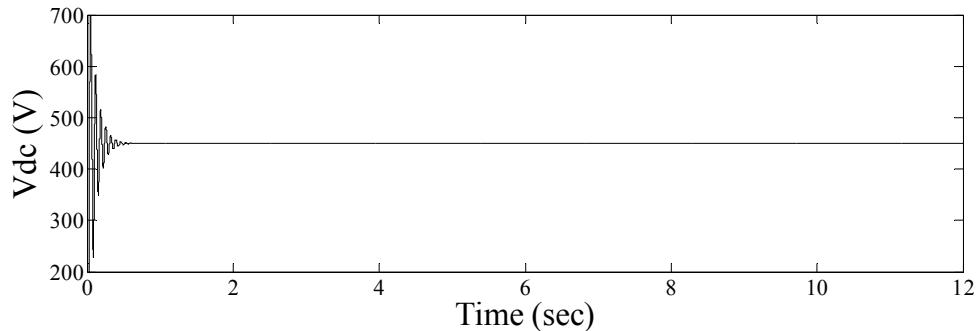
شکل (۴-۱۵): نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG

همانطور که اشاره شد، توان اکتیو انتقالی از مبدلها با تغییر گشتاور، تغییر می یابد. از طرف دیگر، یکی از اهداف کنترلی که برای مبدل سمت شبکه در نظر گرفته می شود تثبیت ولتاژ خازن DC-Link می باشد به نحوی که تغییر اندازه و جهت توان اکتیو انتقالی بین شبکه و روتور هیچگونه تأثیری بر اندازه آن نداشته باشد. با توجه به شکل های (۴-۱۶) و (۴-۱۷)، با تنظیم جریان  $i_{dg}$  ولتاژ خازن DC-Link به اندازه (V) ۴۵۰ شارژ و در این ولتاژ نیز تثبیت شده است به طوریکه تغییر توان اکتیو انتقالی از مبدلها، هیچگونه تأثیری بر روی اندازه این ولتاژ نگذاشته است.

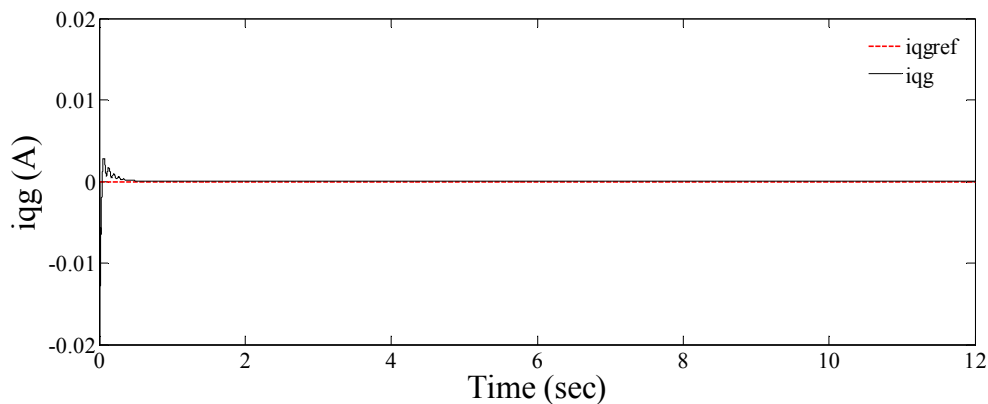
همچنین با توجه به شکل های (۴-۱۸) و (۴-۱۹)، با تنظیم جریان  $i_{dq}$ ، توان راکتیو خروجی از مبدا سمت شبکه در مقدار صفر، تنظیم گردیده است در نتیجه ضریب توان خروجی از این مبدا، ۱ می باشد. از طرفی با توجه به مثبت بودن توان اکتیو خروجی از مبدا سمت شبکه، هیچگونه اختلاف فازی بین ولتاژ استاتور و جریان خروجی از مبدا، وجود ندارد که این امر در شکل (۴-۲۰) به خوبی مشهود می باشد.



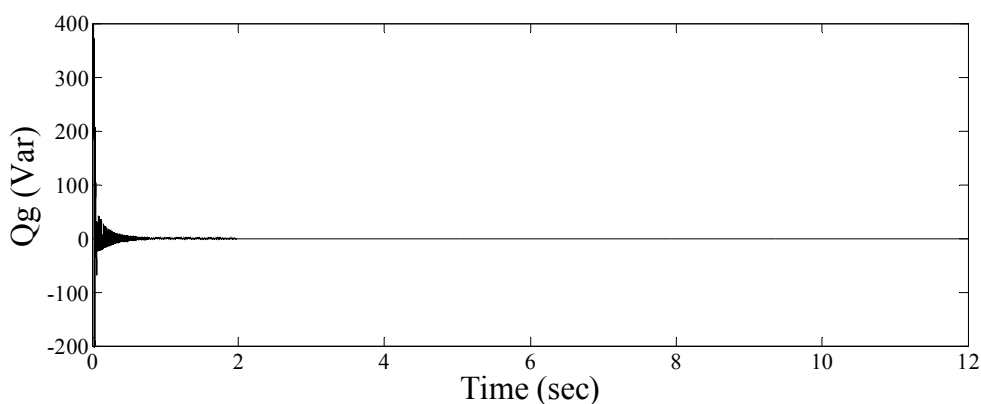
شکل (۴-۱۶): نمودار جریان  $i_{dg}$  و جریان مرجع آن  $i_{dgrf}$



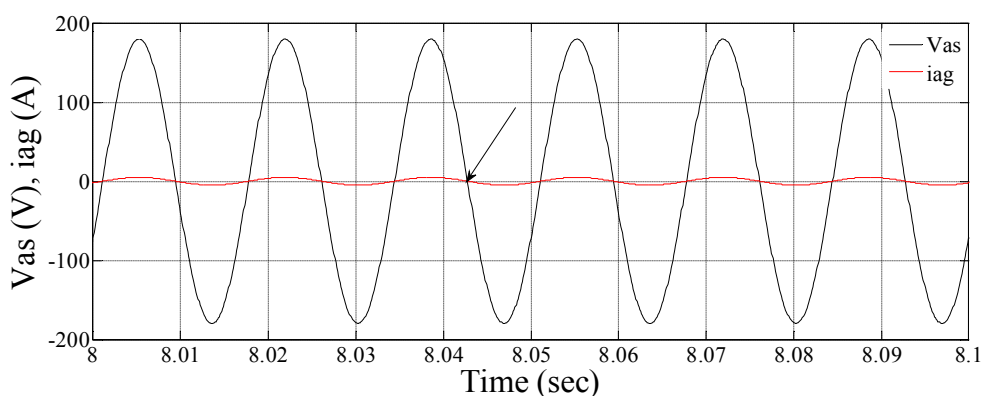
شکل (۴-۱۷): نمودار ولتاژ DC-Link



شکل (۴-۱۸): نمودار جریان  $i_{qg}$  و جریان مرجع آن  $i_{qgrf}$



شکل (۴-۱۹): نمودار توان راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه



شکل (۴-۲۰): نمودارهای ولتاژ استاتور و جریان خروجی از مبدل سمت شبکه

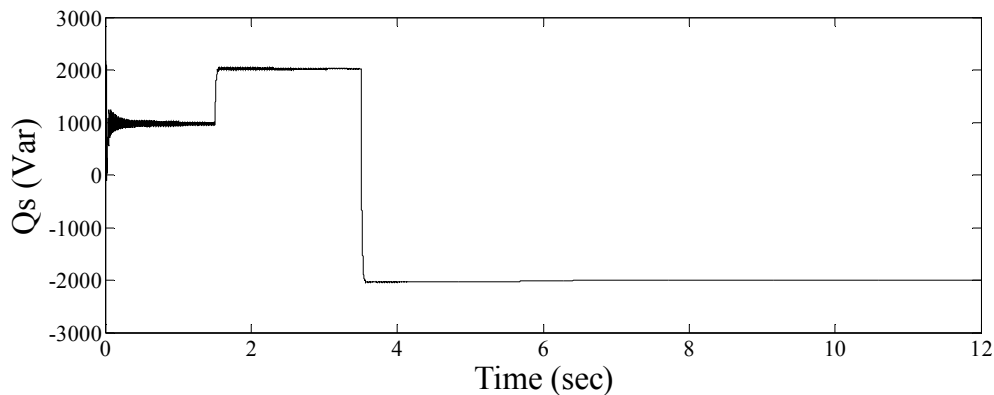
#### ۴-۲-۲- شرایط کاری در پایین سرعت سنکرون

در این شرایط برای اینکه سرعت ژنراتور برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد، دارای لغزش ۰/۰۵ و در پایین سرعت سنکرون باشد بایستی روتور با سرعت ۱۱۴۰ (rpm) بچرخد. بنابراین نسبت تبدیل مورد نیاز برای گیربکس ۴/۲۱۶ در نظر گرفته می شود.

در اینجا نیز مدت زمان اجراء برنامه برای شبیه سازی رفتار DFIG، ۱۲ ثانیه می باشد. به طوریکه در ابتدا گشتاور مرجع برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد برابر با ۶۲/۸۳ (Nm) و توان راکتیو مرجع استاتور نیز ۱۰۰۰ (Var) در نظر گرفته می شوند. در زمان  $t=1/5$  (sec) توان راکتیو مرجع استاتور از ۱۰۰۰ (Var) به ۲۰۰۰ (Var) تغییر می یابد ولی مقدار گشتاور مرجع هیچگونه تغییری نمی یابد. در زمان  $t=3/5$  sec(sec) توان راکتیو از ۲۰۰۰ (Var) به -۲۰۰۰ (Var) تغییر می یابد ولی همچنان

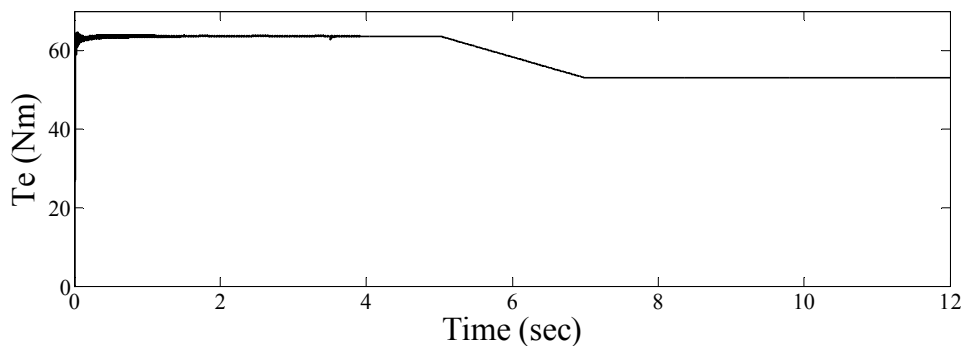
مقدار گشتاور مرجع ثابت است تا اینکه در زمان  $t=5$  (sec) الی  $t=7$  (sec) گشتاور مرجع با شیب  $(62/83-53)/2$  از  $62/83$  (Nm) به  $53$  (Nm) تغییر می یابد. در تمامی مدت زمان شبیه سازی، ولتاژ DC-Link به اندازه  $450$  (V) و توان راکتیو مرجع خروجی از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه نیز، صفر در نظر گرفته شده است. حال مانند شرایط کاری قبل، با کنترل مبدلهای سمت شبکه و روتور DFIG برای ایجاد گشتاور و توان های مطلوب مطابق با مقادیر گشتاور و توان های مرجع مورد نظر، به بررسی رفتار آن پرداخته می شود.

در شکل های (۴-۲۱) و (۴-۲۲)، توان راکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی نشان داده می شود که مطابق با مقادیر مرجعی که برای آنها در نظر گرفته شد در زمان های مورد نظر ایجاد گردیده اند. در اینجا نیز، با توجه به ثابت بودن گشتاور در زمان تغییر توان راکتیو استاتور و نیز ثابت بودن توان راکتیو استاتور در حین تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی، مستقل بودن کنترل گشتاور و توان راکتیو استاتور از یکدیگر به خوبی نمایان است. همانطور که قبلاً اشاره شد، در واقع این کنترل مستقل با کنترل جریانهای  $i_{qr}$  و  $i_{dr}$  در دستگاه مرجع dq همراستا با بردار شار استاتور بدست آمده است.



شکل (۴-۲۱): نمودار توان راکتیو استاتور

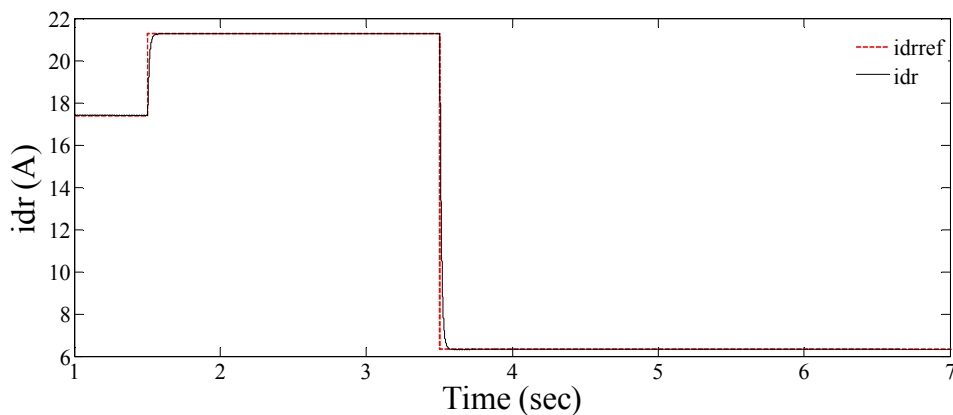




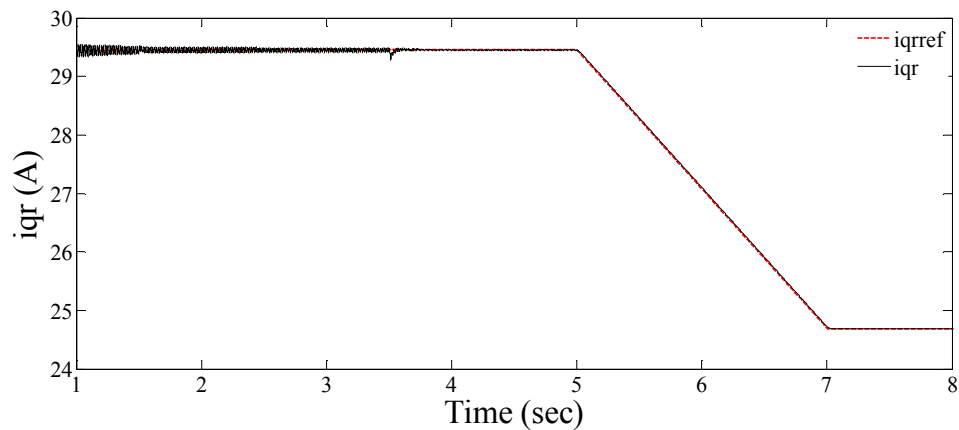
شکل (۴-۲۲): نمودار گشتاور الکترومغناطیسی

در شکل های (۴-۲۳) و (۴-۲۴)، منحنی جریانهای  $i_{dr}$  و  $i_{qr}$  به همراه جریانهای مرجع شان که بر اساس مقادیر مرجع گشتاور و توان راکتیو استاتور محاسبه شده اند نمایش داده می شود، به طوریکه مستقل بودن کنترل گشتاور و توان راکتیو استاتور نیز به خوبی با توجه به این نمودارها مشخص می گردد.

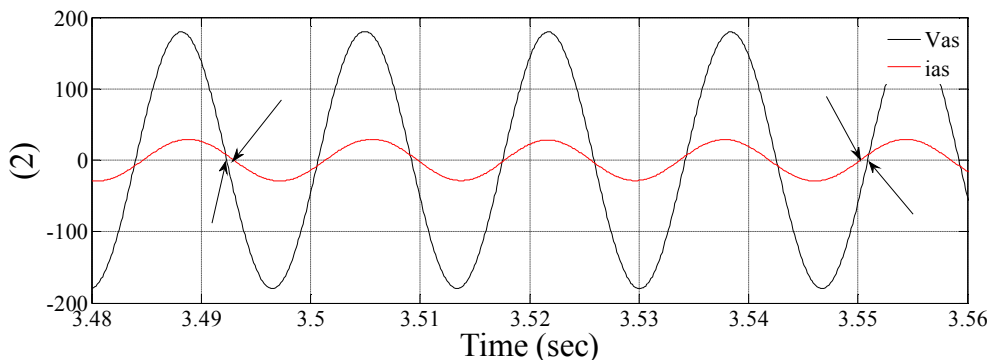
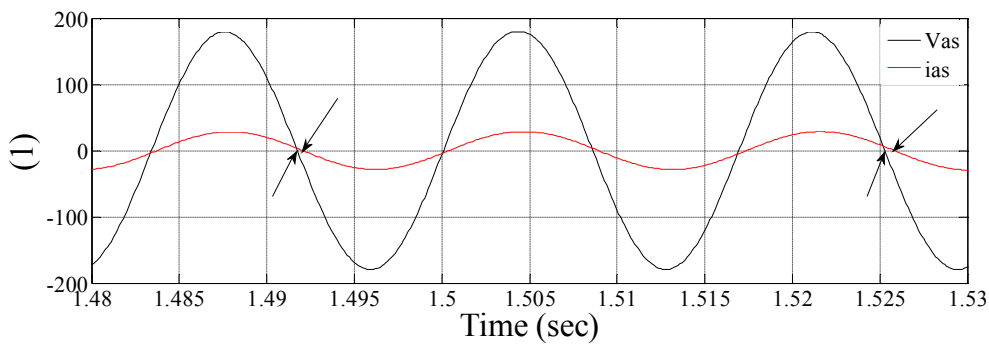
در شکل (۴-۲۵)، نمودارهای ولتاژ و جریان خروجی از استاتور برای زمان هایی که توان راکتیو مرجع استاتور تغییر می یابد نشان داده شده است. در این شرایط کاری نیز نمودارهای بدست آمده برای ولتاژ و جریان خروجی از استاتور، مشابه با نمودارهای بدست آمده در شکل (۴-۲۵) می باشد.



شکل (۴-۲۳): نمودار جریان  $i_{dr}$  و جریان مرجع آن  $i_{drref}$

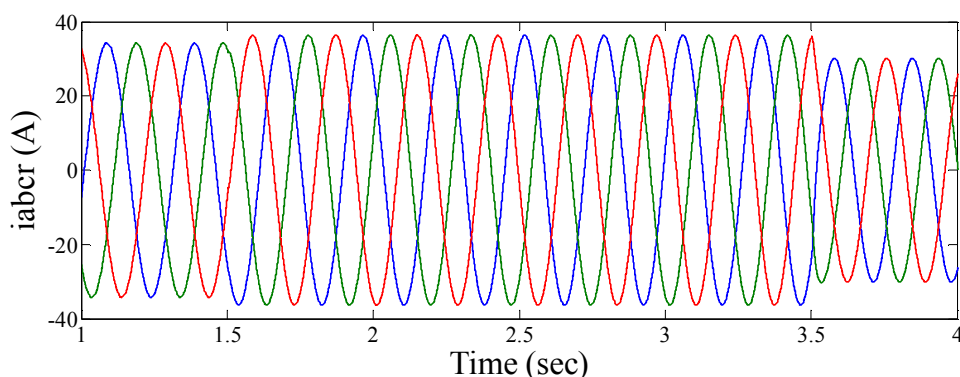


شکل (۴-۲۴): نمودار جریان  $i_{qr}$  و جریان مرجع آن  $i_{qrref}$



شکل (۴-۲۵): نمودارهای ولتاژ و جریان خروجی از استاتور

در شکل (۴-۲۶)، نمودار جریان های سه فاز روتور، برای زمان هایی که توان راکتیو مرجع استاتور تغییر می یابد، نشان داده شده است. در اینجا نیز با توجه به اینکه در زمان های مذکور، فقط توان راکتیو استاتور تغییر می یابد و گشتاور الکترومغناطیسی ثابت است بنابراین با توجه به ثابت بودن گشتاور و در نتیجه سرعت روتور در این زمان ها، فرکانس جریان های روتور نیز ثابت می باشد و فقط دامنه جریانها با توجه به تغییر توان راکتیو استاتور، تغییر می یابد. تفاوتی که بین نمودار مربوط به

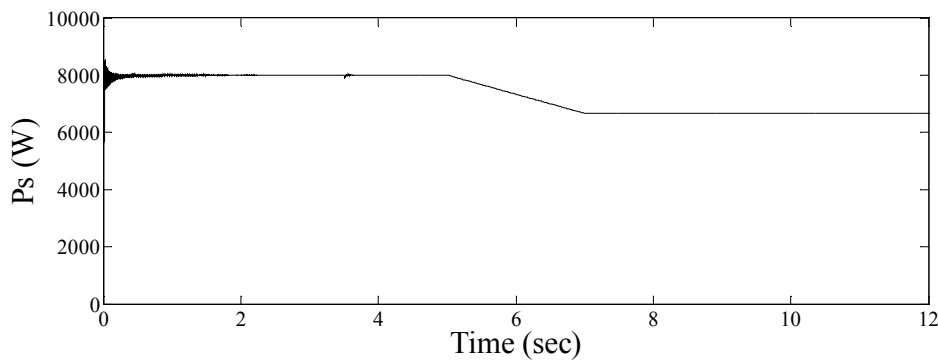


شکل (۴-۲۶): نمودارهای جریان های سه فاز روتور برای زمانهایی که توان راکتیو استاتور تغییر می یابد

جریانهای روتور نشان داده شده در شکل های (۴-۲۶) و (۴-۶) وجود دارد این است که در شکل (۴-۲۶)، با توجه به اینکه سرعت ژنراتور برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد، در لغزش  $0.05$  و در پایین سرعت سنکرون ( $1140$  rpm) تنظیم شده است بنابراین فرکانس جریانهای روتور در این شرایط  $f_s$  می باشد در صورتیکه در شرایط کاری قبل با توجه به اینکه سرعت ژنراتور برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد، در لغزش  $0.1$  و در بالای سرعت سنکرون ( $1320$  rpm) تنظیم شده بود در نتیجه فرکانس جریانهای مذکور  $0.1 f_s$  بدست آمد.

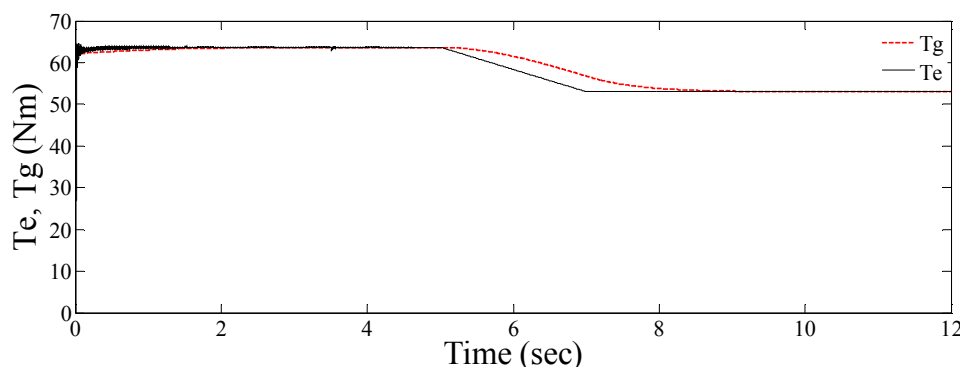
در شکل (۴-۲۷)، نمودار توان اکتیو خروجی از استاتور نشان داده شده است. با توجه به اینکه سرعت روتور در پایین سرعت سنکرون می باشد بنابراین جهت انتقال توان اکتیو رد و بدل شده بین روتور و مبدل سمت روتور به سمت روتور می باشد و از طرفی با توجه به اینکه توربین توان نامی  $7/5$  KW را به ژنراتور می دهد در نتیجه مجموع این توانها، توان اکتیو خروجی از استاتور را نتیجه می دهد. به طوریکه توان اکتیو خروجی از استاتور در این شرایط نسبت به شرایط کاری بالای سرعت سنکرون، بیشتر می باشد.

در شکل (۴-۲۸)، با توجه به کند بودن تغییر سرعت روتور، گشتاور توربین نیز به کندی تغییر می کند به طوریکه اندازه گشتاور توربین نسبت به اندازه گشتاور الکترومغناطیسی در لحظات ابتدایی تغییر گشتاور الکترومغناطیسی، بیشتر می باشد که این منجر به افزایش سرعت روتور می گردد و در

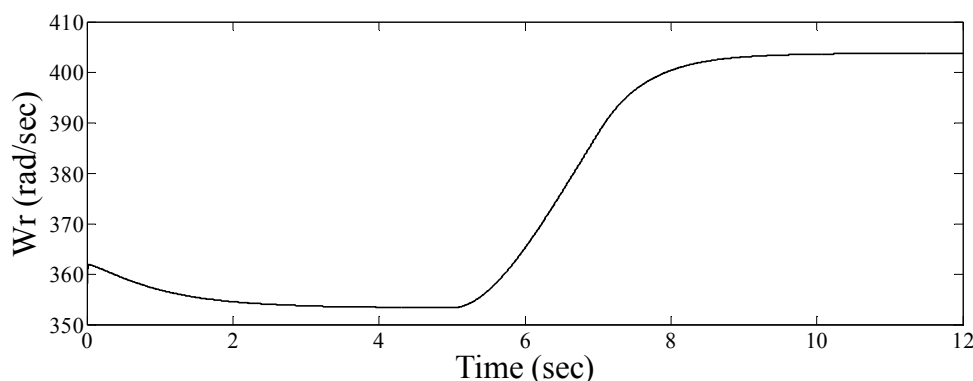


شکل (۴-۲۷): نمودار توان اکتیو استاتور

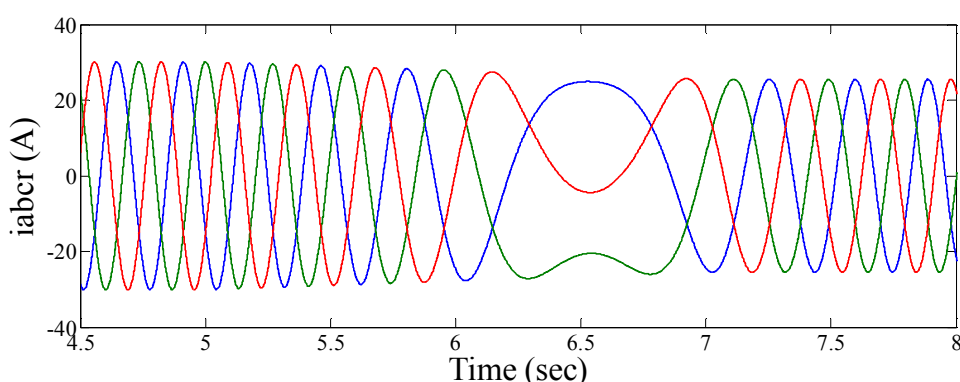
نتیجه گشتاور توربین به آهستگی شروع به کاهش می کند. حال همانطور که قبلاً اشاره شد این سیکل افزایش سرعت – کاهش گشتاور توربین تا زمانی ادامه پیدا می کند که گشتاور توربین و گشتاور الکترومغناطیسی با هم برابر شوند که در این زمان سرعت روتور ثابت می گردد. روند تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور توربین و نیز سرعت الکتریکی روتور به خوبی در شکل های (۴-۲۸) و (۴-۲۹) نشان داده شده است. ولی نکته قابل توجه در اینجا این است که سرعت روتور قبل از تغییر گشتاور الکترومغناطیسی در پایین سرعت سنکرون قرار دارد که با کاهش گشتاور الکترومغناطیسی، این سرعت شروع به افزایش می کند تا اینکه سرعت روتور در سرعتی بالای سرعت سنکرون تثبیت می گردد. در شکل (۴-۳۰)، روند تغییرات سرعت روتور و در نتیجه تغییر فرکانس جریانهای روتور در این زمانها، به خوبی نمایان می باشد.



شکل (۴-۲۸): نمودار گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ ) و گشتاور توربین ( $T_g$ )



شکل (۴-۲۹): نمودار سرعت الکتریکی روتور

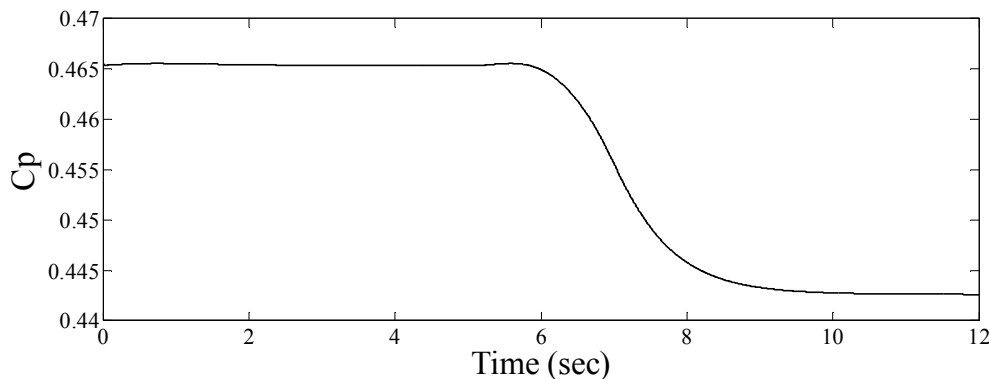


شکل (۴-۳۰): نمودارهای جریان های سه فاز روتور برای زمانهایی که گشتاور تغییر می یابد

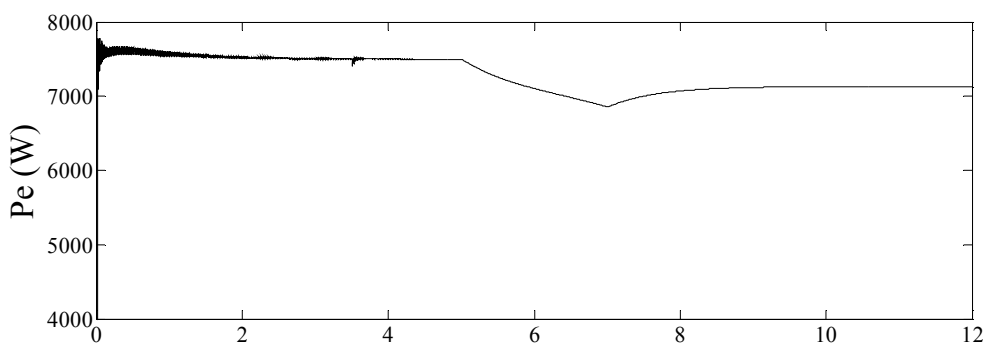
با کاهش گشتاور توربین، میزان توان دریافتی از انرژی باد توسط توربین باد کاهش می یابد که این امر در شکل های (۴-۳۱) و (۴-۳۲) به خوبی مشهود می باشد.

همانطور که اشاره شد برای اینکه سرعت نقطه کار روتور برای دریافت حداکثر انرژی از انرژی باد، در پایین سرعت سنکرون واقع گردد نسبت تبدیل گیربکس  $4/216$  در نظر گرفته شد. بنابراین در این شرایط کاری، توان اکتیو انتقالی از روتور به سمت مبدل سمت روتور همواره مقداری منفی می باشد که با کاهش گشتاور الکترومغناطیسی و در نتیجه افزایش سرعت روتور، این توان در جهت مثبت افزایش می یابد. حال با توجه به اینکه، بین ۲ مبدل سمت روتور و شبکه خازن DC-Link واقع شده است و این خازن هیچگونه توان اکتیوی مصرف نمی کند بنابراین با توجه به شکل های (۴-۳۳) و (۴-۳۴)، نمودارهای توان اکتیو انتقالی از روتور به سمت مبدل سمت روتور و توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه، شبیه یکدیگر است و در حالت دائمی دامنه آنها با هم برابر می

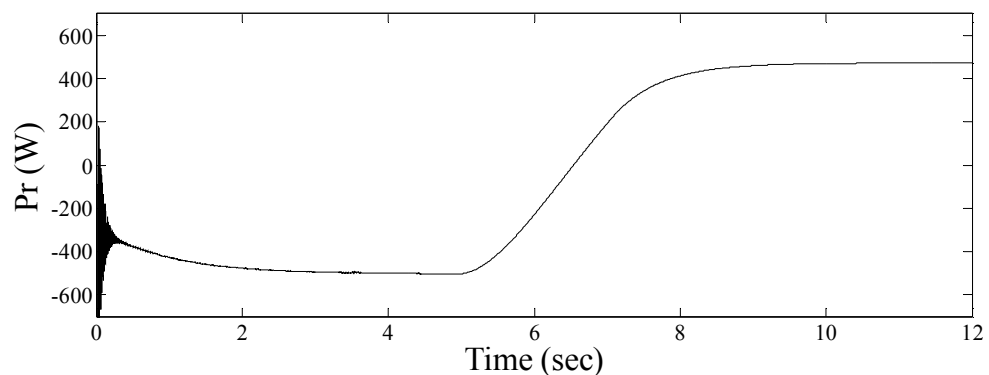
گردد. همانطور که اشاره شد مجموع توان های اکتیو خروجی از استاتور و مبدل سمت شبکه، توان اکتیو کل خروجی از DFIG را نتیجه می دهد. در شکل (۴-۳۵)، نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG، نشان داده شده است.



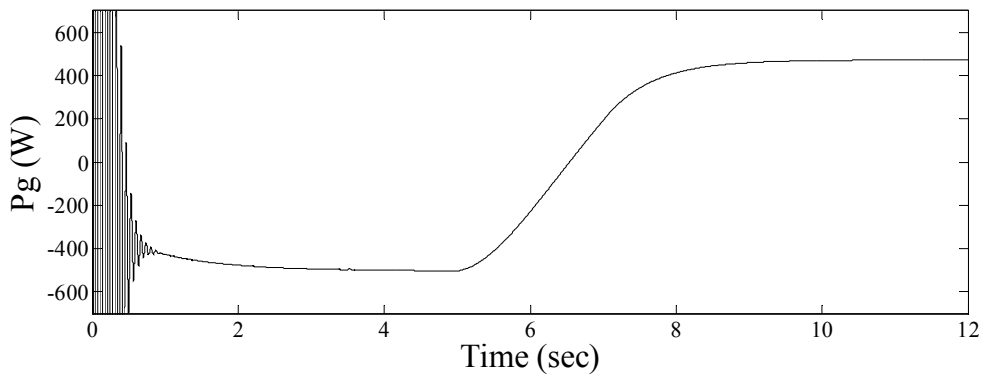
شکل (۴-۳۱): نمودار ضریب کارایی (Coefficient of Performance)



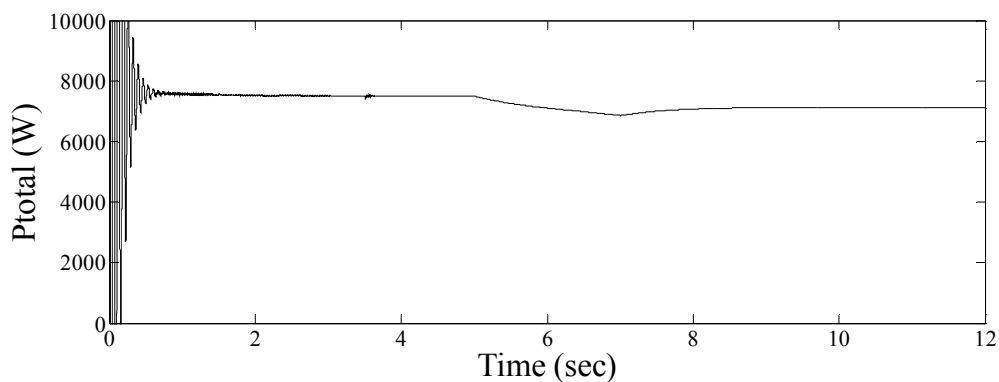
شکل (۴-۳۲): نمودار توان اکتیو دریافتی از باد توسط توربین بادی



شکل (۴-۳۳): نمودار توان اکتیو انتقالی از روتور به سمت مبدل سمت روتور



شکل (۴-۳۴): نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه

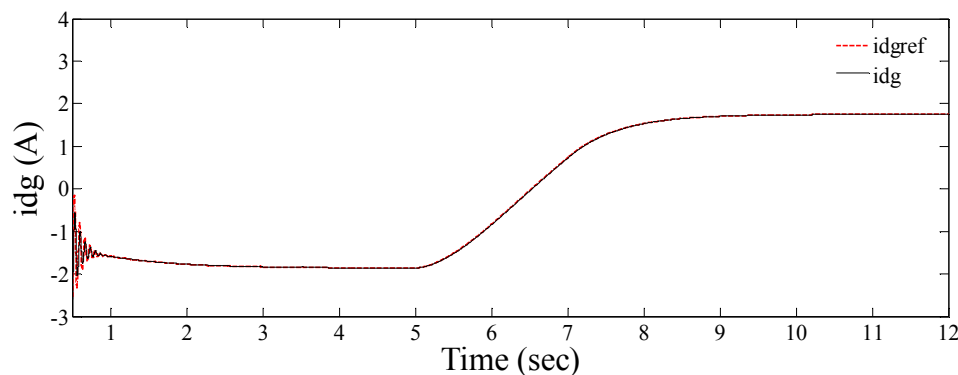


شکل (۴-۳۵): نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG

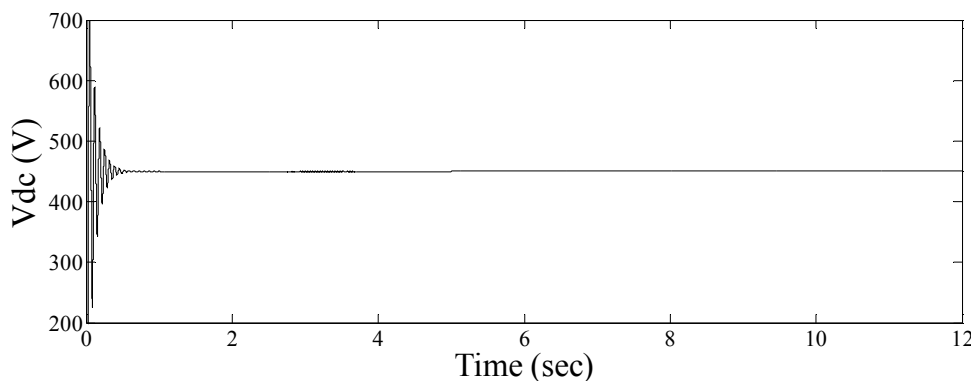
با توجه به شکل های (۴-۳۶) و (۴-۳۷)، با تنظیم جریان ولتاژ  $i_{dg}$  و ولتاژ خازن DC-Link به اندازه (V) ۴۵۰ شارژ و در این ولتاژ نیز تثبیت می گردد. در اینجا نیز همانگونه که مشاهده می شود تغییر دامنه و جهت توان اکتیو انتقالی از مبدلها، هیچگونه اثری بر اندازه ولتاژ خازن DC-Link نگذاشته است.

همچنین با توجه به شکل های (۴-۳۸) و (۴-۳۹)، با تنظیم جریان  $i_{dq}$  توان راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه در مقدار صفر، تنظیم گردیده است در نتیجه ضریب توان خروجی از این مبدل، ۱ می باشد. از طرفی با توجه به اینکه سرعت روتور قبل از اعمال تغییرات در گشتاور الکترومغناطیسی، در پایین سرعت سنکرون می باشد بنابراین توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه، مقداری منفی می باشد. به عبارت دیگر جهت توان اکتیو از شبکه به سمت مبدل و از مبدل به سمت روتور می باشد. بنابراین تحت این شرایط بین ولتاژ استاتور و جریان خروجی از مبدل، ۱۸۰ درجه اختلاف فاز وجود دارد که این امر در شکل (۴-۴۰-۱) به خوبی نشان داده شده است. از طرف دیگر، با کاهش گشتاور

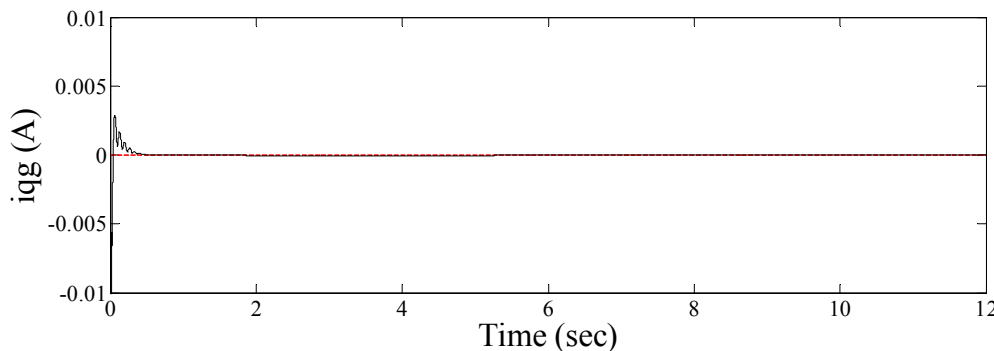
الکترومغناطیسی، سرعت روتور افزایش می یابد و در بالای سرعت سنکرون قرار می گیرد که در این شرایط، توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه، مقداری مثبت می گردد و جهت توان اکتیو نیز از روتور به سمت مبدل و از مبدل به سمت شبکه می گردد. بنابراین با توجه به شکل (۴-۴۰)، تحت این شرایط بین ولتاژ استاتور و جریان خروجی از مبدل، هیچگونه اختلاف فازی وجود ندارد.



شکل (۴-۳۶): نمودار جریان  $i_{dg}$  و جریان مرجع آن  $i_{dgref}$

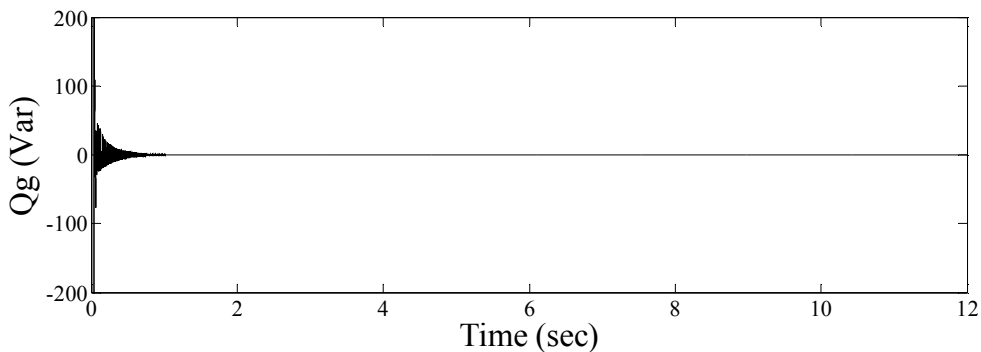


شکل (۴-۳۷): نمودار ولتاژ DC-Link

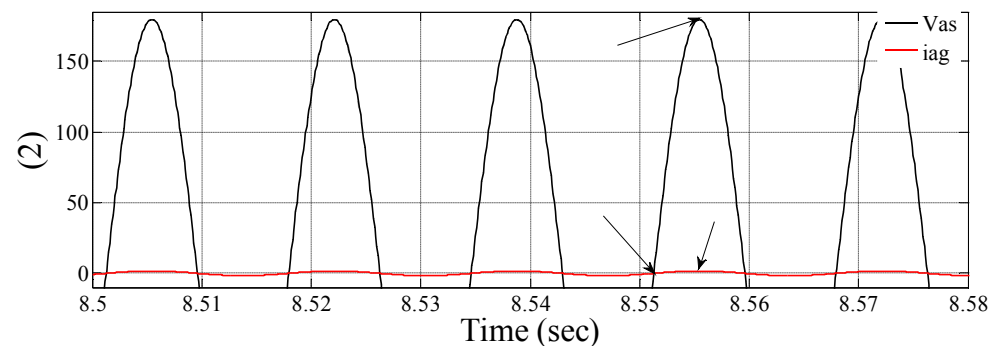
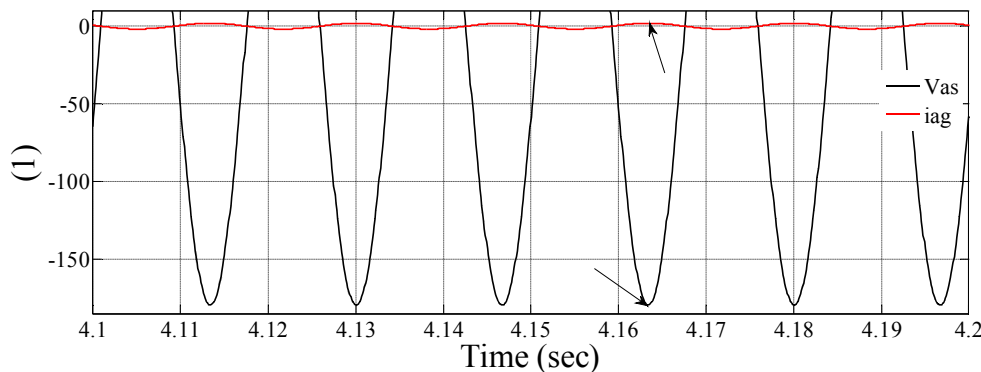


شکل (۴-۳۸): نمودار جریان  $i_{qg}$  و جریان مرجع آن  $i_{qgref}$





شکل (۴-۳۹): نمودار توان راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه



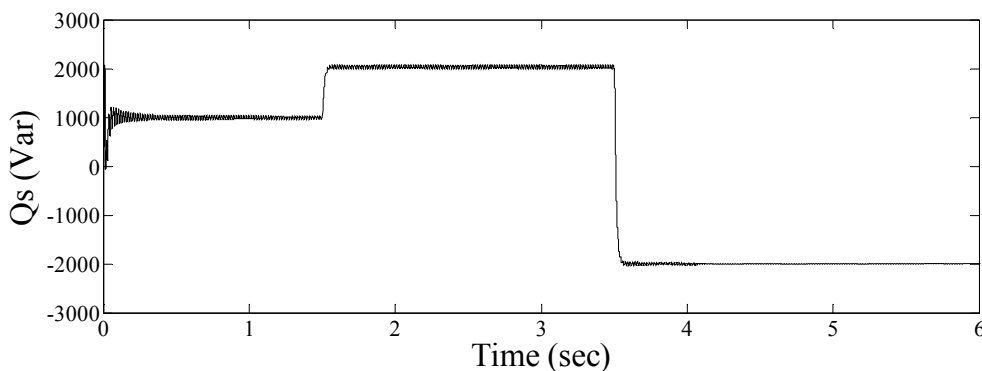
شکل (۴-۴۰): نمودارهای ولتاژ استاتور و جریان خروجی از مبدل سمت شبکه

#### ۴-۲-۳- کنترل توان راکتیو خروجی از DFIG

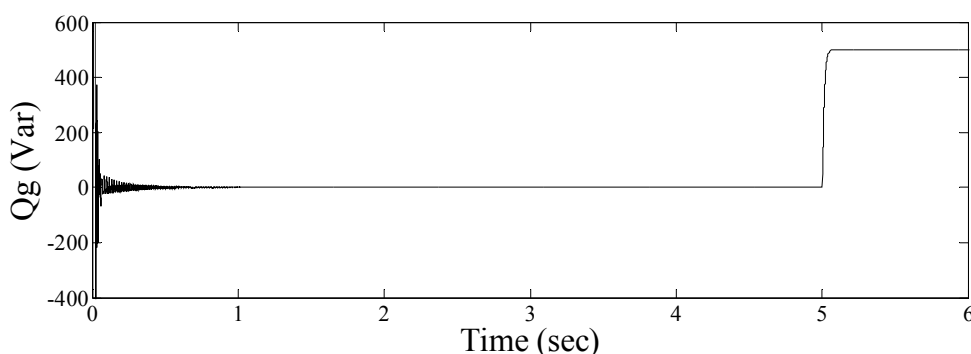
مدت زمان اجراء برنامه برای شبیه سازی رفتار DFIG مورد نظر در این شرایط کاری، ۶ ثانیه می باشد. شرایط کاری در اینجا به اینصورت است که توان راکتیو مرجع خروجی از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه صفر در نظر گرفته می شود تا اینکه در زمان  $t=5(\text{sec})$  توان راکتیو از  $0(\text{Var})$  به  $500(\text{Var})$  تغییر می یابد. در این شرایط، گشتاور مرجع برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد،  $(\text{Nm})$  و توان راکتیو مرجع استاتور نیز  $1000(\text{Var})$  در نظر گرفته شده اند. از طرفی برای اینکه

سرعت ژنراتور برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد، دارای لغزش ۰/۱ و در بالای سرعت سنکرون باشد بایستی روتور با سرعت (rpm) ۱۳۲۰ بچرخد. بنابراین نسبت تبدیل مورد نیاز برای گیربکس بایستی ۴/۸۸ باشد. در زمان  $t=۱/۵$  (sec) توان راکتیو مرجع استاتور از  $۱۰۰۰$ (Var) به  $۲۰۰۰$ (Var) تغییر می یابد و در زمان  $t=۳/۵$  (sec) توان راکتیو از  $۲۰۰۰$ (Var) به  $-۲۰۰۰$ (Var) تغییر می یابد. حال با کنترل مبدلهای سمت شبکه و روتور DFIG، برای ایجاد گشتاور و توان های مطلوب مطابق با مقادیر گشتاور و توان های مرجع مورد نظر، به بررسی رفتار آن پرداخته می شود.

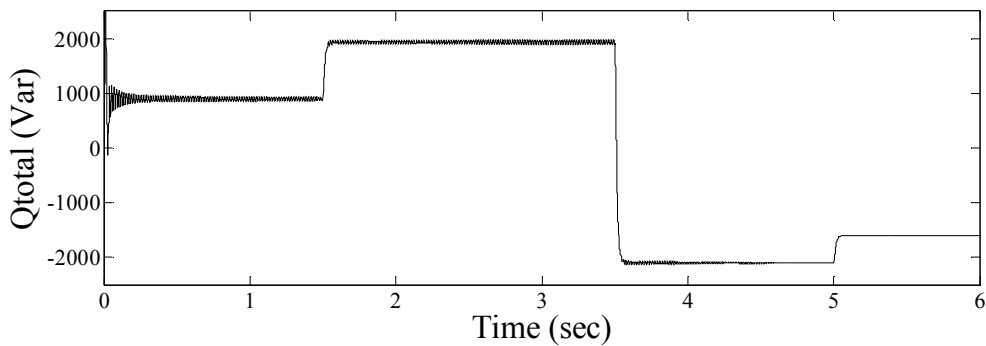
همانطور که در شکل های (۴-۴۱) و (۴-۴۲) مشاهده می شود توان های راکتیو خروجی از استاتور و مبدل سمت شبکه، مطابق با مقادیر مرجعی که برای آنها در نظر گرفته شد در زمان های مورد نظر تولید شده است. حاصلجمع توان های راکتیو مذکور، توان راکتیو کل خروجی از DFIG را نتیجه می دهد که در شکل (۴-۴۳) نشان داده شده است.



شکل (۴-۴۱): نمودار توان راکتیو خروجی از استاتور

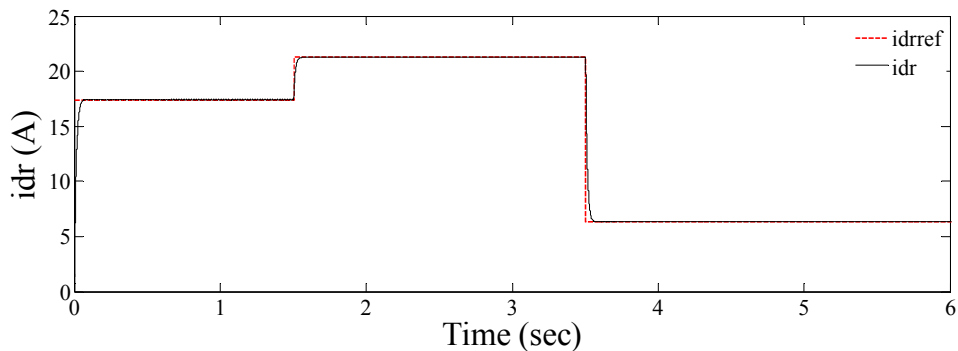


شکل (۴-۴۲): نمودار توان راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه

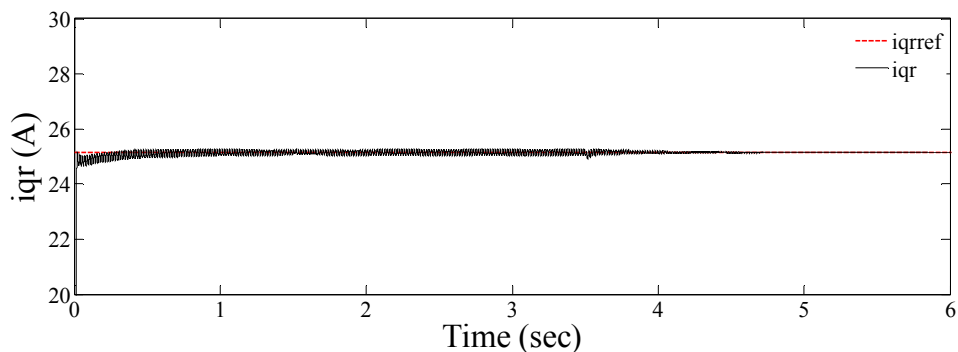


شکل (۴-۴۳): نمودار توان راکتیو کل خروجی از DFIG

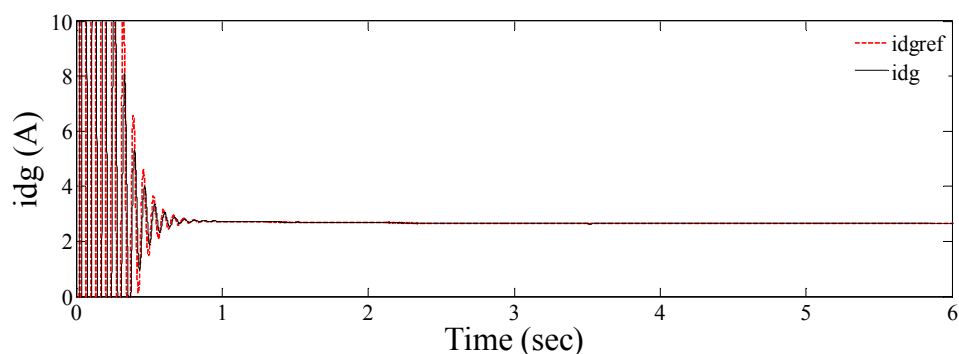
در شکل های (۴-۴۴) - (۴-۴۷)، نمودار جریانهای  $i_{dr}$ ،  $i_{dq}$ ،  $i_{qr}$  و  $i_{dq}$  به همراه جریانهای مرجع شان که به ترتیب بر اساس مقادیر مرجع توان راکتیو استاتور، گشتاور، ولتاژ DC-Link و توان راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه تعیین شده اند نمایش داده می شود.



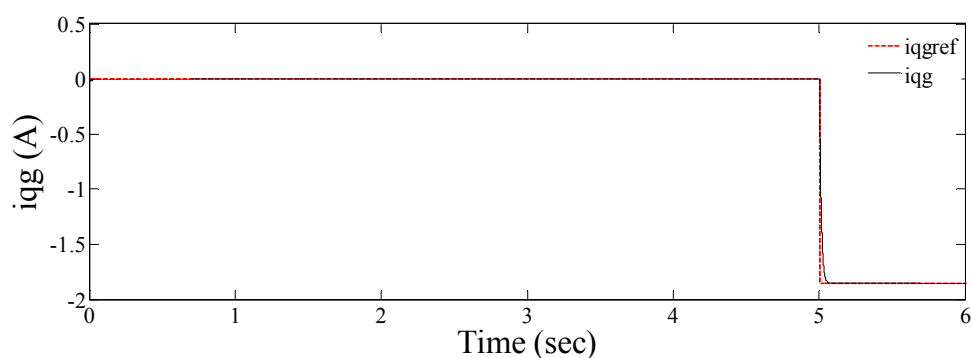
شکل (۴-۴۴): نمودار جریان  $i_{dr}$  و جریان مرجع آن  $i_{drref}$



شکل (۴-۴۵): نمودار جریان  $i_{qr}$  و جریان مرجع آن  $i_{qrref}$

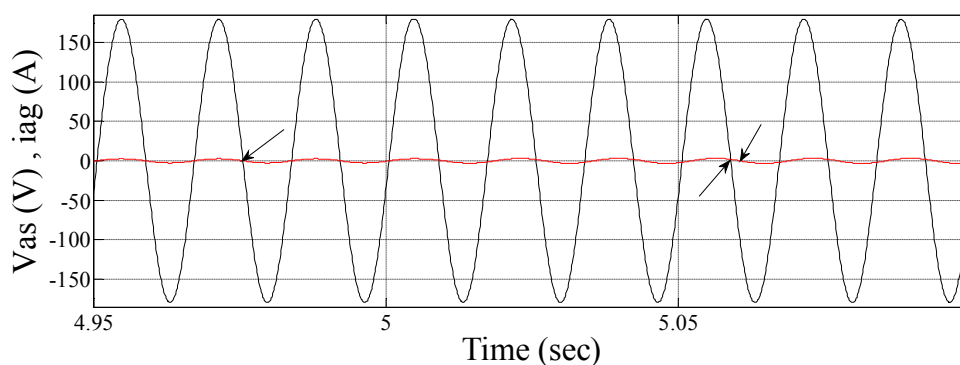


شکل (۴-۴۶): نمودار جریان  $i_{dg}$  و جریان مرجع آن  $i_{dgref}$



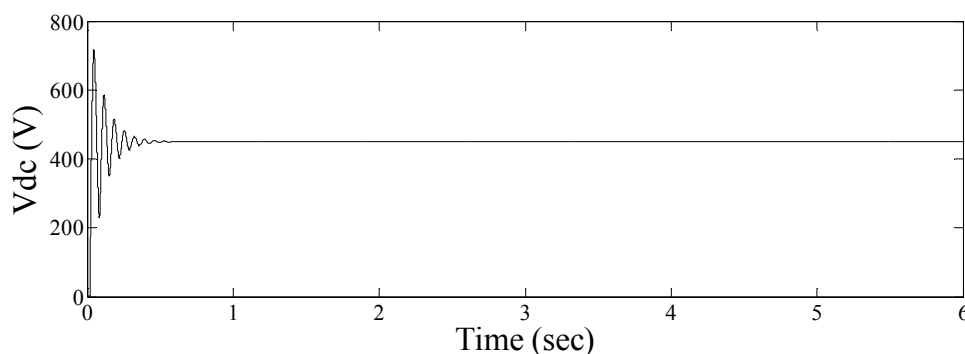
شکل (۴-۴۷): نمودار جریان  $i_{qg}$  و جریان مرجع آن  $i_{qgref}$

در شکل (۴-۴۸)، نمودارهای ولتاژ فاز a استاتور و نیز جریان خروجی از فاز a مبدل سمت شبکه برای زمان هایی که توان راکتیو مرجع خروجی از مبدل سمت شبکه تغییر می یابد نشان داده شده است. به طوریکه در ابتدا با توجه به صفر بودن توان راکتیو خروجی از این مبدل و نیز انتقال توان اکتیو از این مبدل به سمت شبکه، بنابراین بین ولتاژ و جریان فاز مورد نظر هیچگونه اختلاف فازی وجود ندارد. از طرفی در زمان  $t=5$  (sec)، این مبدل توان راکتیو (Var) ۵۰۰ را تولید می نماید که این امر منجر به پس فاز شدن جریان مذکور نسبت به ولتاژ استاتور می گردد. به طوریکه در شکل (۴-۴۸)، این اختلاف فاز بوجود آمده در زمان های بعد از  $t=5$  (sec)، به خوبی نمایان می باشد.

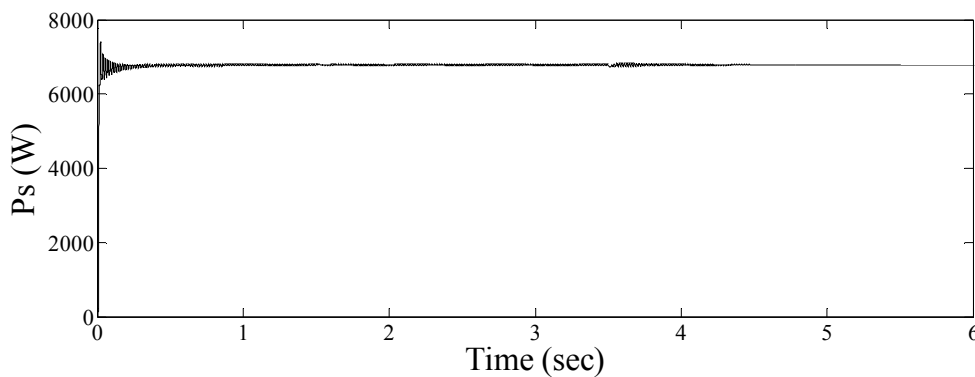


شکل (۴-۴۸): نمودارهای ولتاژ استاتور و جریان خروجی از مبدل سمت شبکه

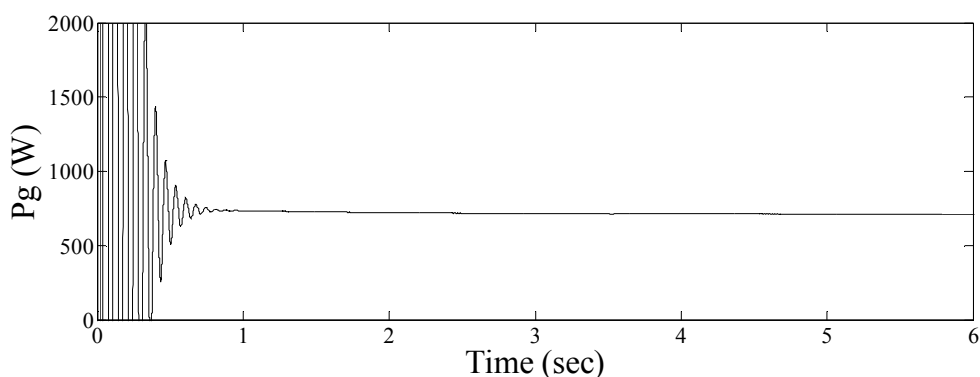
در ادامه، شکل های (۴-۴۹) – (۴-۵۲)، مستقل بودن کنترل توان های راکتیو را نسبت به کنترل ولتاژ DC-Link و نیز کنترل توان های اکتیو خروجی از استاتور و مبدل سمت شبکه، نشان می دهند. به طوریکه ولتاژ DC-Link و نیز توان های اکتیو خروجی از استاتور و مبدل سمت شبکه، در زمانهای تغییر توان های راکتیو خروجی از استاتور و مبدل سمت شبکه، هیچگونه تغییری نمی کنند.



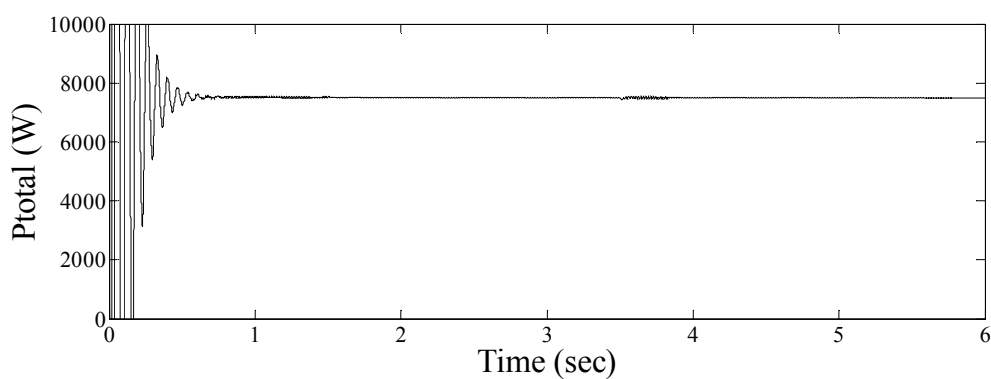
شکل (۴-۴۹): نمودار ولتاژ DC-Link



شکل (۴-۵۰): نمودار توان اکتیو خروجی از استاتور



شکل (۴-۵۱): نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه



شکل (۴-۵۲): نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG

#### ۴-۳- کنترل RSC و GSC در دستگاه dq همراه با بردار ولتاژ استاتور

در این دستگاه محور d دستگاه مرجع در راستای بردار ولتاژ استاتور می باشد که در اینصورت  $V_{ds}$  مقداری ثابت و  $V_{qs}$  صفر خواهد شد. در این دستگاه برای تخمین بردار ولتاژ استاتور ( $\theta_s$ ) کافی است که ولتاژهای سه فاز استاتور به دستگاه مرجع ساکن انتقال یابند و  $V_{\alpha s}$  و  $V_{\beta s}$  بدست آیند. به طوریکه محاسبه  $\theta_s$  در این دستگاه نسبت به دستگاه مرجع همراستا با بردار شار استاتور، ساده تر و البته دقیقتر خواهد بود و در نتیجه شرایط بهتری برای پیاده سازی کنترل برداری ایجاد می گردد. در این دستگاه، با تنظیم جریان  $i_{dr}$  برای کنترل گشتاور و توان اکتیو استاتور و نیز تنظیم جریان  $i_{qr}$  برای کنترل توان راکتیو استاتور، می توان گشتاور و توان اکتیو استاتور را بصورت کاملاً مستقل از توان راکتیو استاتور کنترل کرد. از طرفی نیز با توجه به پیاده سازی کنترل مبدل سمت شبکه در دستگاه مرجع همراستا با بردار ولتاژ استاتور، بنابراین کنترل این مبدل هیچ تفاوتی با روش قبل ندارد و می

توان ولتاژ DC-Link و توان راکتیو خروجی از GSC را به ترتیب با تنظیم جریان  $i_{dq}$  و جریان  $i_{qg}$  بصورت مستقل از هم کنترل نمود.

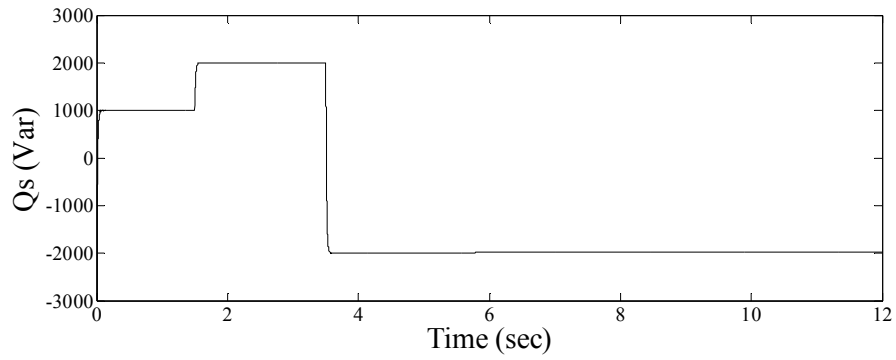
در ادامه به منظور مقایسه بین نتایج بدست آمده برای ۲ روش کنترلی، رفتار DFIG با اعمال کنترل بر روی مبدل های آن به روش فوق و در شرایط کاری بالای سرعت سنکرون و به ازای تغییرات گشتاور و توان های راکتیو استاتور، شبیه سازی و تشریح می گردد.

#### ۴-۳-۱- شرایط کاری در بالای سرعت سنکرون

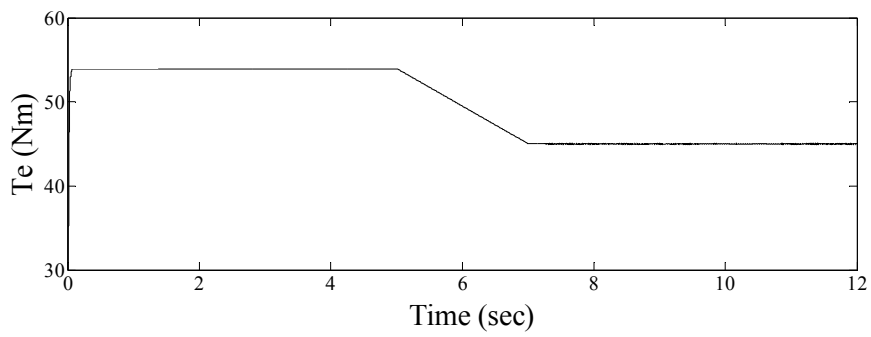
شرایط شبیه سازی در اینجا، دقیقاً مشابه با شرایط شبیه سازی در بخش (۴-۱-۱) می باشد به طوری که مدت زمان اجراء برنامه برای شبیه سازی رفتار DFIG مورد نظر در این شرایط کاری نیز، ۱۲ ثانیه می باشد.

در شکل های (۴-۵۳) و (۴-۵۴)، نمودار توان راکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی مطابق با مقادیر مرجعی که برای آن در نظر گرفته شده است نشان داده می شود. در اینجا نیز با دقت در این ۲ شکل، مستقل بودن کنترل گشتاور و توان راکتیو استاتور از یکدیگر مشاهده می گردد. همانطور که قبلاً اشاره شد، در واقع این کنترل مستقل با کنترل جریانهای  $i_{dr}$  و  $i_{qr}$  در دستگاه مرجع dq همراستا با بردار ولتاژ استاتور امکانپذیر می باشد.

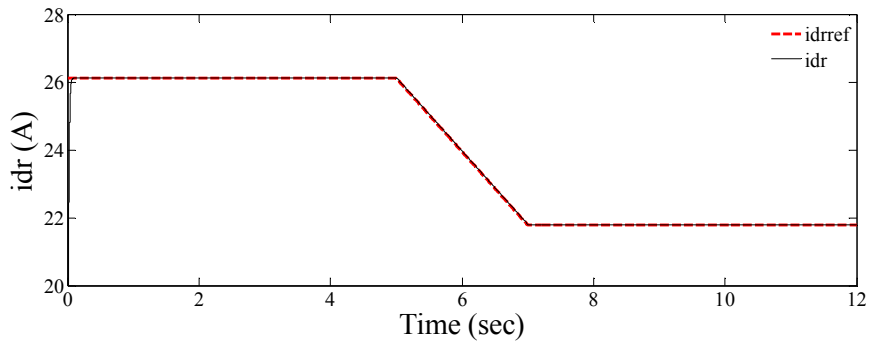
در این دستگاه، با تنظیم جریان های  $i_{dr}$  و  $i_{qr}$  می توان توان راکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی (توان اکتیو استاتور) را بصورت کاملاً مستقل از هم کنترل نمود به طوری که در شکل های (۴-۵۵) و (۴-۵۶)، منحنی جریانهای  $i_{dr}$  و  $i_{qr}$  به همراه جریانهای مرجع شان که بر اساس مقادیر مرجع توان راکتیو استاتور و گشتاور محاسبه شده اند نمایش داده می شود. در اینجا نیز با توجه به این نمودارها، مستقل بودن کنترل گشتاور و توان راکتیو استاتور به خوبی مشاهده می گردد.



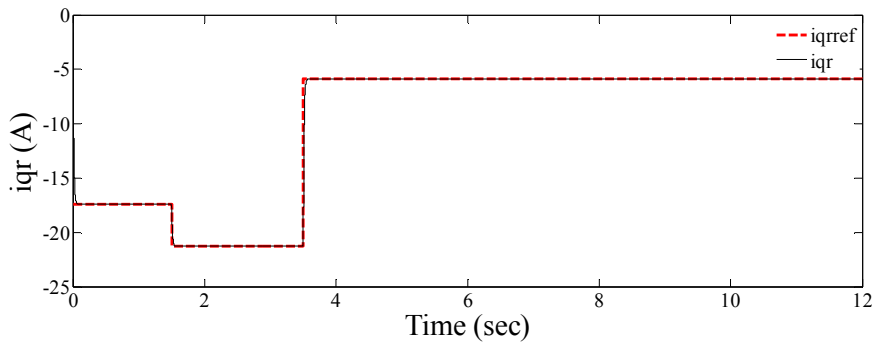
شکل (۴-۵۳): نمودار توان راکتیو استاتور



شکل (۴-۵۴): نمودار گشتاور الکترومغناطیسی



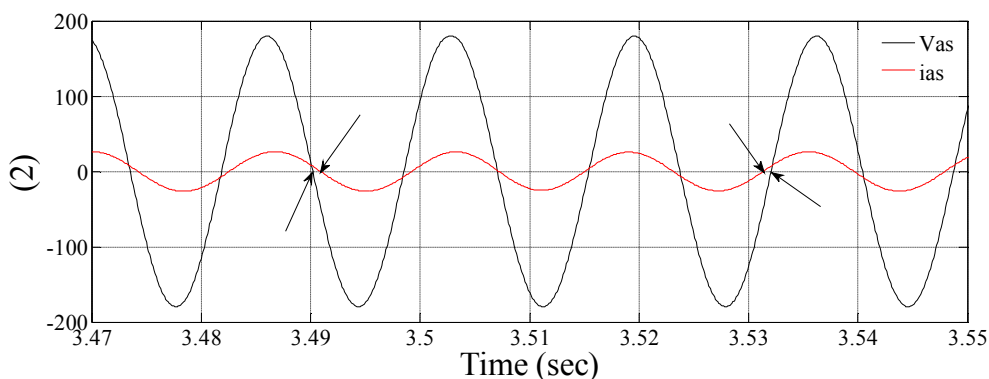
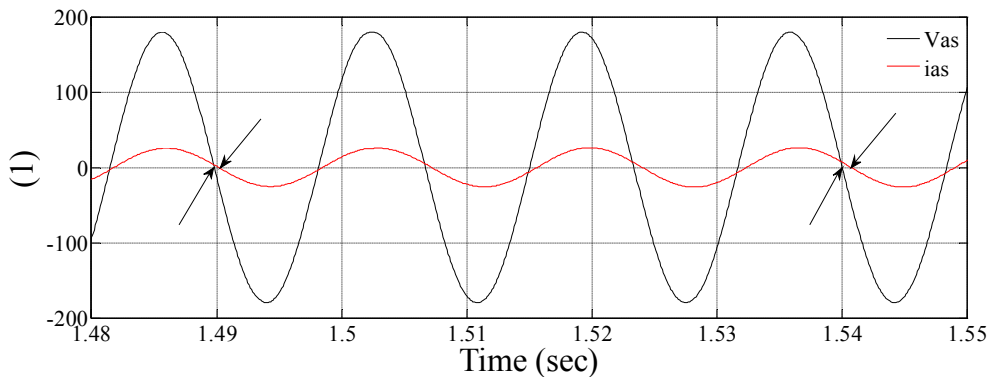
شکل (۴-۵۵): نمودار جریان  $i_{dr}$  و جریان مرجع آن  $i_{drref}$



شکل (۴-۵۶): نمودار جریان  $i_{qr}$  و جریان مرجع آن  $i_{qrref}$



در شکل (۴-۵۷)، نمودارهای ولتاژ و جریان خروجی از استاتور برای زمان هایی که توان راکتیو مرجع استاتور تغییر می یابد نشان داده شده است. در اینجا نیز منحنی های بدست آمده برای ولتاژ و جریان، مشابه با منحنی های بدست آمده در شکل های (۴-۵) و (۴-۲۵) می باشد.

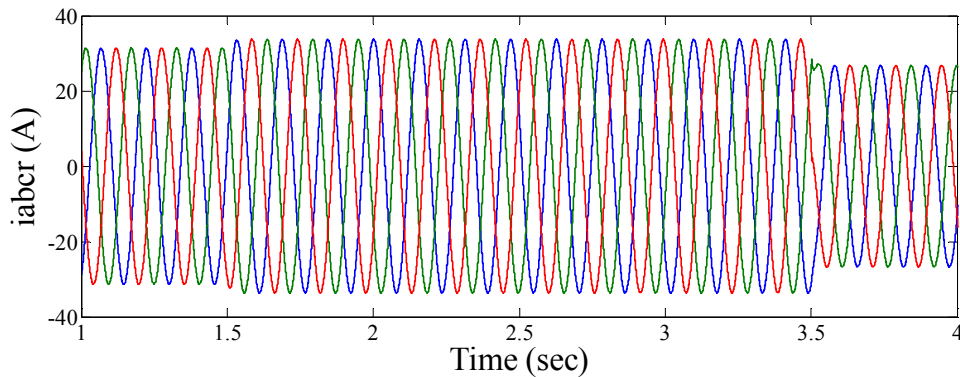


شکل (۴-۵۷): نمودارهای ولتاژ و جریان خروجی از استاتور

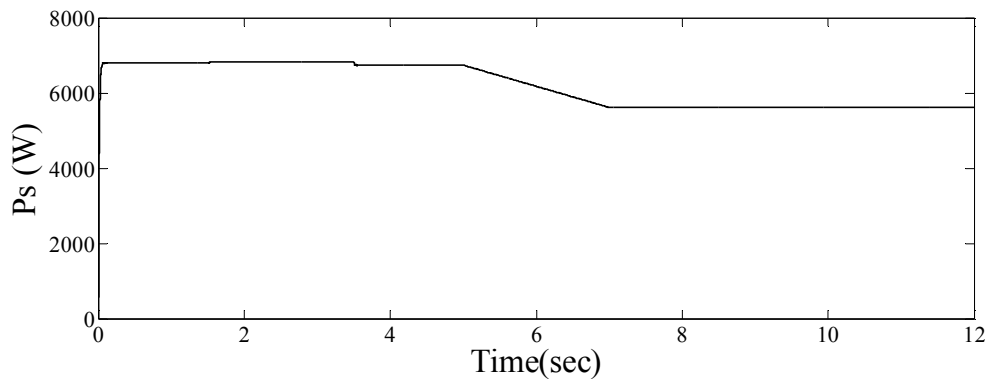
در شکل (۴-۵۸)، نمودار جریان های سه فاز روتور، برای زمان هایی که توان راکتیو مرجع استاتور تغییر می یابد نشان داده شده است. در این شکل، ثابت بودن فرکانس جریان های روتور با توجه به ثابت بودن گشتاور الکترومغناطیسی و در نتیجه عدم تغییر سرعت و لغزش روتور، به خوبی مشهود می باشد و فقط دامنه جریانها با توجه به تغییر توان راکتیو استاتور، تغییر می یابد.

در شکل (۴-۵۹)، نمودار توان اکتیو خروجی از استاتور نشان داده شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد، با تنظیم جریان  $i_{dr}$  می توان گشتاور الکترومغناطیسی و در نتیجه میزان توان دریافتی از باد توسط توربین بادی و توان اکتیو خروجی از استاتور را به صورت کاملاً مستقل از توان راکتیو آن کنترل نمود به طوریکه این امر در شکل (۴-۵۹) کاملاً مشهود می باشد. در شکل های (۴-۶۰) و (۴-۴)

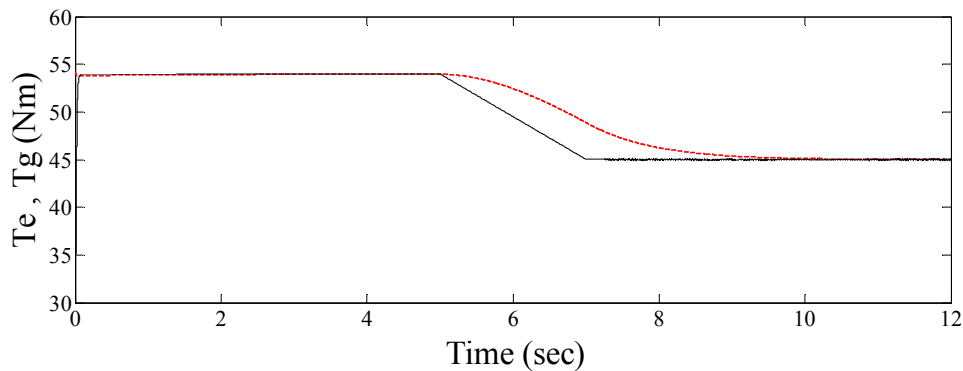
۶۱)، روند تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور توربین و نیز سرعت الکتریکی روتور نشان داده شده است و از طرفی نیز افزایش فرکانس جریانهای روتور با توجه به افزایش سرعت روتور به خوبی در شکل (۴-۶۲) مشهود می باشد.



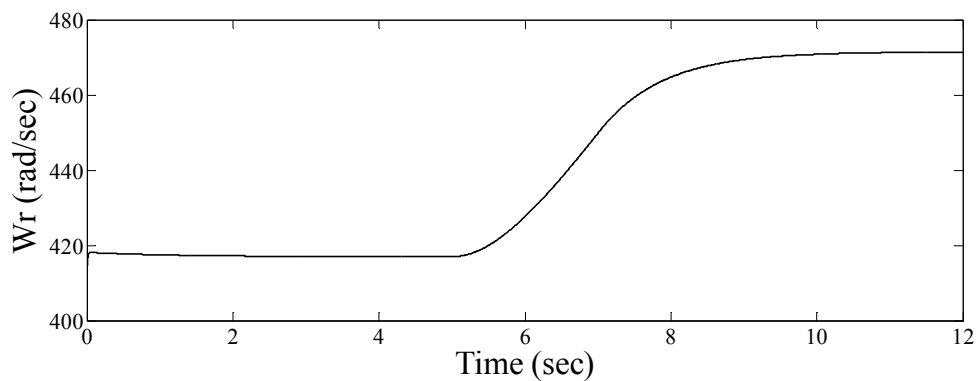
شکل (۴-۵۸): نمودارهای جریان های سه فاز روتور برای زمانهایی که توان راکتیو استاتور تغییر می یابد



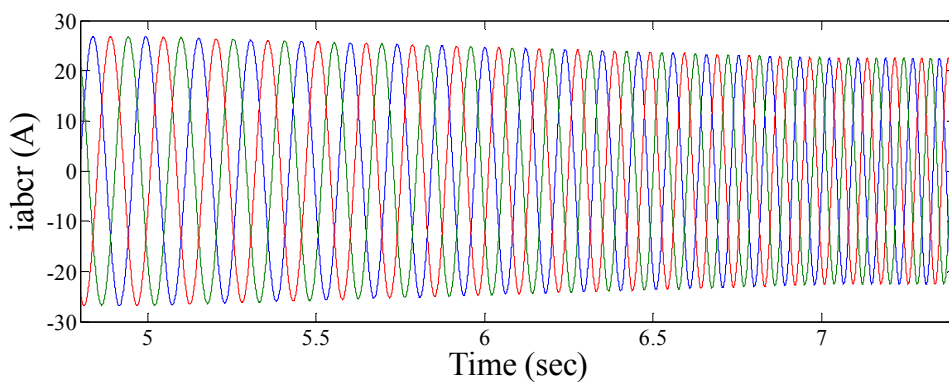
شکل (۴-۵۹): نمودار توان اکتیو استاتور



شکل (۴-۶۰): نمودار گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ ) و گشتاور توربین ( $T_g$ )

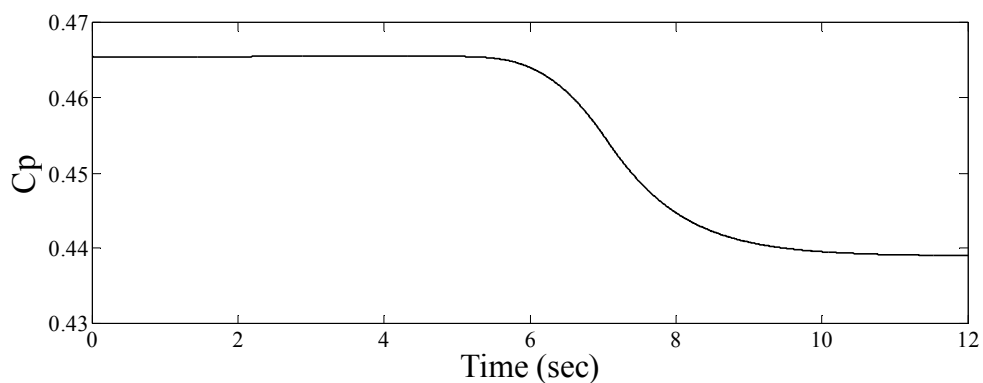


شکل (۴-۶۱): نمودار سرعت الکتریکی روتور

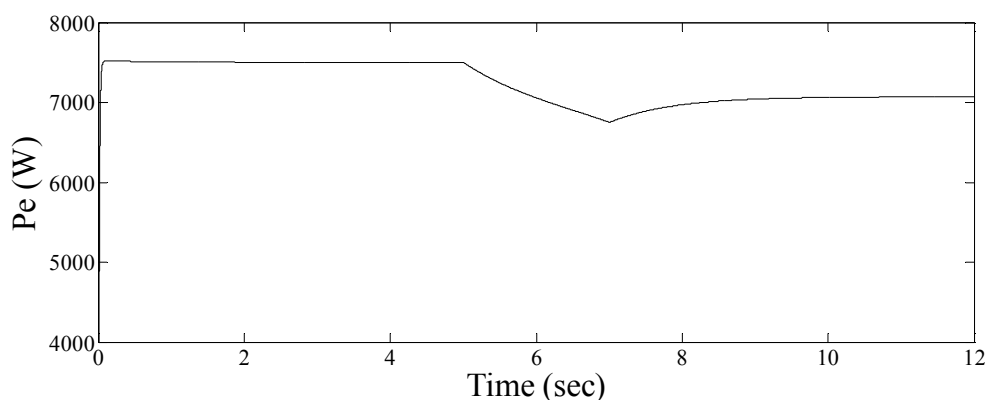


شکل (۴-۶۲): نمودارهای جریان های سه فاز روتور برای زمانهایی که گشتاور تغییر می یابد

با کاهش گشتاور توربین، میزان توان دریافتی از انرژی باد توسط توربین باد کاهش می یابد که این امر در شکل های (۶۳) و (۶۴) به خوبی مشهود می باشد.

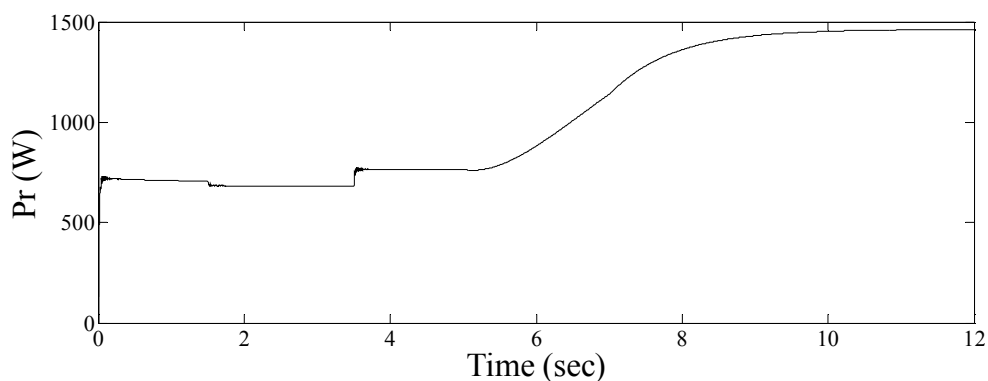


شکل (۴-۶۳): نمودار ضریب کارایی (Coefficient of Performance)

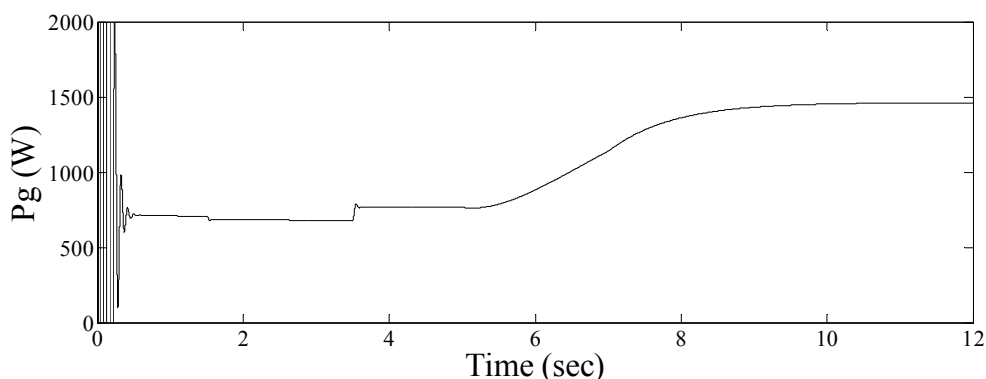


شکل (۴-۶۴): نمودار توان اکتیو دریافتی از باد توسط توربین بادی

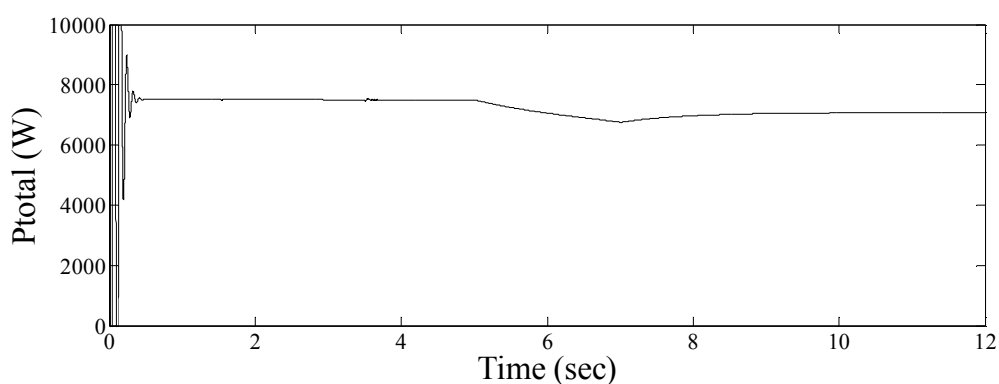
شکل های (۴-۶۵) و (۴-۶۶)، نمودارهای توان اکتیو انتقالی از روتور به سمت مبدل سمت روتور و توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه را نشان می دهند. با توجه به اینکه خازن DC-Link هیچگونه توان اکتیوی مصرف نمی کند بنابراین با صرف نظر کردن از تلفات مبدلها، نمودارهای توان های اکتیو مذکور شبیه یکدیگر می باشند که در حالت دائمی دامنه آنها با هم برابر می گردد. مجموع توان های اکتیو خروجی از استاتور و مبدل سمت شبکه، توان اکتیو کل خروجی از DFIG را نتیجه می دهد که در شکل (۴-۶۷)، نمودار توان اکتیو کل نشان داده شده است.



شکل (۴-۶۵): نمودار توان اکتیو انتقالی از روتور به سمت مبدل سمت روتور

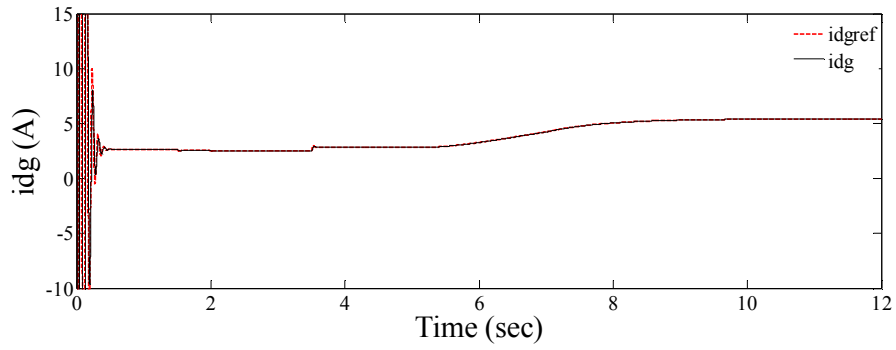


شکل (۴-۶۶): نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه

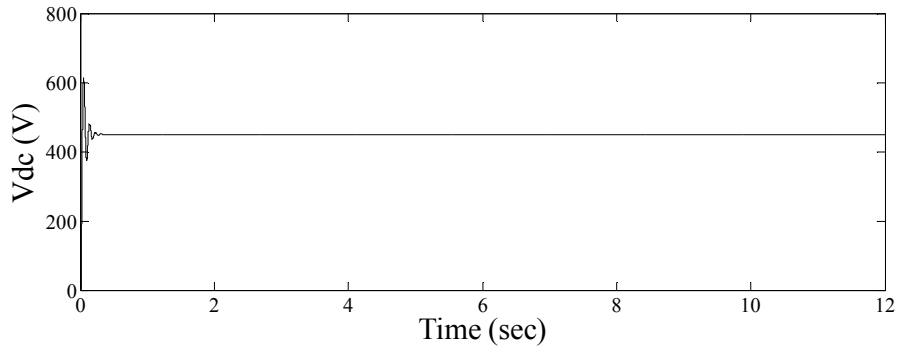


شکل (۴-۶۷): نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG

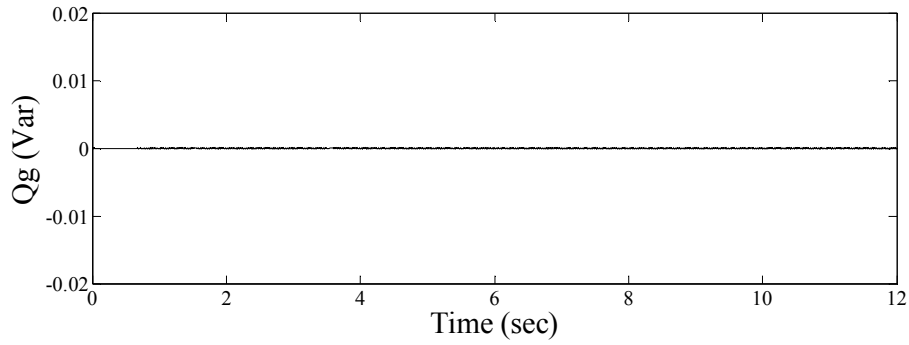
در شکل های (۴-۶۸) و (۴-۶۹)، نمودار جریان  $i_{dg}$  و ولتاژ DC-Link نشان داده شده است. به طوریکه با تنظیم جریان  $i_{dg}$  و ولتاژ خازن DC-Link به صورت مستقل از اندازه و جهت توان اکتیو انتقالی بین شبکه و روتور، به اندازه (V) ۴۵۰ شارژ شده است. همچنین با توجه به شکل های (۴-۷۰) و (۴-۷۱)، با تنظیم جریان  $i_{qg}$  توان راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه در مقدار صفر تنظیم گردیده است در نتیجه ضریب توان خروجی از این مبدل ۱ می باشد. که با توجه به مثبت بودن توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه، بنابراین بین ولتاژ استاتور و جریان خروجی از مبدل هیچگونه اختلاف فازی وجود ندارد که این امر در شکل (۴-۷۲) به خوبی نشان داده می شود.



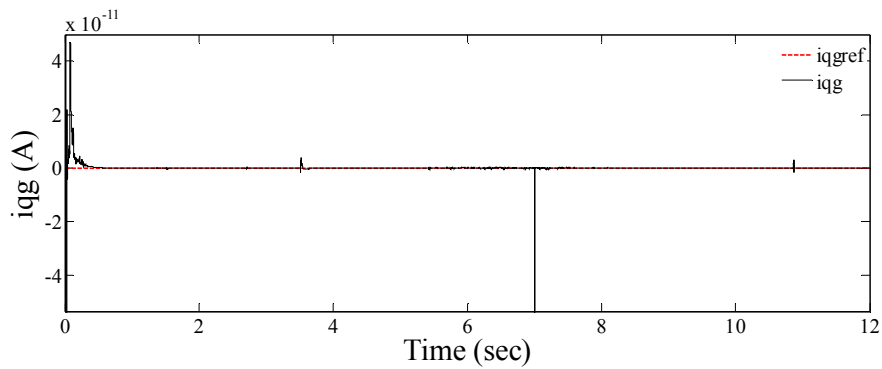
شکل (۴-۶۸): نمودار جریان  $i_{dg}$  و جریان مرجع آن  $i_{dgref}$



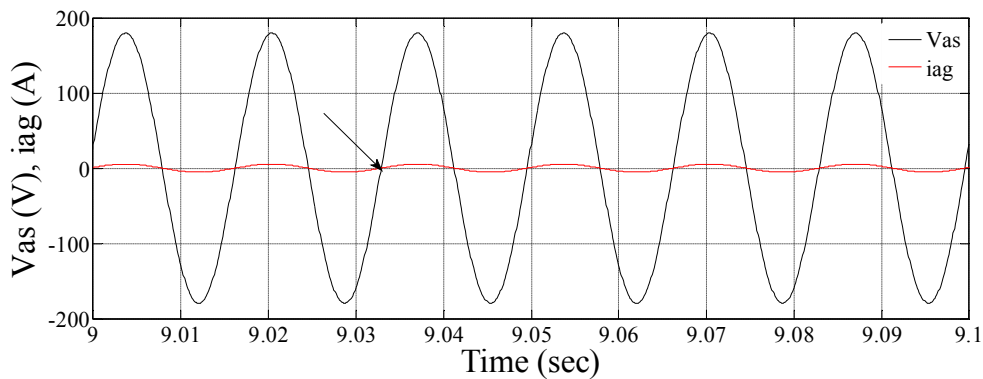
شکل (۴-۶۹): نمودار ولتاژ DC-Link



شکل (۴-۷۰): نمودار توان راکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه



شکل (۴-۷۱): نمودار جریان  $i_{qg}$  و جریان مرجع آن  $i_{qgref}$



شکل (۴-۷۲): نمودارهای ولتاژ استاتور و جریان خروجی از مبدل سمت شبکه

نکته قابل توجه برای نتایج بدست آمده در این روش، این است که این نتایج با نتایج بدست آمده در روش کنترل قبلی (کنترل RSC و GSC به ترتیب در دستگاه های dq همراه با بردار شار و ولتاژ استاتور)، بسیار مشابه می باشند. از طرفی با توجه به اینکه هیچگونه عملیات انتگرالگیری برای محاسبه  $\theta_s$  در دستگاه همراه با بردار ولتاژ استاتور، صورت نمی گیرد بنابراین تخمین زاویه فوق ساده تر و البته دقیقتر می باشد و با خطای کمتری همراه خواهد بود. همچنین برای تخمین زاویه بردار شار استاتور، بایستی مقدار دقیق مقاومت استاتور مشخص گردد تا با توجه به رابطه (۲-۴۲) این زاویه محاسبه شود. اما این امر نیز با توجه به دقیق نبودن مقدار مقاومت استاتور و تغییر مقدار آن به مرور زمان، می تواند منجر به ایجاد خطا در تخمین زاویه بردار شار استاتور گردد. لذا پیاده سازی کنترل RSC در دستگاه مرجع همراه با ولتاژ استاتور می تواند نتایج مطلوب تری را به همراه داشته باشد.

# فصل پنجم

شبیه سازی عملکرد و کنترل

ژنراتور القایی تغذیه دابل در

شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه



## ۵-۱- مقدمه

در این بخش به کمک شبیه سازی، رفتار یک ژنراتور القایی تغذیه دوپل (KW) ۷/۵ در شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه، مورد بررسی قرار می گیرد. سپس برای بهبود رفتار DFIG، از یکی از روشهای کنترل هماهنگ مبدلها در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه و استاتور، استفاده می گردد. در این روش نوسانات گشتاور و توان اکتیو خروجی از DFIG حذف می گردند به طوریکه این روش برای ۲ حالت زیر پیاده سازی و شبیه سازی می گردد:

۱- کنترل RSC و GSC به ترتیب در دستگاه های dq همراستا با بردار شار و ولتاژ استاتور

۲- کنترل RSC و GSC در دستگاه dq همراستا با بردار ولتاژ استاتور

در انتها نیز به بررسی و مقایسه نتایج شبیه سازی بدست آمده برای سایر روشهای کنترل هماهنگ مبدلها پرداخته می شود.

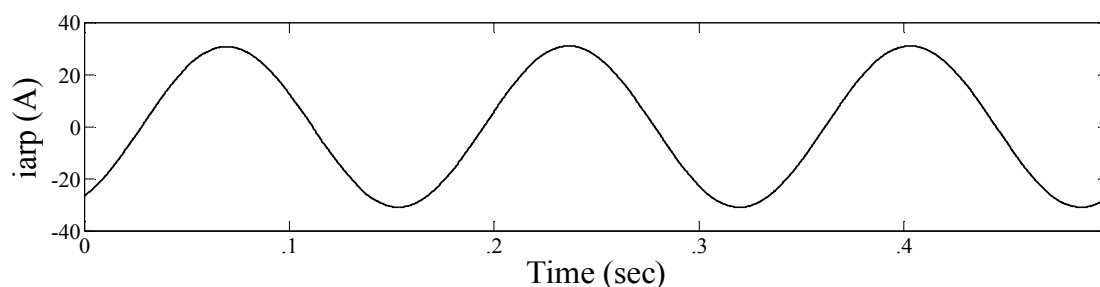
## ۵-۲- رفتار DFIG در شرایط نامتعادلی ولتاژ استاتور

در ابتدا عملکرد یک ژنراتور القایی تغذیه دوپل متصل به توربین بادی، با مشخصاتی که در جدول (۴-۱)، ارائه گردید، در شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه و با در نظر گرفتن کنترل متداول مبدل ها برای شرایط متعادل و بدون کنترل جریانهای توالی منفی، شبیه سازی می گردد. سپس با توجه به نتایج شبیه سازی بدست آمده، رفتار آن مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

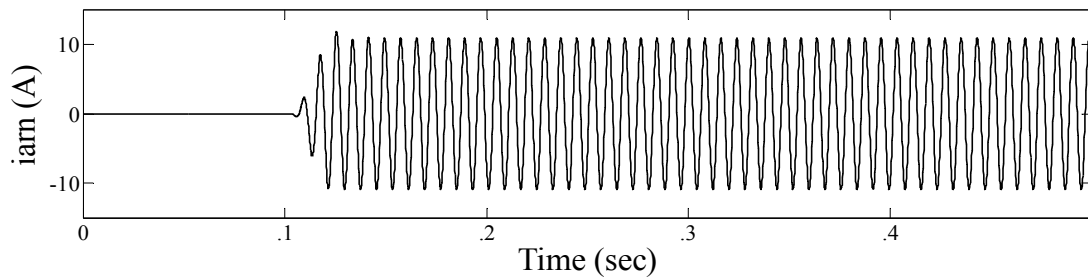
به طوریکه در زمان  $t = 0.1$  (sec) ولتاژ شبکه (پایانه های DFIG) به اندازه ۵٪ نامتعادل می گردد. در این شرایط فقط جریانهای توالی مثبت روتور و نیز جریانهای توالی مثبت خروجی از مبدل سمت شبکه، مطابق با روش هایی که برای کنترل DFIG در شرایط متعادل وجود دارد، کنترل می گردند. بنابراین تحت این شرایط، هیچگونه کنترلی بر روی جریانهای توالی منفی روتور و مبدل سمت شبکه صورت نمی گیرد.

در این شرایط جریان توالی مثبت روتور دارای فرکانس لغزش مثبت  $(\omega_r - \omega_s)$  می باشد به طوریکه با توجه به فرکانس ۶۰ هرتز شبکه و نیز لغزش سرعت روتور به اندازه ۰/۱ در بالای سرعت سنکرون، بنابراین فرکانس جریان های توالی مثبت روتور ۶ هرتز خواهد بود. از طرفی جریان توالی منفی روتور نیز دارای فرکانس لغزش توالی منفی  $(\omega_r + \omega_s)$  می باشد به طوریکه فرکانس این جریان ۱۲۶ هرتز خواهد بود. نمودارهای جریان توالی مثبت و منفی فاز (a) روتور در شکل های (۱-۵) و (۲-۵)، به خوبی بیانگر این موضوع می باشند. با توجه به قابل ملاحظه بودن دامنه جریان توالی مثبت روتور نسبت به دامنه جریان توالی منفی آن، بنابراین جریان توالی مثبت به عنوان مؤلفه اصلی جریان روتور محسوب می شود که جریان توالی منفی بر روی آن نوسان می کند و جریان روتور را ایجاد می کنند. در شکل (۳-۵)، نمودار جریان فاز (a) روتور بدست آمده از حاصل جمع جریانهای توالی مثبت و منفی فاز (a) روتور، نمایش داده شده است و در شکل (۴-۵) نیز، نمودار کل جریانهای سه فاز روتور نشان داده می شود.

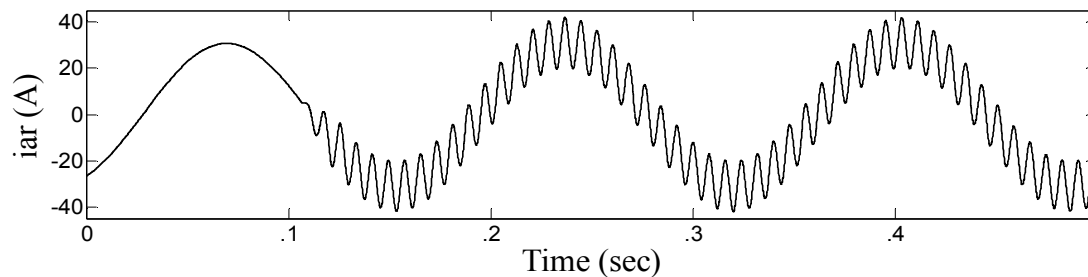
با توجه به شکل (۵-۵)، نامتعادلی ولتاژ منجر به نامتعادل شدن شدید جریان های سه فاز استاتور  $(i_{abcs})$  گردیده است و همانگونه که قبلاً اشاره شده است این جریانهای نامتعادل بالا، باعث افزایش نامتعادل حرارت سیم پیچ های ماشین می گردد و در نتیجه اثرات مخربی بر سیم پیچ ها و عایق و هسته ماشین می گذارد.



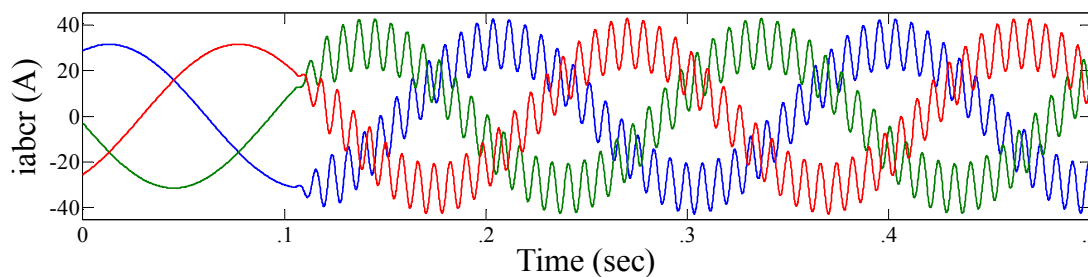
شکل (۱-۵): نمودار جریان توالی مثبت فاز a سیم پیچ روتور



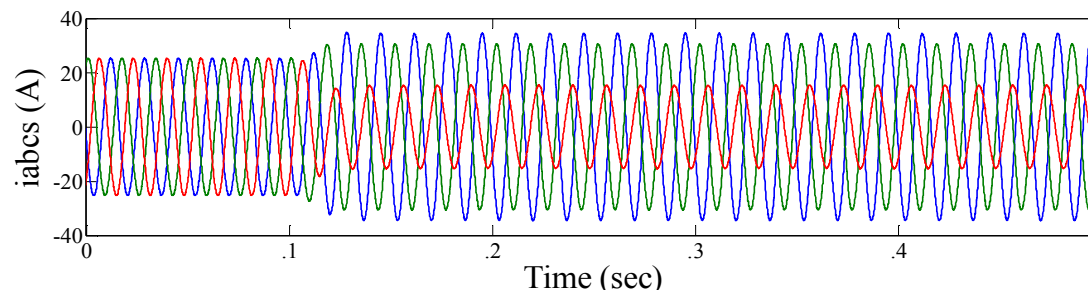
شکل (۲-۵): نمودار جریان توالی منفی فاز a سیم پیچ روتور



شکل (۳-۵): نمودار جریان فاز a سیم پیچ روتور



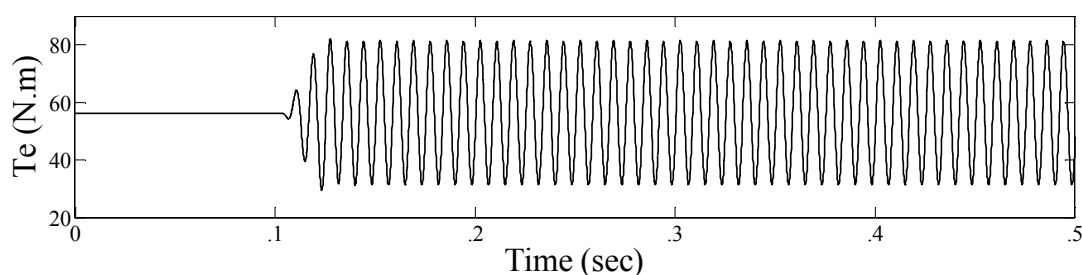
شکل (۴-۵): نمودار جریانهای سه فاز روتور



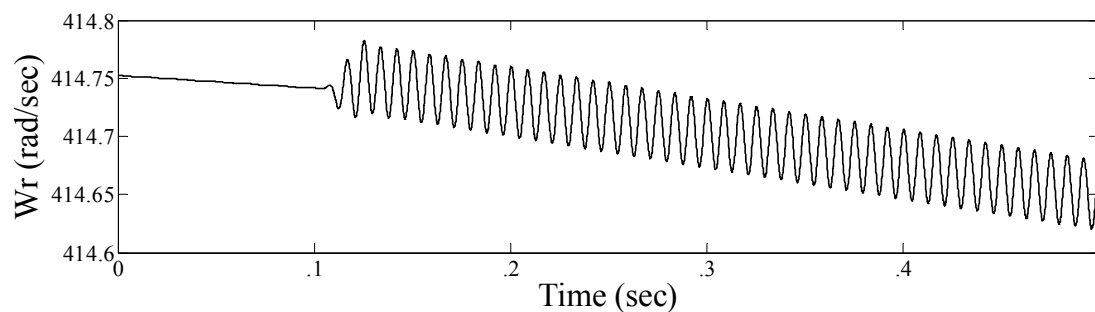
شکل (۵-۵): نمودار جریانهای سه فاز استاتور

جریانهای نامتعادل استاتور و روتور، نوساناتی با دامنه زیاد و با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه (Hz ۱۲۰) در گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ ) بوجود می آورند. نوسانات گشتاور نیز منجر به نوسان سرعت روتور می گردد ولی با توجه به اینرسی بالای روتور که متصل به محور توربین می باشد اثر نوسانات گشتاور بر روی سرعت روتور ناچیز می باشد. به طوریکه در شکل های (۶-۵) و (۷-۵)، نوسانات

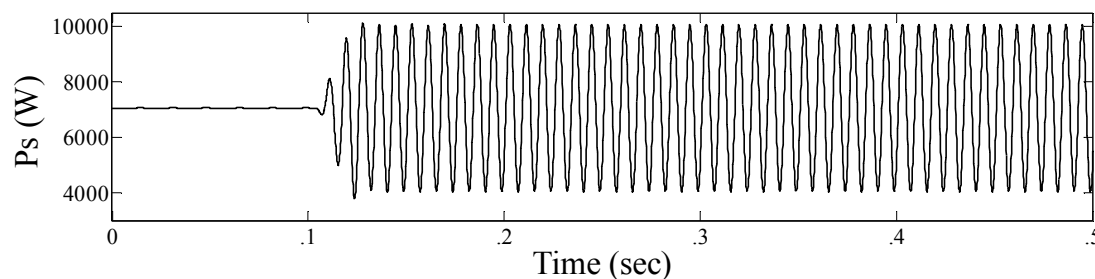
بوجود آمده در گشتاور و سرعت روتور مشهود می باشد. اما نامتعادلی جریانهای استاتور و روتور همچنین باعث ایجاد نوسانات با دامنه زیاد و با فرکانس (Hz) ۱۲۰ در توان های اکتیو و راکتیو خروجی از استاتور نیز می گردد (شکل (۵-۸) و (۵-۹)) و از طرفی نامتعادلی ولتاژ نیز بر مبدل سمت شبکه اثر گذاشته و باعث ایجاد نوسان در توان اکتیو خروجی از آن و نیز ولتاژ DC-Link می گردد (شکل (۵-۱۰) و (۵-۱۱)). حال با توجه به شکل (۵-۱۲)، نوسانات توانهای اکتیو خروجی از استاتور و مبدل سمت شبکه، باعث می گردند که توان اکتیو کل خروجی از DFIG نیز دارای نوساناتی ۱۲۰ هرتز و با دامنه زیاد باشد.



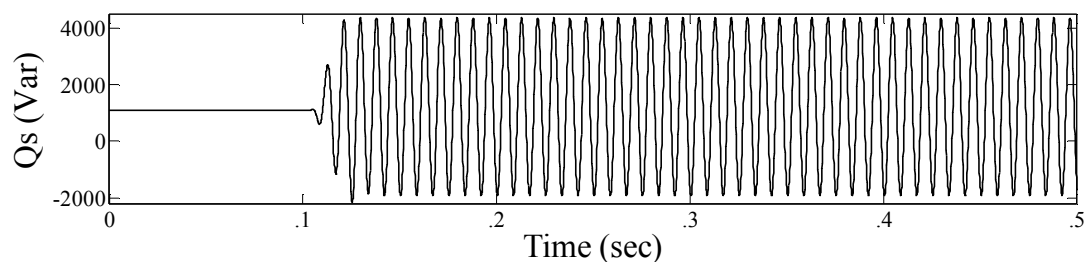
شکل (۵-۶): نمودار گشتاور الکترو مغناطیسی



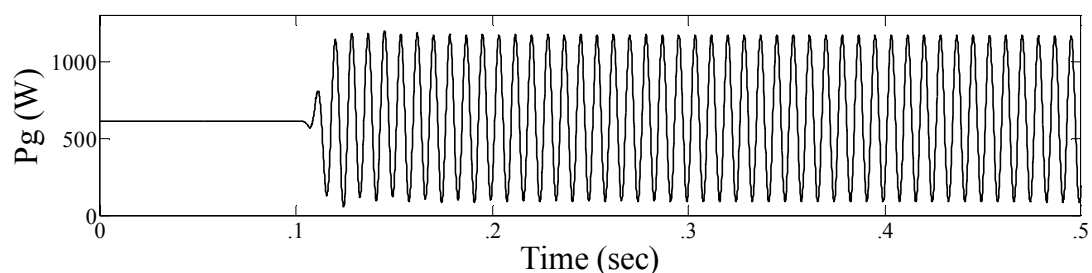
شکل (۵-۷): نمودار سرعت الکتریکی روتور



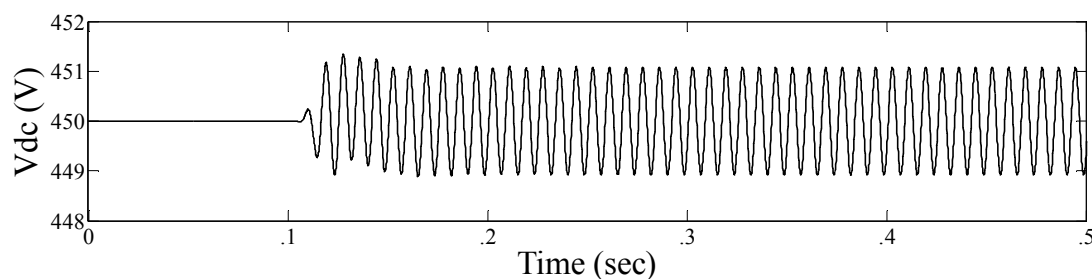
شکل (۵-۸): نمودار توان اکتیو خروجی از استاتور



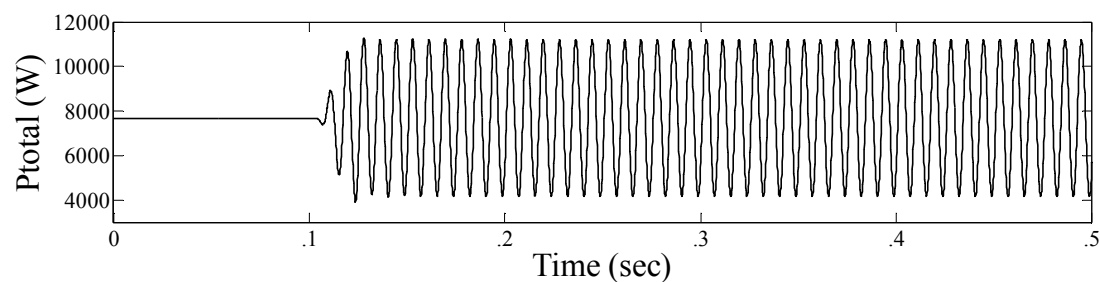
شکل (۹-۵): نمودار توان راکتیو خروجی از استاتور



شکل (۱۰-۵): نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه



شکل (۱۱-۵): نمودار ولتاژ DC-Link



شکل (۱۲-۵): نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG

### ۵-۳- کنترل هماهنگ مبدل ها در شرایط نامتعادلی ولتاژ استاتور

همانطور که در فصل (۳) اشاره شد، در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه و استاتور ماشین، برای کنترل جریانهای توالی منفی توسط مبدل های سمت روتور و شبکه، می توان اهداف گوناگونی برای هر یک

از مبدل ها، در نظر گرفت. به طوریکه از ترکیب این اهداف کنترلی برای کنترل این مبدل ها، روش های گوناگونی برای کنترل هماهنگ آنها در این شرایط، بدست می آید. در این بخش، در ابتدا در مورد یکی از این روش ها بحث می گردد، به طوریکه روش مذکور برای ۲ حالت و با پیاده سازی در دستگاههای مرجع مختلف، برای بهبود رفتار DFIG، شبیه سازی می گردد. در انتها نیز به بررسی و مقایسه سایر روشهای کنترل هماهنگ مبدلها برای بهبود رفتار DFIG در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه و استاتور ماشین، پرداخته می شود.

### ۵-۳-۱- از بین بردن نوسانات گشتاور و توان اکتیو کل خروجی از DFIG

همانطور که اشاره شد، در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه، در گشتاور الکترومغناطیسی نوساناتی سینوسی با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه ظاهر می گردد که این گشتاور نوسانی، تنشهای مکانیکی شدیدی را در پره های توربین و شفت روتور و گیربکس بوجود می آورد. برای به حداقل رساندن این نوسانات، مؤلفه های توالی منفی ولتاژ و جریان روتور در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$ ، توسط مبدل سمت روتور کنترل می گردند. از طرفی نیز، برای از بین بردن نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG، کافی است که نوسانات توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه، نوسانات متناظر با خود در توان اکتیو خروجی استاتور را خنثی سازند. که این امر نیز با کنترل ولتاژ و جریان توالی منفی خروجی از مبدل سمت شبکه، توسط مبدل مذکور صورت می گیرد.

حال با توجه به اینکه برای کنترل و مدلسازی مبدل سمت روتور و ماشین می توان از ۲ دستگاه همراستا با بردار شار توالی مثبت استاتور و یا دستگاه همراستا با ولتاژ توالی مثبت استاتور استفاده کرد بنابراین ۲ حالت برای پیاده سازی این روش بدست می آید. در ادامه به بررسی نتایج شبیه سازی بدست آمده برای ۲ حالت فوق، پرداخته می شود.

### ۵-۳-۱-۱- کنترل RSC و GSC به ترتیب در دستگاه های dq همراستا با بردار شار و

#### ولتاژ استاتور

برای کنترل DFIG در این شرایط، مؤلفه های توالی مثبت و منفی ولتاژ و جریان، در ۲ دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  و منفی  $(dq)^-$  کنترل می شوند. برای کنترل مبدل سمت روتور در دستگاه مرجع همراستا با بردار شار توالی مثبت استاتور، محور d دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$  در راستای بردار مذکور، در نظر گرفته می شود به طوریکه زاویه بین محور d دستگاه مذکور و محور  $\alpha$  دستگاه مرجع ساکن  $\alpha, \beta$  و  $\theta_s$  و از طرفی زاویه بین محور d دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$  و محور  $\alpha$  دستگاه مرجع ساکن  $\alpha, \beta, -\theta_s$  خواهد بود.

همچنین برای کنترل مبدل سمت شبکه در دستگاه مرجع همراستا با بردار ولتاژ توالی مثبت استاتور، محور d دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$  در راستای بردار مذکور در نظر گرفته می شود به طوریکه زاویه بین محور d دستگاه مذکور و محور  $\alpha$  دستگاه مرجع ساکن  $\alpha, \beta, \theta_g$  و زاویه بین محور d دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$  و محور  $\alpha$  دستگاه مرجع ساکن  $\alpha, \beta, -\theta_g$  خواهد بود.

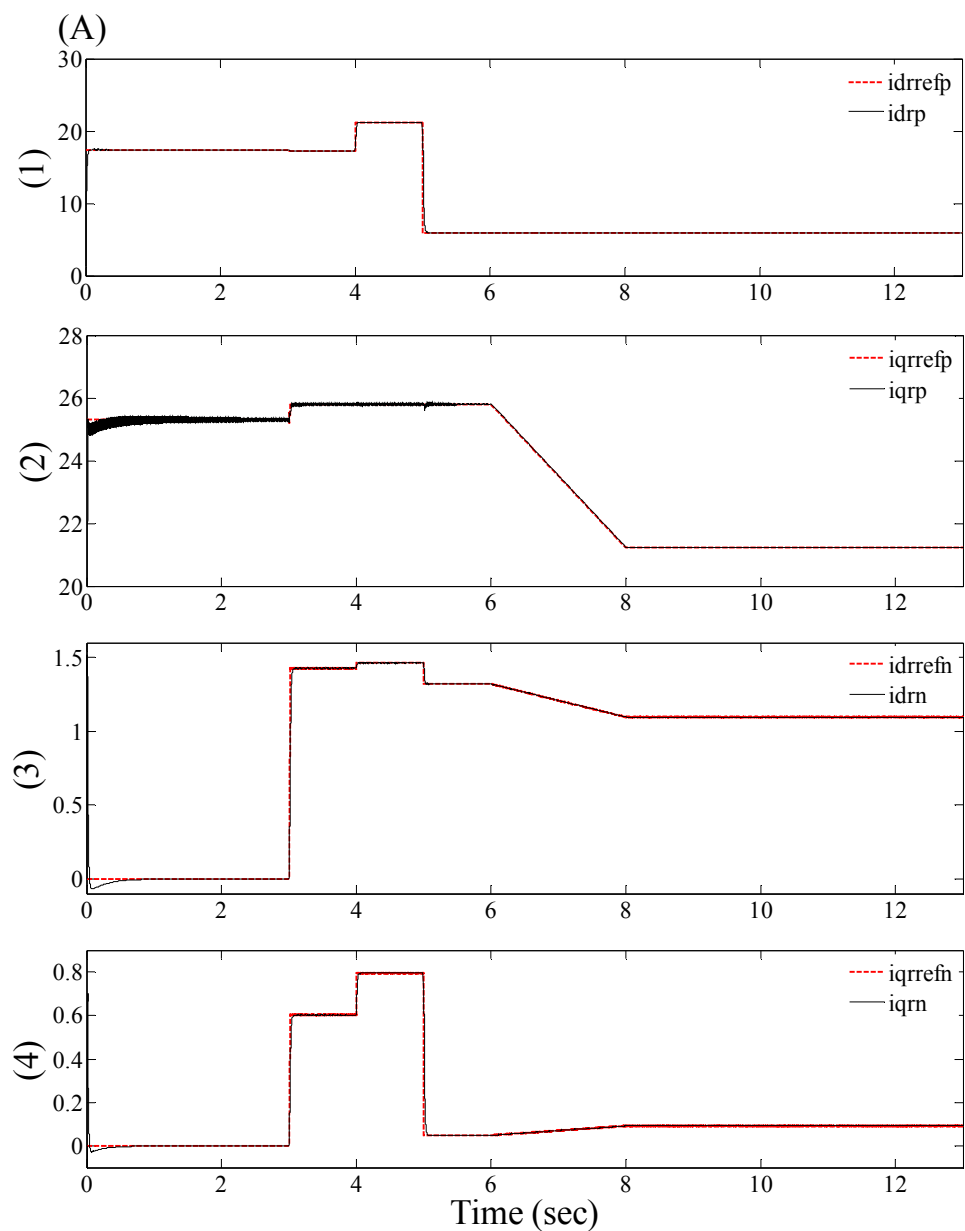
در این شرایط، اهداف اصلی کنترلی با کنترل مؤلفه های توالی مثبت ولتاژ و جریان در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$  برآورده می شوند و با کنترل مؤلفه های توالی منفی ولتاژ و جریان خروجی از روتور و مبدل سمت شبکه در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$ ، نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی و نیز نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG حذف می گردند.

مدت زمان اجراء برنامه برای شبیه سازی رفتار DFIG در این شرایط کاری، ۱۳ ثانیه می باشد. در این شرایط سرعت ژنراتور برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد، در لغزش ۰/۱ (سرعت (rpm) ۱۳۲۰) و در بالای سرعت سنکرون تنظیم شده است. به طوریکه در ابتدا ولتاژهای پایانه ماشین متعادل و گشتاور مرجع برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد ۵۴/۲۸ (N.m) و توان راکتیو مرجع استاتور نیز (Var) ۱۰۰۰ در نظر گرفته می شوند. در زمان  $t=3$  (sec)، ولتاژهای پایانه ماشین به اندازه ۵٪ نامتعادل می شود که با کنترل مؤلفه های توالی منفی ولتاژ و جریان با توجه به اهدافی که برای کنترل آنها در این

روش در نظر گرفته شده است، رفتار DFIG بهبود می یابد. با توجه به اینکه کنترل DFIG باید به گونه ای باشد که علاوه بر بهبود رفتار آن در شرایط نامتعادل ولتاژ، اهداف اصلی کنترلی را نیز تأمین کند بنابراین در ادامه، با وجود نامتعادلی ولتاژ ۵٪ در پایانه های استاتور، رفتار آن به ازای تغییرات گشتاور و توان راکتیو استاتور نیز مورد بررسی قرار می گیرد. به طوریکه در زمان  $t=4$  (sec) توان راکتیو مرجع استاتور از  $1000$  (Var) به  $2000$  (Var) تغییر می یابد و از طرفی مقدار گشتاور مرجع هیچگونه تغییری نمی یابد. در زمان  $t=5$  (sec) توان راکتیو از  $2000$  (Var) به  $-2000$  (Var) تغییر می یابد ولی همچنان مقدار گشتاور مرجع ثابت است تا اینکه در بازه زمانی  $t=6$  (sec) الی  $t=8$  (sec) گشتاور مرجع با شیب  $(45-54)/2$  از  $54/28$  (N.m) به  $45$  (N.m) تغییر می یابد. در تمامی مدت زمان شبیه سازی، ولتاژ DC-Link به اندازه  $450$  (V) و توان راکتیو مرجع خروجی از مبدل سمت شبکه به سمت شبکه نیز صفر در نظر گرفته شده است.

در شکل (۵-۱۳)، نمودار های بدست آمده برای جریانهای dq توالی مثبت و منفی روتور به همراه جریانهای مرجع مربوطه در شرایط نامتعادلی ولتاژ استاتور، نشان داده شده است. تحت این شرایط، جریان مرجع  $i_{dr}^{+*}$  با توجه به مقدار توان راکتیو مرجع خروجی از استاتور و جریان مرجع  $i_{qr}^{+*}$  نیز با توجه به گشتاور الکترومغناطیسی مرجع برای دریافت حداکثر توان از انرژی باد، تعیین می گردد (شکل (۵-۱۳-۱) و (۵-۱۳-۲)). از طرفی نیز برای از بین بردن نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی، جریانهای مرجع  $i_{dr}^{-*}$  و  $i_{qr}^{-*}$  مطابق با آنچه که در فصل (۳) تعریف شد محاسبه شده اند (شکل (۵-۱۳-۳) و (۵-۱۳-۴)). پس از تعیین جریانهای مرجع  $i_{dr}^{+*}$ ،  $i_{qr}^{+*}$ ،  $i_{dr}^{-*}$  و  $i_{qr}^{-*}$ ، جریانهای dq توالی مثبت و منفی روتور به گونه ای کنترل می گردند تا برابر با مقادیر جریانهای مرجع متناظر با خود گردند.



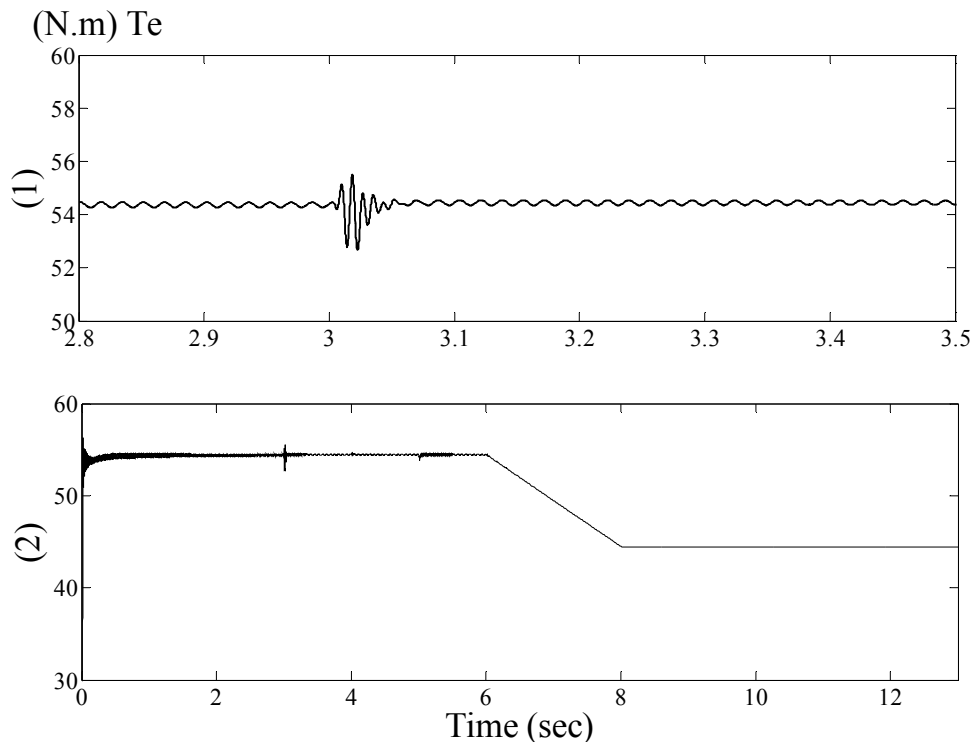


شکل (۵-۱۳): نمودار جریانهای dq توالی مثبت و منفی روتور در دستگاههای  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$  به همراه جریانهای مرجع (۱): جریان های  $i_{dr+}^*$  و  $i_{dr+}^{+*}$ ؛ (۲): جریان های  $i_{qr+}^*$  و  $i_{qr+}^{+*}$ ؛ (۳): جریان های  $i_{dr-}^*$  و  $i_{dr-}^{-*}$ ؛ (۴) جریان های  $i_{qr-}^*$  و  $i_{qr-}^{-*}$

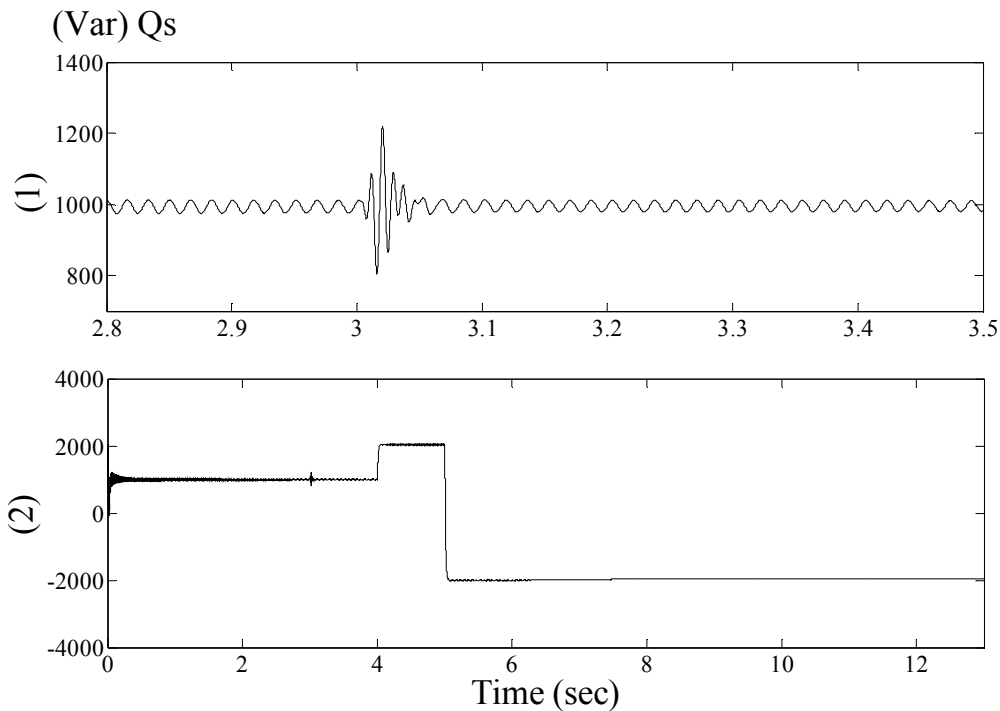
در شکل (۵-۱۴) نمودار گشتاور الکترومغناطیسی نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۵-۱۴) مشاهده می گردد در زمانهای بعد از  $t=3$  (sec)، با کنترل جریانهای توالی منفی روتور، نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی ناشی از نامتعادل شدن ولتاژ، از بین رفته است. از طرفی نیز

همانطور که اشاره شد در این شرایط، کنترل مبدل سمت روتور باید به گونه ای باشد که علاوه بر میرا کردن نوسانات گشتاور، مؤلفه اصلی گشتاور را نیز به طور مستقل از توان راکتیو استاتور و مشابه با شرایط متعادل ولتاژ استاتور، کنترل نماید. شکل (۵-۱۴-۲) کنترل گشتاور را در زمان های پس از  $t=3$  (sec) نشان می دهد به طوریکه مستقل بودن کنترل گشتاور با توجه به ثابت بودن مقدار آن در ازای تغییرات توان راکتیو استاتور در زمان های  $t=4$  (sec) و  $t=5$  (sec) به خوبی مشهود می باشد.

همانطور که در فصل (۳) اشاره گردید به ازای جریانهای توالی منفی مرجع روتور برای حذف نوسانات گشتاور، نوسانات توان راکتیو استاتور نیز حذف می گردند. در شکل (۵-۱۵-۱)، حذف نوسانات توان راکتیو استاتور ناشی از نامتعادل شدن ولتاژ در زمانهای بعد از  $t=3$  (sec) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۵-۱۵-۲)، علاوه بر حذف نوسانات، کنترل مؤلفه ثابت آن با توجه به تغییرات توان راکتیو مرجع در زمان های  $t=4$  (sec) و  $t=5$  (sec) به خوبی مشاهده می گردد. در اینجا نیز مستقل بودن کنترل توان راکتیو استاتور نسبت به کنترل گشتاور الکترومغناطیسی، مشهود می باشد.

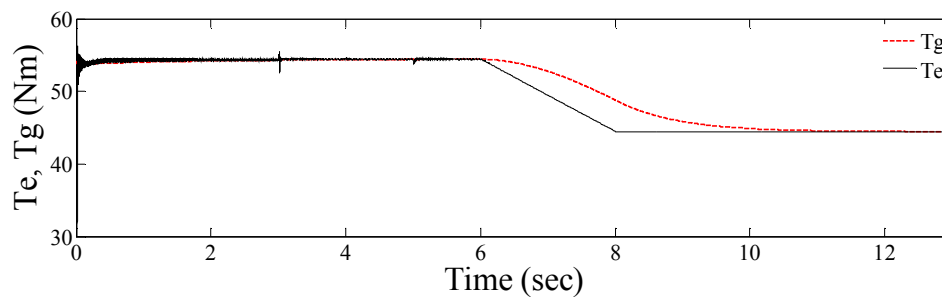


شکل (۵-۱۴): نمودار گشتاور الکترومغناطیسی (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی

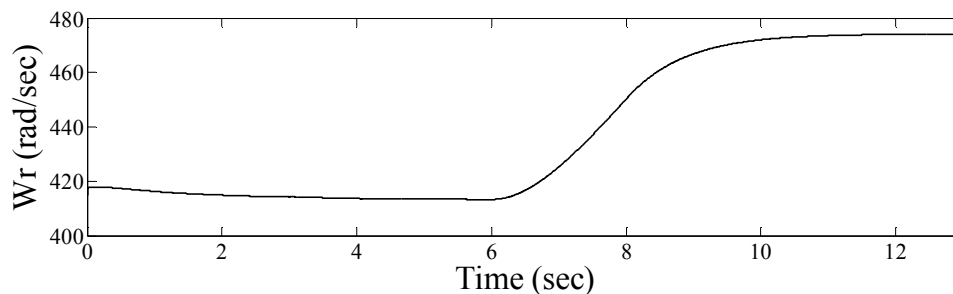


شکل (۵-۱۵): نمودار توان راکتیو خروجی از استاتور (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی

روند تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور توربین و نیز سرعت الکتریکی روتور مشابه با آنچه که در شرایط متعادل ولتاژ اتفاق می افتد در اینجا نیز به خوبی در شکل های (۵-۱۶) و (۵-۱۷) نشان داده شده است.



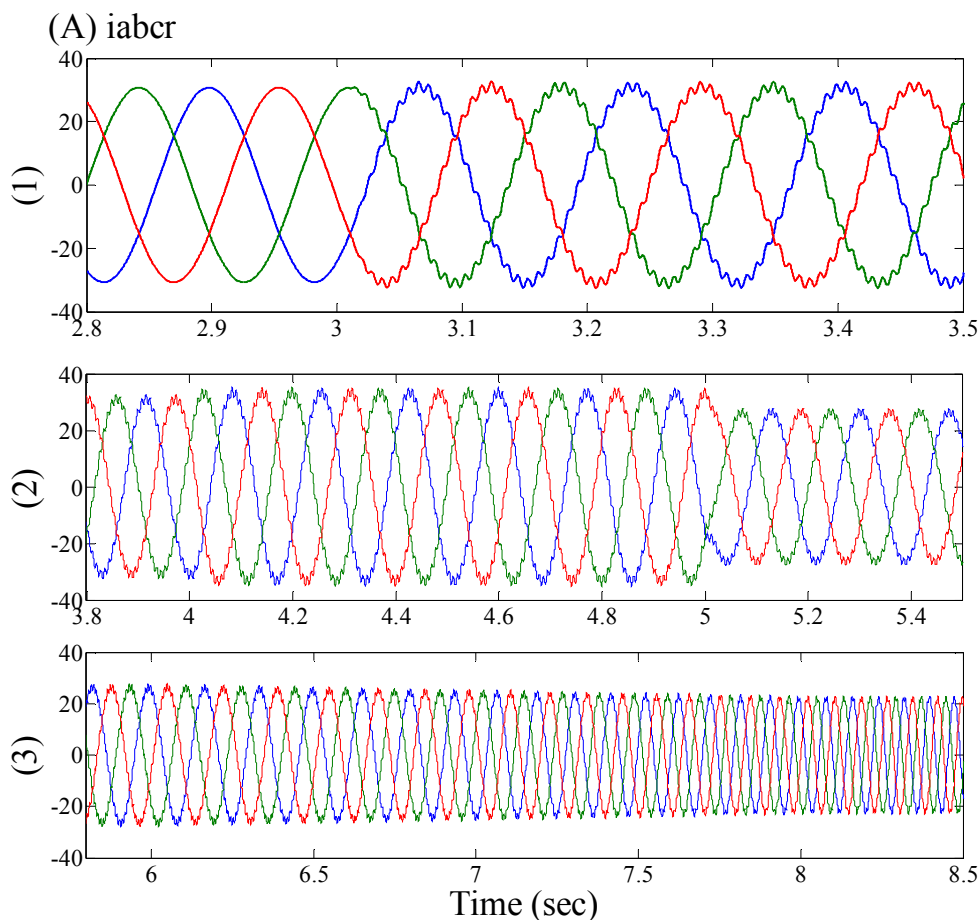
شکل (۵-۱۶): نمودار گشتاور توربین ( $T_g$ ) و گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ )



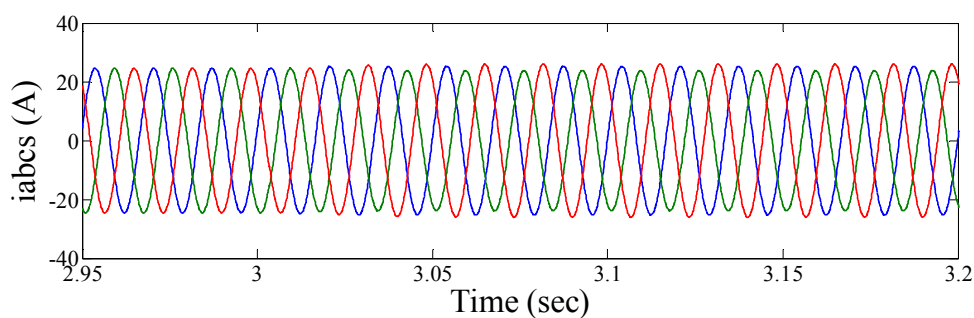
شکل (۵-۱۷): نمودار سرعت الکتریکی روتور

در شکل (۵-۱۸) نمودار جریانهای سه فاز روتور نشان داده شده است. به طوریکه در شکل (۵-۱۸-۱) نمودار جریانهای سه فاز روتور در زمانهای قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ، آورده شده است. با توجه به اینکه جریانهای توالی منفی روتور دارای دامنه کم و فرکانس ۱۲۶ هرتز می باشند در نتیجه جریانهای مذکور بر روی جریانهای ۶ هرتز توالی مثبت روتور قرار می گیرند که در نهایت جریانهای رپل دار سه فاز روتور را مطابق با شکل (۵-۱۸-۱) ایجاد می نمایند. در شکل (۵-۱۸-۲) تغییر دامنه جریانهای سه فاز روتور، در شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه و در ازای تغییرات توان راکتیو در زمان های  $t=4$  (sec) و  $t=5$  (sec) نشان داده شده است. در شکل (۵-۱۸-۳) نیز، روند افزایش فرکانس جریانهای روتور با توجه به افزایش سرعت روتور ناشی از کاهش گشتاور الکترومغناطیسی، نمایش داده شده است.

در شکل (۵-۱۹)، نمودار جریانهای سه فاز خروجی از استاتور در بازه زمانی کوتاه قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ مشاهده می گردد. با توجه به جاری بودن جریانهای توالی منفی استاتور با دامنه کم، جریان های سه فاز استاتور نیز، نامتعادلی اندکی دارند که البته در مقایسه با شکل (۵-۵)، میزان نامتعادلی این جریانها بسیار کاهش یافته است.



شکل (۵-۱۸): نمودار جریانهای سه فاز روتور (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در بازه زمانی تغییر توان راکتیو خروجی از استاتور (۳): در بازه زمانی تغییر گشتاور الکترومغناطیسی

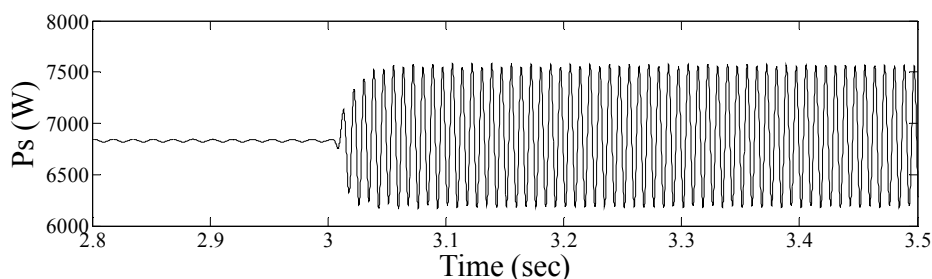


شکل (۵-۱۹): نمودار جریانهای سه فاز خروجی از استاتور در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ

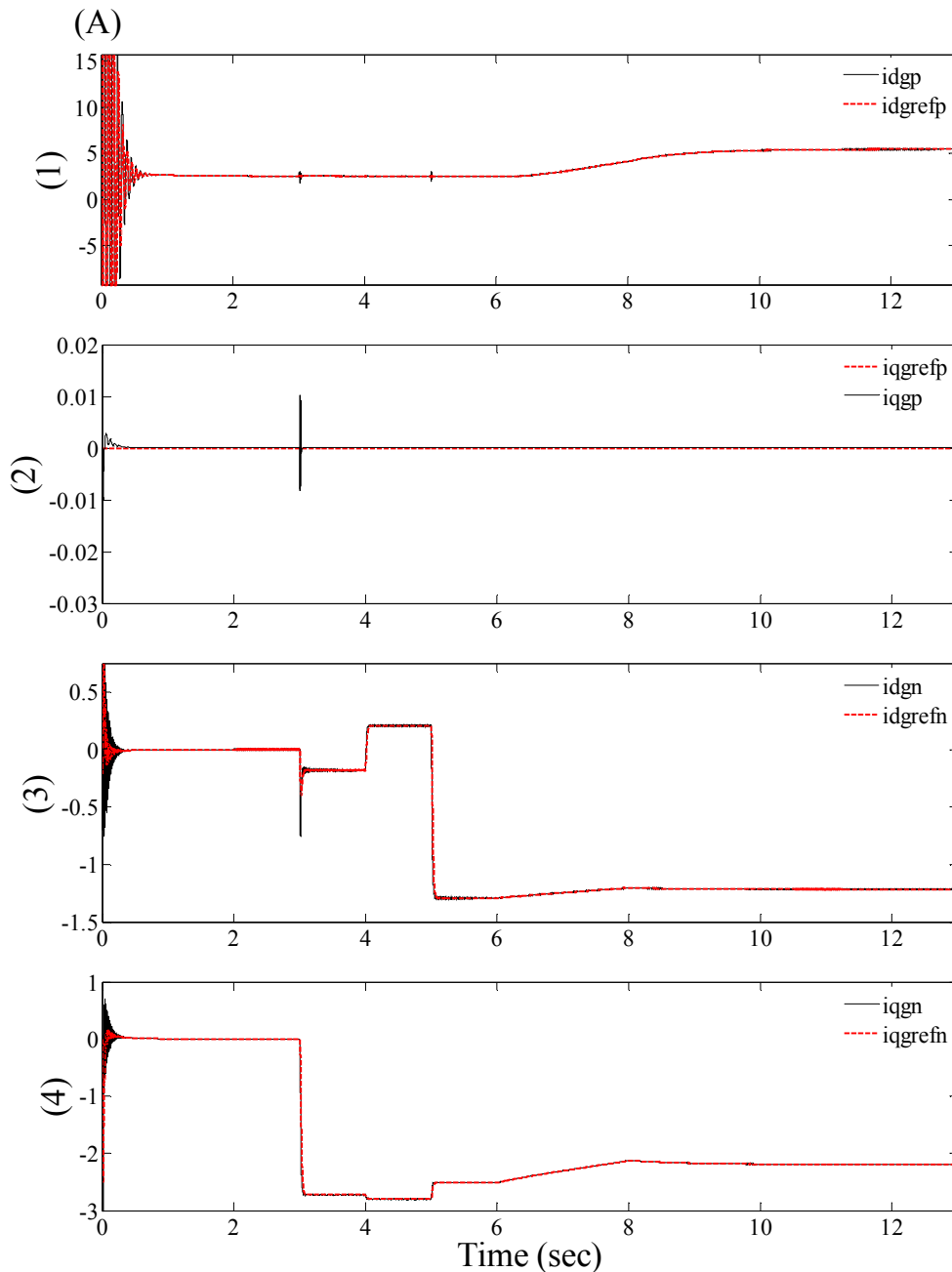
همانطور که در فصل (۳) اشاره شد، برای کنترل جریانهای توالی منفی روتور در دستگاه  $(dq)^-$ ، اهداف گوناگونی در نظر گرفته می شود که دستیابی همزمان به تمامی این اهداف امکانپذیر نمی باشد. به طوریکه از بین بردن نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی و توان اکتیو خروجی از استاتور به طور

همزمان، امری غیر ممکن می باشد که این امر در شکل (۵-۲۰) مشاهده می گردد. در این شکل، نمودار توان اکتیو خروجی از استاتور در بازه زمانی کوتاه قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ نشان داده شده است به طوریکه نامتعادلی ولتاژ باعث ایجاد نوساناتی با دامنه زیاد و با فرکانس ۲ برابر فرکانس شبکه (۱۲۰ Hz) در آن گردیده است. انتقال این توان به شبکه، امری نامطلوب محسوب می گردد. برای میرا کردن نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG، جریانهای توالی منفی خروجی از مبدل سمت شبکه در دستگاه  $(dq)^-$ ، به گونه ای کنترل می گردند که نوسانات توان اکتیو خروجی از استاتور توسط توان اکتیو خروجی از این مبدل، خنثی گردد.

برای کنترل مبدل سمت شبکه در این شرایط، جریان مرجع  $i_{dg}^{+*}$  با توجه به مقدار ولتاژ مورد نظر برای خازن DC-Link، که برابر با (V) ۴۵۰ در نظر گرفته شده است، بدست می آید و جریان مرجع  $i_{qg}^{+*}$  نیز با توجه به توان راکتیو مرجع خروجی از این مبدل، محاسبه می شود (شکل (۵-۲۱-۱) و (۵-۲۱-۲)). از طرفی نیز جریانهای مرجع  $i_{dg}^{-*}$  و  $i_{qg}^{-*}$  به نحوی تعیین می گردند که نوسانات توان اکتیو خروجی از این مبدل، نوسانات توان اکتیو خروجی از استاتور را خنثی سازند و در نتیجه هیچگونه نوسانی در توان اکتیو کل خروجی از DFIG، بوجود نیاید (شکل (۵-۲۱-۳) و (۵-۲۱-۴)). پس از تعیین جریانهای مرجع  $i_{dg}^{+*}$ ،  $i_{qg}^{+*}$ ،  $i_{dg}^{-*}$  و  $i_{qg}^{-*}$ ، جریانهای  $dq$  توالی مثبت و منفی به گونه ای کنترل می گردند تا برابر با مقادیر جریانهای مرجع متناظر با خود گردند. در شکل (۵-۲۱) نمودار های بدست آمده برای جریانهای فوق نشان داده شده است.

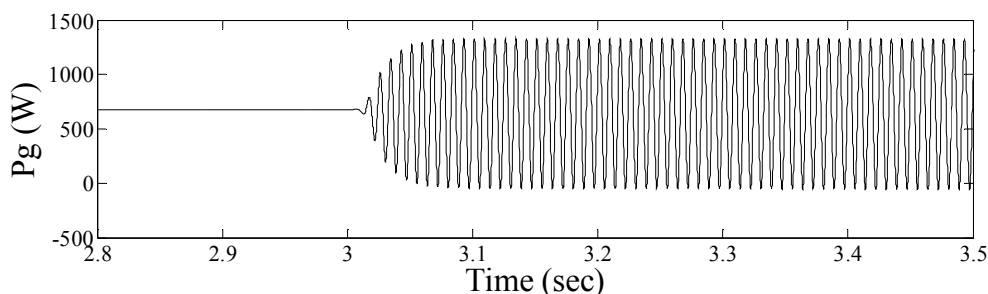


شکل (۵-۲۰): نمودار توان اکتیو خروجی از استاتور در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ



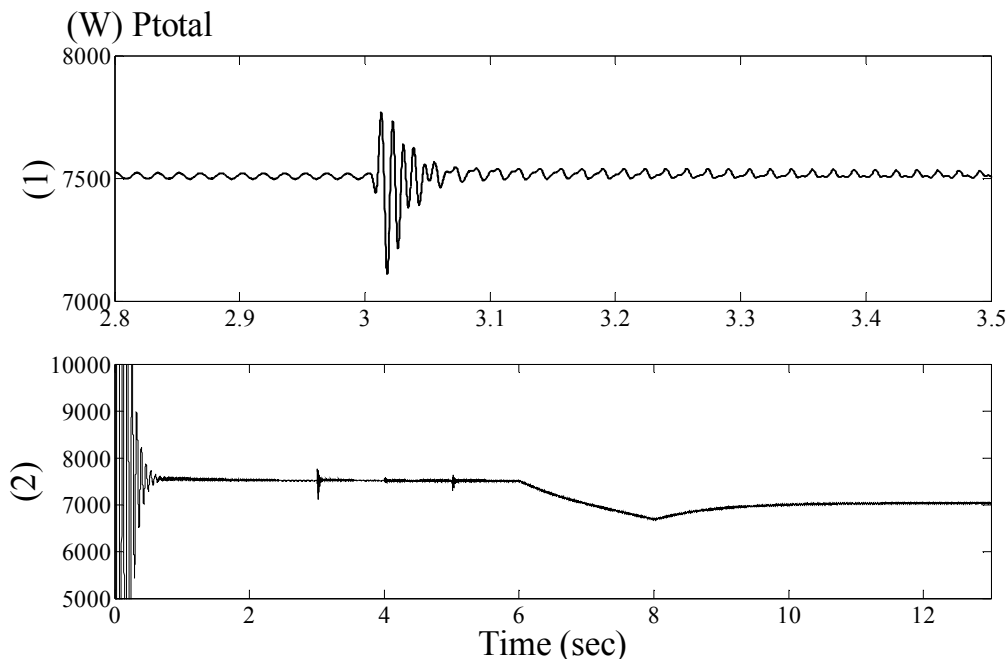
شکل (۵-۲۱): نمودار جریانهای dq توالی مثبت و منفی خروجی از مبدل سمت شبکه در دستگاههای  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$  به همراه جریانهای مرجع (۱): جریان های  $i_{dq+}^+$  و  $i_{dq+}^{+*}$  (۲): جریان های  $i_{qg+}^+$  و  $i_{qg+}^{+*}$  (۳): جریان های  $i_{dg-}^-$  و  $i_{dg-}^{-*}$  (۴) جریان های  $i_{qg-}^-$  و  $i_{qg-}^{-*}$

در شکل (۵-۲۲) نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه نشان داده می شود به طوریکه دامنه و فاز نوسانات این توان، به گونه ای است که نوسانات توان اکتیو خروجی از استاتور را خنثی می سازد.



شکل (۵-۲۲): نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ

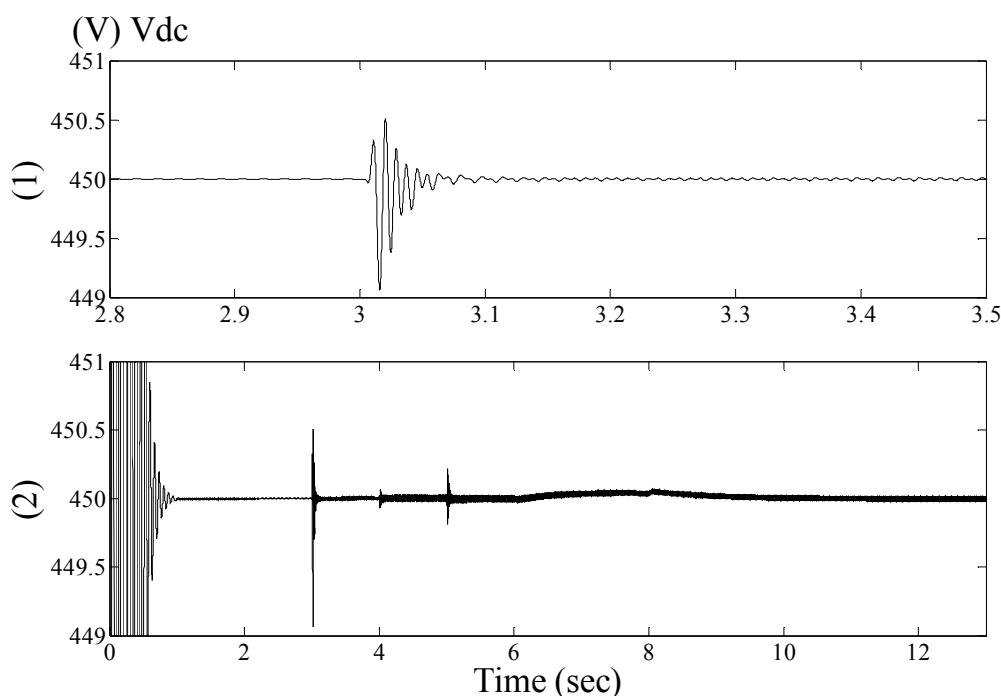
در شکل (۵-۲۳)، نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG، نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۵-۲۳-۱) مشاهده می گردد، نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG در زمانهای بعد از  $t=3$  (sec) (نامتعادل شدن ولتاژ)، با کنترل جریانهای توالی منفی خروجی از مبدل سمت شبکه، حذف گردیده است. به طوریکه در ادامه با تغییر توان راکتیو استاتور در زمان های  $t=4$  (sec) و  $t=5$  و نیز تغییر گشتاور الکترومغناطیسی در بازه زمانی بین  $t=6$  (sec) و  $t=8$  (sec)، این نوسانات همچنان میرا شده اند (شکل (۵-۲۳-۲)).



شکل (۵-۲۳): نمودار توان اکتیو کل خروجی از DFIG (۱) در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲) در کل زمان شبیه سازی



همانگونه که در این روش اشاره گردید، نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی با کنترل مبدل سمت روتور حذف گردیدند بنابراین در توان اکتیو ورودی از شفت روتور نیز هیچگونه نوسانی بوجود نمی آید. از طرفی نوسانات توان اکتیو خروجی از استاتور توسط توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه خنثی شده اند بنابراین تحت این شرایط، ولتاژ خازن DC-Link نیز هیچگونه ریپلی نخواهد داشت که این امر در شکل (۵-۲۴) مشهود می باشد.



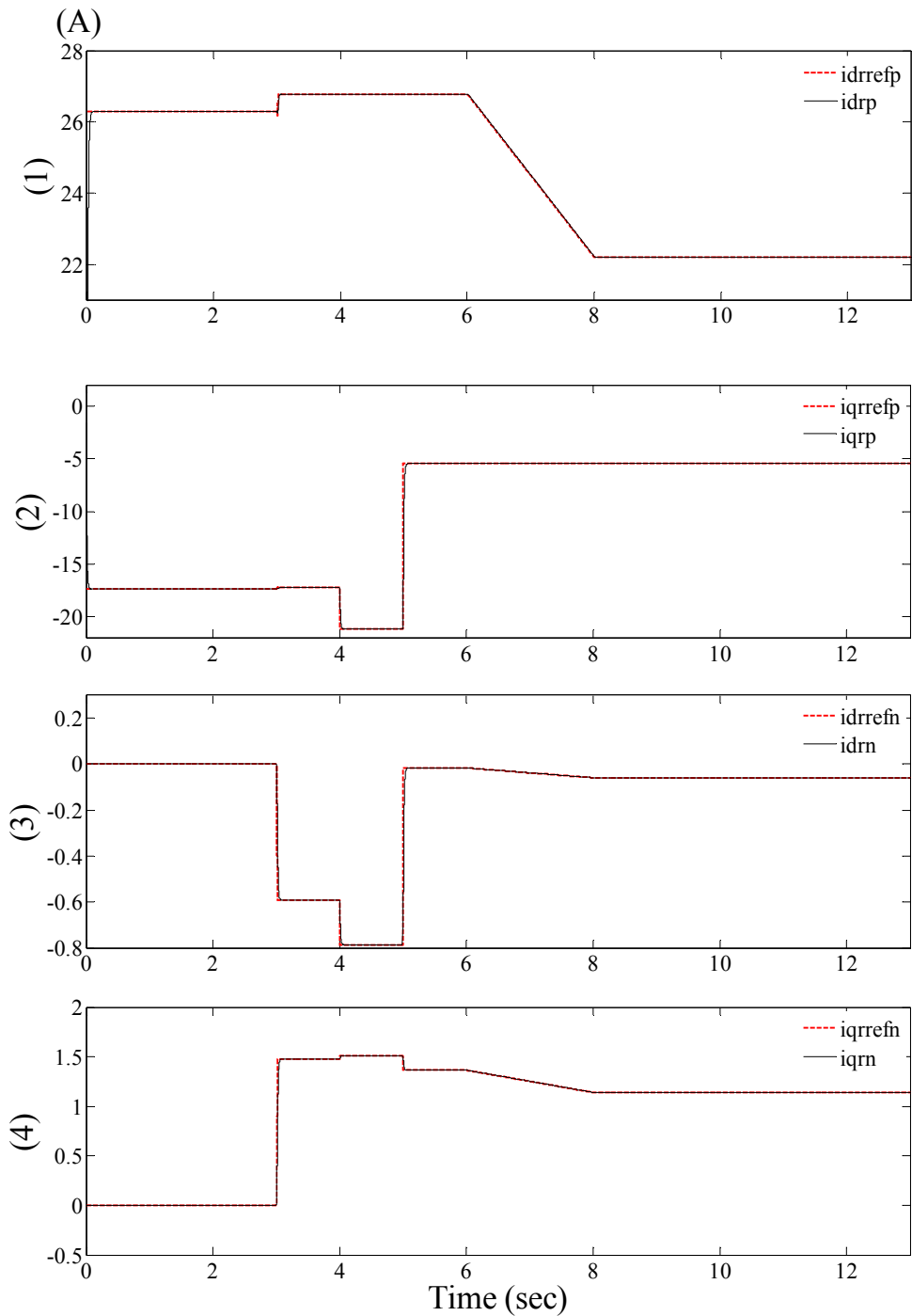
شکل (۵-۲۴): نمودار ولتاژ DC-Link (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی

### ۵-۳-۱-۲- کنترل RSC و GSC در دستگاه dq همراه با بردار ولتاژ استاتور

همانطور که اشاره شد برای کنترل مبدل ها در دستگاه مرجع همراه با بردار ولتاژ توالی مثبت استاتور، محور d دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$  در راستای بردار مذکور در نظر گرفته می شود به طوری که زاویه بین محور d دستگاه مذکور و محور  $\alpha$  دستگاه مرجع ساکن  $\alpha\beta$ ،  $\theta_s$  می باشد و از طرفی زاویه بین محور d دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$  و محور  $\alpha$  دستگاه مرجع ساکن  $\alpha\beta$ ،  $-\theta_s$  خواهد بود. برای محاسبه زاویه  $\theta_s$  کافی است مؤلفه های  $\alpha\beta$  ولتاژ توالی مثبت محاسبه گردند لذا محاسبه  $\theta_s$  در این دستگاه نسبت به دستگاه مرجع همراه با بردار شار توالی مثبت استاتور ساده تر و البته دقیقتر

خواهد بود و شرایط بهتری برای پیاده سازی کنترل برداری، مخصوصاً در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه و استاتور، ایجاد می گردد.

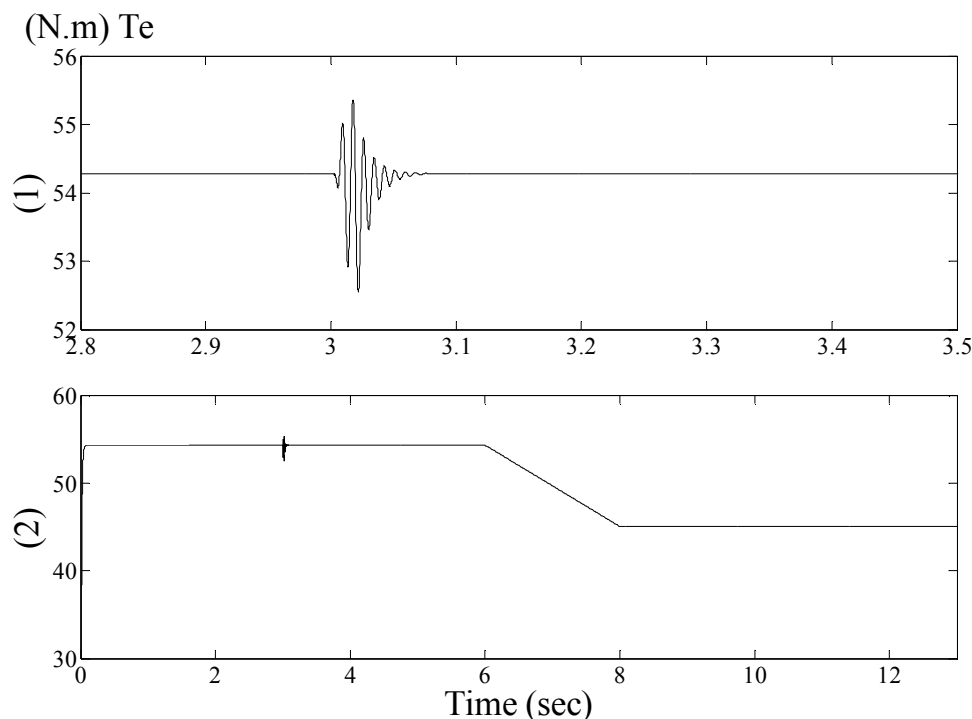
در این دستگاه، جریانهای مرجع  $i_{dr+}^{+*}$  و  $i_{qr+}^{+*}$  نسبت به جریانهای مرجع بدست آمده در دستگاه مرجع همراستا با بردار شار توالی مثبت استاتور متفاوت می باشند. از آنجائیکه اهداف اصلی کنترلی برای کنترل مبدل سمت روتور در شرایط نامتعادل را می توان با کنترل مؤلفه های  $dq$  توالی مثبت جریان روتور در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$  بدست آورد بنابراین با توجه به مقادیر مرجع گشتاور و توان راکتیو استاتور، به ترتیب مقادیر جریانهای مرجع  $i_{dr+}^{+*}$  و  $i_{qr+}^{+*}$  بدست خواهند آمد. از طرفی نیز جریانهای مرجع توالی منفی روتور  $i_{dr-}^{-*}$  و  $i_{qr-}^{-*}$ ، برای از بین بردن نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی و توان راکتیو خروجی از استاتور، در این دستگاه نسبت به دستگاه مرجع همراستا با بردار شار استاتور متفاوت می باشند. پس از تعیین جریانهای مرجع  $i_{dr+}^{+*}$ ،  $i_{qr+}^{+*}$ ،  $i_{dr-}^{-*}$  و  $i_{qr-}^{-*}$ ، جریانهای  $dq$  توالی مثبت و منفی روتور به گونه ای کنترل می گردند تا برابر با مقادیر جریانهای مرجع متناظر با خود گردند. در شکل (۵-۲۵) نمودار های بدست آمده برای جریانهای فوق نشان داده شده است.



شکل (۵-۲۵): نمودار جریانهای dq توالی مثبت و منفی روتور در دستگاههای  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$  به همراه جریانهای مرجع (۱): جریان های  $i_{dr}^{+*}$  و  $i_{dr}^{+}$ ؛ (۲): جریان های  $i_{qr}^{+*}$  و  $i_{qr}^{+}$ ؛ (۳): جریان های  $i_{dr}^{-*}$  و  $i_{dr}^{-}$ ؛ (۴) جریان های  $i_{qr}^{-*}$  و  $i_{qr}^{-}$

در شکل (۵-۲۶) نمودار گشتاور الکترومغناطیسی نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۵-۲۶) مشاهده می گردد با کنترل جریانهای توالی منفی روتور، نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی

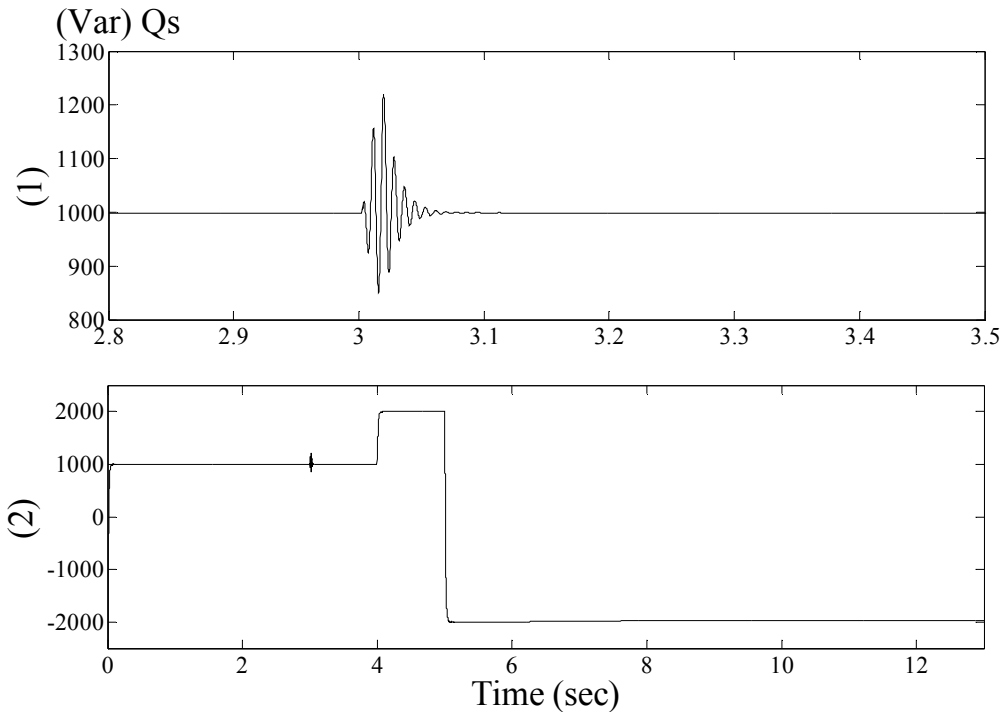
ناشی از نامتعادل شدن ولتاژ در زمانهای بعد از  $t=3$  (sec)، از بین رفته است. از طرفی نیز در شکل (۵-۲۶-۲)، کنترل گشتاور در زمان های پس از  $t=3$  (sec)، مشاهده می گردد به طوریکه علاوه بر حذف نوسانات گشتاور در این زمانها، مؤلفه اصلی گشتاور نیز در بازه زمانی  $t=6$  (sec) الی  $t=8$  (sec)، کنترل می گردد و مستقل بودن کنترل گشتاور به ازای تغییرات توان راکتیو در زمان های  $t=4$  (sec) و  $t=5$  (sec)، به خوبی مشاهده می گردد. نمودار های بدست آمده برای گشتاور الکترومغناطیسی در شکل های (۵-۱۴) و (۵-۲۶)، مشابه یکدیگر می باشند. ولی با توجه به اینکه برای محاسبه زاویه محور  $d$  دستگاه  $(dq)^+$  همراستا با بردار ولتاژ توالی مثبت استاتور، هیچگونه عملیات انتگرالگیری صورت نمی گیرد بنابراین تخمین زاویه مذکور دقیقتر صورت می گیرد و در نتیجه نتایج بدست آمده در این شرایط نسبت به دستگاه همراستا با شار توالی مثبت استاتور مطلوب تر می باشد.



شکل (۵-۲۶): نمودار گشتاور الکترومغناطیسی (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی

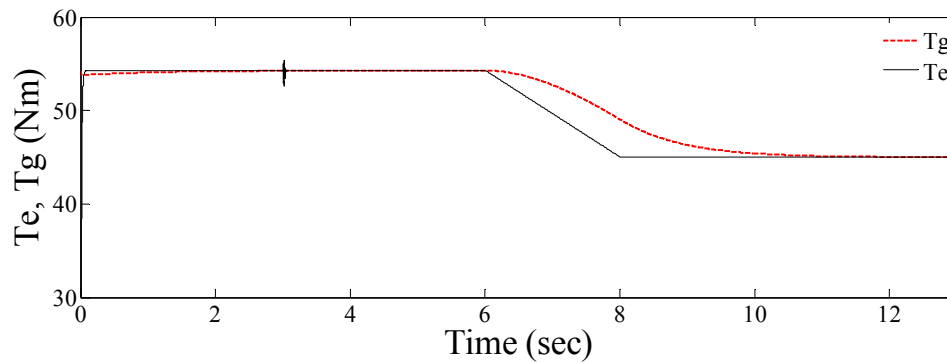
در شکل (۵-۲۷-۱) مشابه با شکل (۵-۱۵-۱)، از بین رفتن نوسانات توان راکتیو استاتور ناشی از نامتعادل شدن ولتاژ، در زمانهای بعد از  $t=3$  (sec)، نشان داده می شود. همچنین در شکل (۵-۲۷-۲)

علاوه بر حذف نوسانات، کنترل مؤلفه ثابت آن با توجه به تغییرات توان راکتیو مرجع در زمان های  $t=4$  (sec) و  $t=5$  (sec)، مشاهده می گردد. در اینجا نیز مستقل بودن کنترل توان راکتیو استاتور نسبت به کنترل گشتاور الکترومغناطیسی، مشهود می باشد.

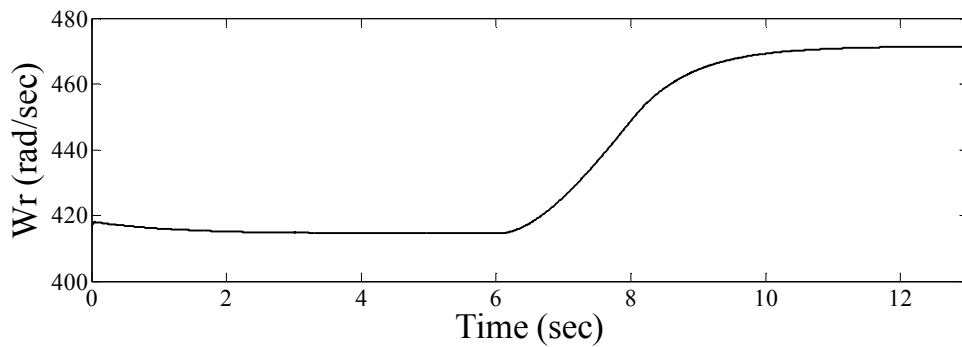


شکل (۵-۲۷): نمودار توان راکتیو خروجی از استاتور (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی

شکل های (۵-۲۸) و (۵-۲۹) مشابه با شکل های (۵-۱۶) و (۵-۱۷)، روند تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور توربین و نیز سرعت الکتریکی روتور را نشان می دهند.

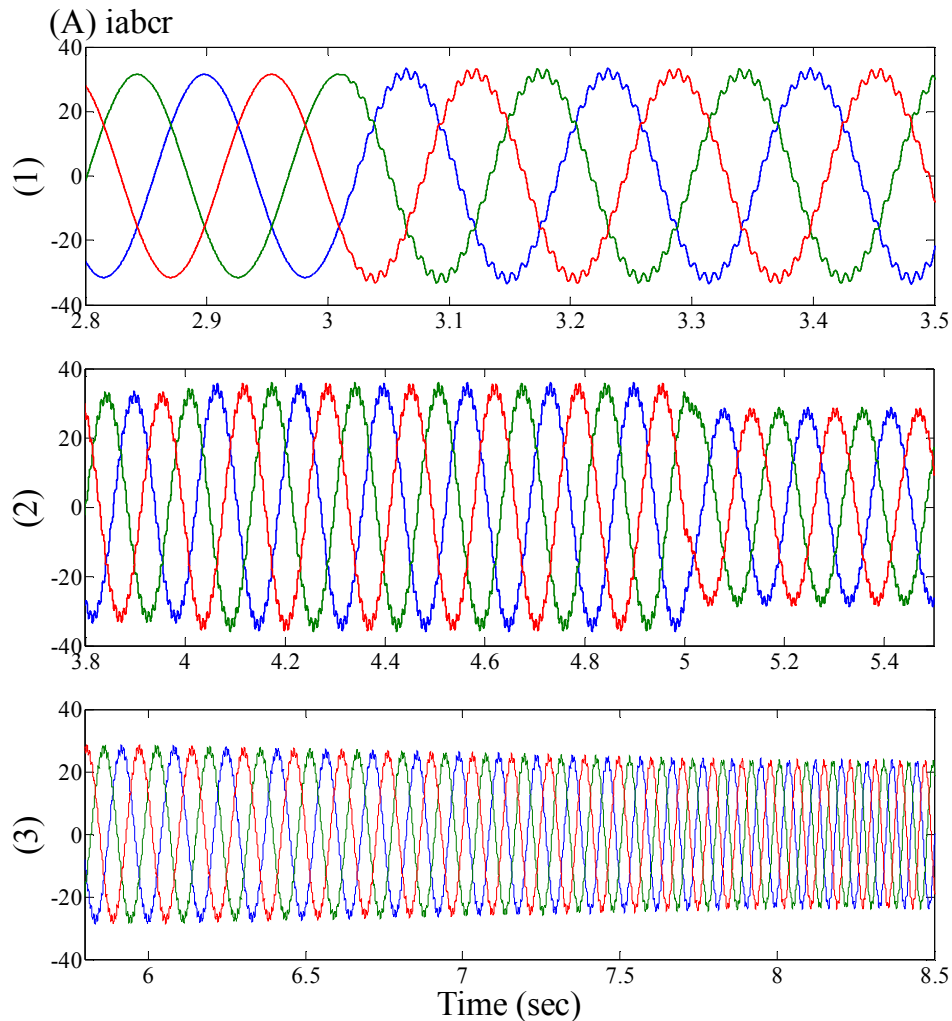


شکل (۵-۲۸): نمودار گشتاور توربین ( $T_g$ ) و گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ )

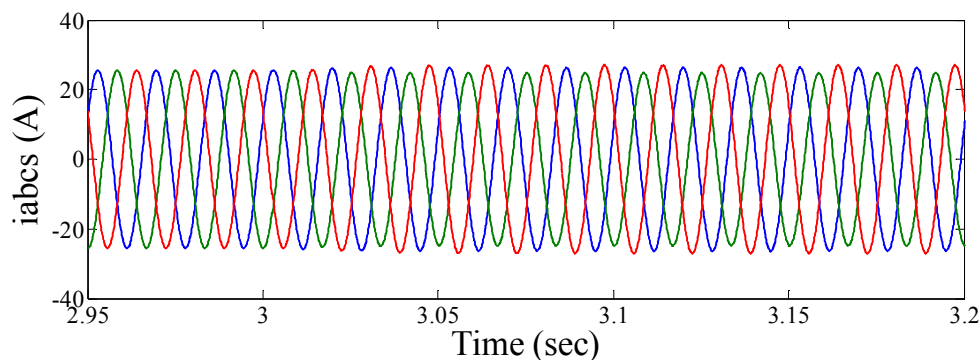


شکل (۵-۲۹): نمودار سرعت الکتریکی روتور

شکل های (۵-۳۰) و (۵-۳۱)، جریانهای سه فاز استاتور و روتور را نمایش می دهند. نمودار های بدست آمده در این شرایط، مشابه با نمودارهای بدست آمده در شکل های (۵-۱۸) و (۵-۱۹) می باشد.



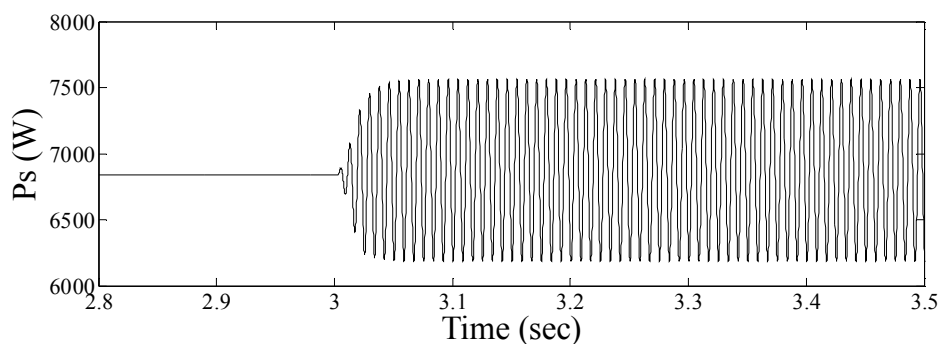
شکل (۵-۳۰): نمودار جریانهای سه فاز روتور (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در بازه زمانی تغییر توان راکتیو خروجی از استاتور (۳): در بازه زمانی تغییر گشتاور الکترومغناطیسی



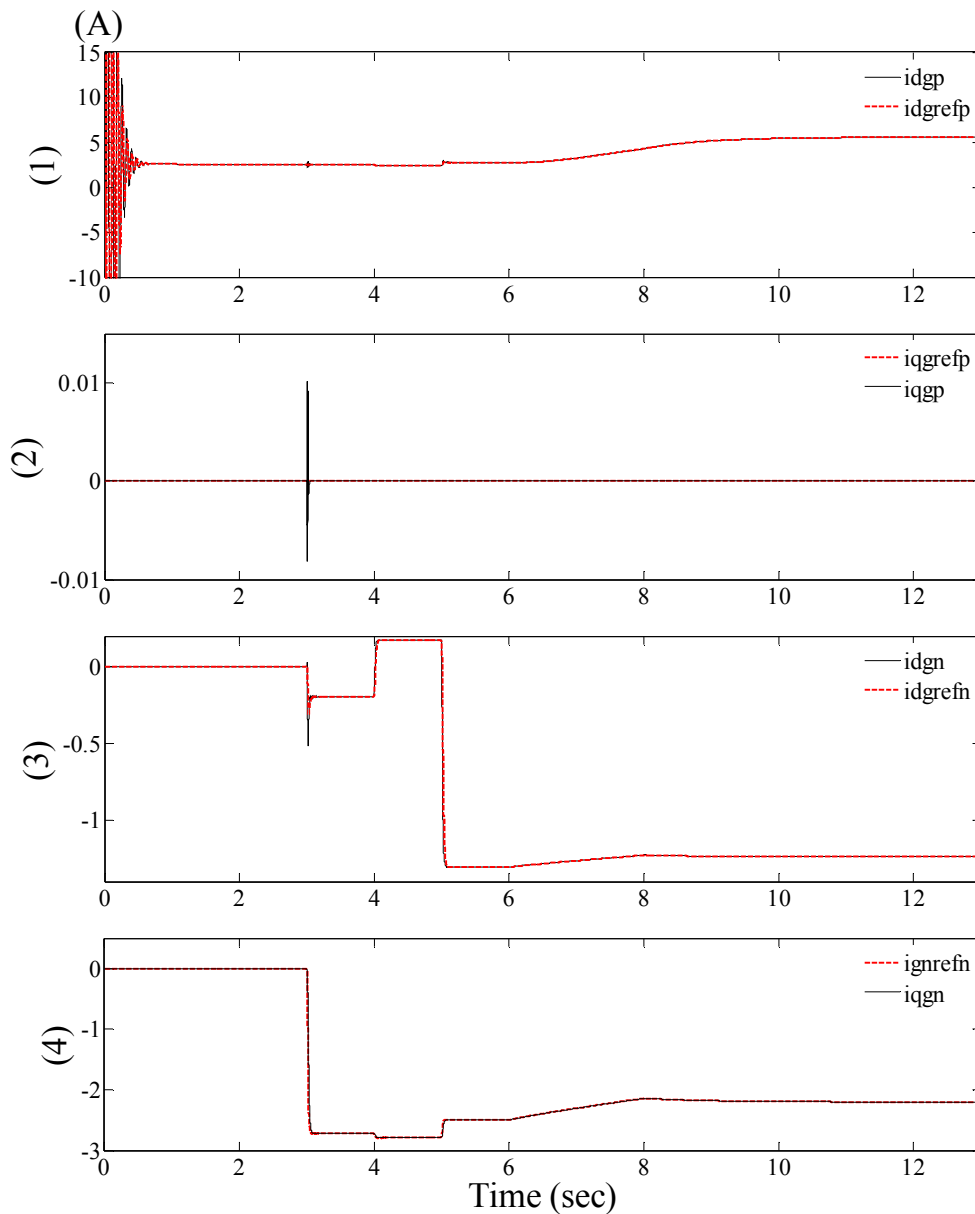
شکل (۵-۳۱): نمودار جریانهای سه فاز خروجی از استاتور در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ

در شکل (۵-۳۲) نیز مشابه با شکل (۵-۲۰)، عدم امکان حذف همزمان نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی و توان اکتیو خروجی از استاتور، مشاهده می گردد. همانطور که اشاره شد با کنترل مبدل سمت شبکه، نوسانات توان اکتیو خروجی از استاتور توسط توان اکتیو خروجی از این مبدل، خنثی می گردد.

در اینجا نیز برای کنترل مبدل سمت شبکه، جریانهای مرجع  $i_{dq+}^*$ ،  $i_{dq-}^*$ ،  $i_{qg+}^*$  و  $i_{qg-}^*$  مشابه با بخش قبل بدست می آیند. اما از آنجاییکه هر ۲ مبدل سمت روتور و شبکه در یک دستگاه کنترل می گردند بنابراین محاسبه جریانهای مرجع  $i_{dq-}^*$  و  $i_{qg-}^*$  در این شرایط دقیقتر صورت می گیرد. در شکل (۵-۳۳) نمودار های بدست آمده برای جریانهای فوق نشان داده شده است.



شکل (۵-۳۲): نمودار توان اکتیو خروجی از استاتور در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ

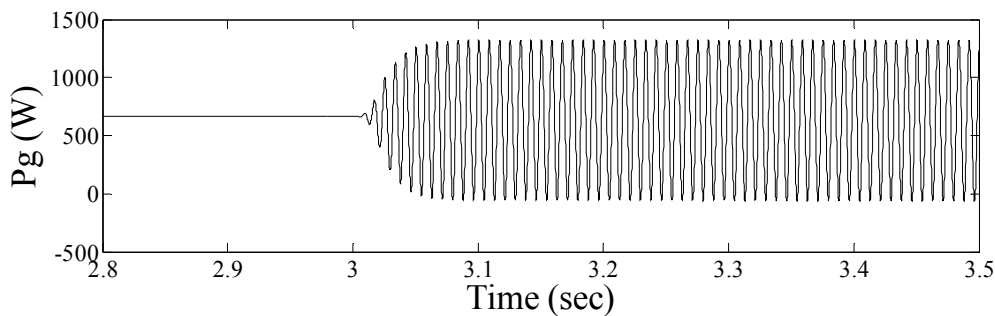


شکل (۵-۳۳): نمودار جریانهای dq توالی مثبت و منفی روتور در دستگاههای  $(dq)^+$  و  $(dq)^-$  به همراه جریانهای مرجع (۱): جریان های  $i_{dr+}^*$  و  $i_{dr-}^*$ ; (۲): جریان های  $i_{qr+}^*$  و  $i_{qr-}^*$ ; (۳): جریان های  $i_{dr-}^*$  و  $i_{dr+}^*$  (۴) جریان های  $i_{qr-}^*$  و  $i_{qr+}^*$

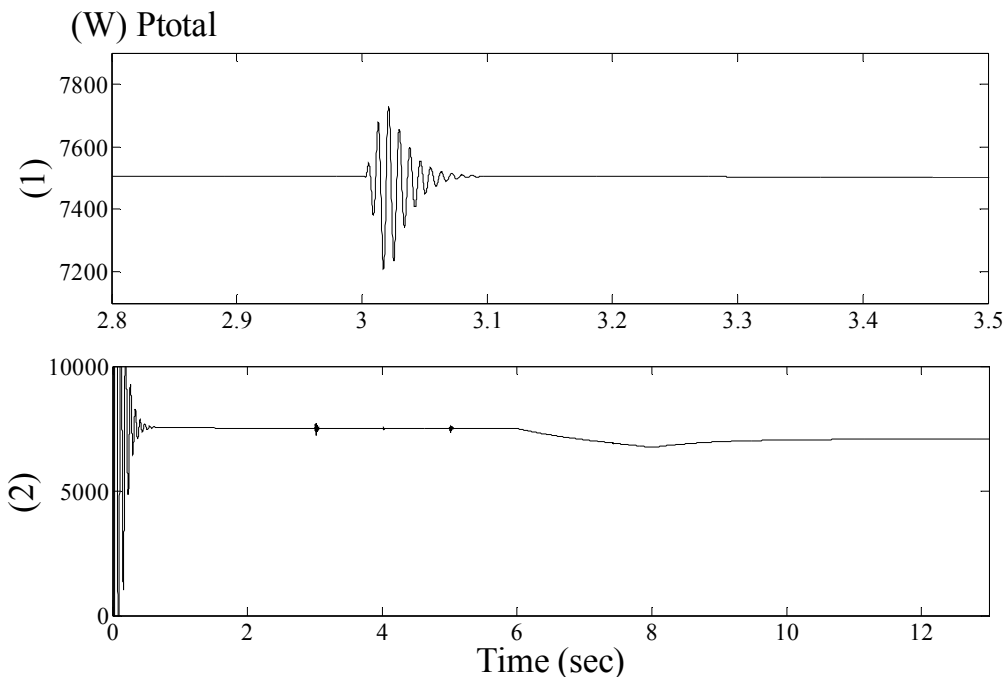
در شکل (۵-۳۴) نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه برای خنثی کردن نوسانات توان اکتیو خروجی از استاتور نشان داده شده است. با توجه به اینکه هر ۲ مبدل سمت روتور و شبکه در یک دستگاه کنترل می گردند بنابراین محاسبه جریانهای مرجع  $i_{dq-}^*$  و  $i_{qg-}^*$  برای خنثی کردن نوسانات توان اکتیو خروجی از استاتور و در نتیجه حذف نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG،



دقیقتر صورت می گیرد. لذا حذف نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG، در این شرایط کاملتر صورت می گیرد. این امر در شکل (۵-۳۵) به خوبی مشهود است. همانگونه که در شکل (۵-۳۵-۱) مشاهده می گردد، نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG در زمانهای بعد از  $t=3$  (sec) (نامتعادل شدن ولتاژ)، با کنترل جریانهای توالی منفی خروجی از مبدل سمت شبکه، حذف گردیده است. همچنین با توجه به شکل (۵-۳۵-۲) این نوسانات، با تغییر توان راکتیو استاتور در زمان های (sec)  $t=4$  و  $t=5$  و نیز تغییر گشتاور الکترومغناطیسی در بازه زمانی بین  $t=6$  (sec) و  $t=8$  (sec)، همچنان میرا شده اند.

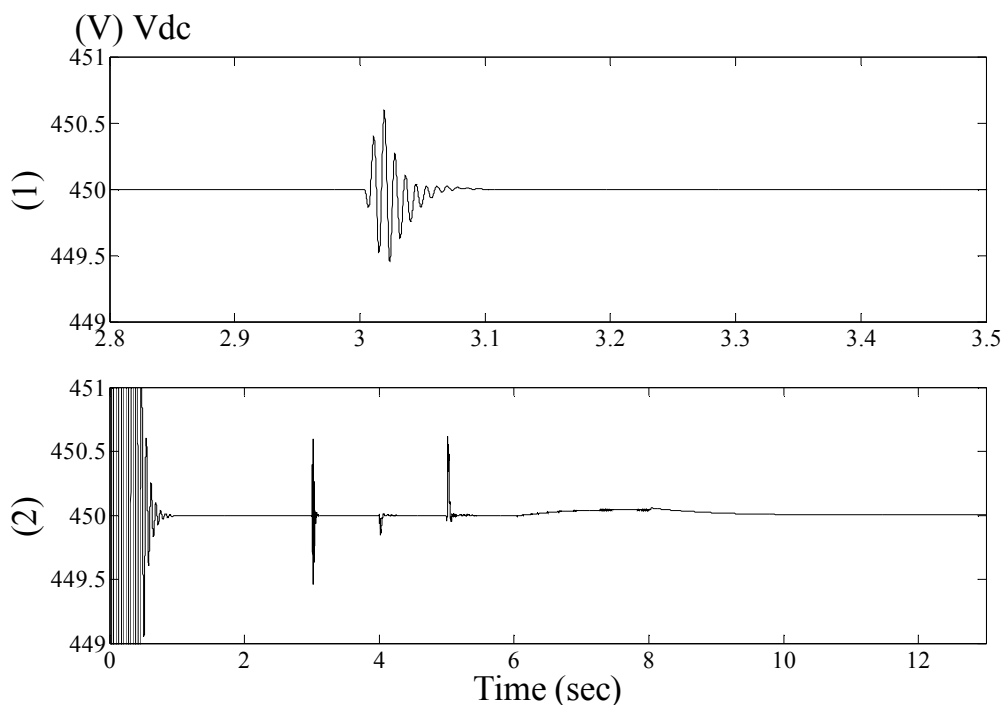


شکل (۵-۳۴): نمودار توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ



شکل (۵-۳۵): نمودار توان اکتیو کل خروجی از استاتور (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ - (۲): در کل زمان شبیه سازی

در شکل (۵-۳۶) نیز حذف نوسانات ولتاژ خازن DC-Link نشان داده شده است. در اینجا نیز با توجه به کنترل هر ۲ مبدل سمت روتور و شبکه در یک دستگاه، حذف نوسانات ولتاژ دقیقتر صورت گرفته است.



شکل (۵-۳۶): نمودار ولتاژ DC-Link (۱): در بازه زمانی قبل و بعد از نامتعادلی ولتاژ (۲): در کل زمان شبیه سازی

### ۵-۳-۲- مقایسه بین سایر روشهای کنترل هماهنگ مبدلها در شرایط نامتعادل ولتاژ

با توجه به اینکه برای کنترل جریانهای توالی منفی روتور و نیز جریانهای توالی منفی خروجی از مبدل سمت شبکه، در دستگاه مرجع  $(dq)^-$ ، اهداف گوناگونی در نظر گرفته می شود بنابراین روشهای خاصی برای کنترل هماهنگ مبدلهای سمت روتور و شبکه در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه، می توان در نظر گرفت.

همانطور که اشاره شد هدف مطلوب برای کنترل RSC و GSC در روش اول، به ترتیب از بین بردن نوسانات گشتاور و نیز از بین بردن نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG، در نظر گرفته شد. به طوریکه برای از بین بردن نوسانات توان اکتیو کل خروجی، بایستی نوسانات توان اکتیو خروجی از استاتور و GSC یکدیگر را خنثی نمایند. بنابراین با افزایش درصد نامتعادلی ولتاژ، دامنه نوسانات توان اکتیو استاتور و در نتیجه دامنه نوسانات توان اکتیو خروجی از GSC نیز افزایش می یابد که با توجه به محدودیتهای این مبدل، کنترل کامل برای خنثی کردن نوسانات توان اکتیو استاتور مقدور نمی باشد. در بخش قبل، نتایج شبیه سازی برای روش اول به طور مفصل ارائه گردید.

اهدافی که در روش دوم برای کنترل RSC و GSC، در نظر گرفته می شود، به ترتیب، از بین بردن نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی و متعادل کردن جریان کل خروجی می باشد. ولی در این روش توجهی به نوسانات ایجاد شده در اثر نامتعادلی ولتاژ شبکه، در توانهای اکتیو خروجی از استاتور و GSC، نمی شود به طوریکه این نوسانات باعث می گردند که توان اکتیو کل خروجی از DFIG نیز دارای نوسان باشد. بنابراین کاربرد این روش در شرایط نامتعادل ولتاژ شبکه باعث پایین آمدن کیفیت توان خروجی از DFIG، می گردد.

در روش فوق، جریانهای مرجع dq توالی منفی روتور به نحوی تعیین می گردند که نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی صفر شوند. ولی تحت این شرایط، دامنه نوسانات توان اکتیو استاتور افزایش می یابد به طوریکه برای خنثی کردن این نوسانات توسط GSC، بایستی ظرفیت این مبدل نیز افزایش یابد که این امر در قدرتهای بالا باعث بالا رفتن تلفات و همچنین هزینه مبدل مذکور، می گردد.

در روش سوم، مبدل سمت روتور جریانهای توالی منفی روتور را در دستگاه مرجع  $(dq)^-$ ، در مقدار صفر تنظیم می کند. تحت این شرایط نوسانات گشتاور و توان اکتیو استاتور توأمان و تا حدود خوبی کاهش می یابند و شرایط برای کنترل مبدل سمت شبکه به منظور خنثی کردن نوسانات توان اکتیو استاتور، راحتتر می گردد و این مبدل با محدودیت کمتری برای حذف نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG، خواهد بود.

در روش چهارم، برای اینکه مشکل محدودیت کنترل مبدل سمت شبکه به منظور حذف نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG، به ازای وقوع نامتعادلی های ولتاژ با درصد بالاتر، مرتفع گردد، مبدل سمت روتور به گونه ای کنترل می گردد تا دامنه نوسانات توان اکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی، به طور همزمان، کاهش یابد. برای این منظور، جریانهای dq توالی منفی روتور، میانگینی از جریانهای مرجع بدست آمده برای حذف نوسانات توان اکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی، در نظر گرفته می شوند. جریانهای مرجع مذکور در حقیقت همان جریانهای مرجع در نظر گرفته شده برای متعادل کردن جریان استاتور می باشند. در این شرایط علاوه بر اینکه نوسانات توان اکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی کاهش نسبتاً خوبی پیدا می کنند، جریان های سه فاز استاتور نیز متعادل می گردند. بنابراین با توجه به کاهش دامنه نوسانات توان اکتیو استاتور، خنثی کردن این نوسانات توسط توان اکتیو خروجی از GSC، راحتتر صورت می گیرد [۲۷].

در شکل (۵-۳۷)، نتایج شبیه سازی رفتار DFIG به ازای وقوع نامتعادلی ولتاژ ۵٪ در پایانه های استاتور، با کنترل مبدل های آن با توجه روشهای دوم، سوم و چهارم، نشان داده شده است. در این شکل، نمودارهای موجود در هر ستون، مربوط به نتایج شبیه سازی بدست آمده برای هر یک از روشهای مذکور می باشد به طوریکه نمودارهای هر ستون از بالا به پایین به ترتیب: جریانهای سه فاز روتور، جریانهای سه فاز استاتور، جریانهای سه فاز کل خروجی از DFIG، توان اکتیو خروجی از استاتور، توان اکتیو خروجی از مبدل سمت شبکه، توان اکتیو کل خروجی از DFIG، گشتاور الکترومغناطیسی و ولتاژ خازن DC-Link می باشند.

نمودارهای شکل (۵-۳۷-۱)، نتایج شبیه سازی بدست آمده برای کنترل هماهنگ مبدل ها با توجه به روش دوم، را نشان می دهند. همانطور که در شکل های (۵-۳۷-۱-۳) و (۵-۳۷-۱-۷) مشاهده می گردد، اهداف اصلی این روش با متعادل شدن جریان خروجی از DFIG و نیز حذف نوسانات گشتاور مغناطیسی، بدست آمده اند. اما با توجه به شکل (۵-۳۷-۱-۶)، توان اکتیو کل خروجی از DFIG، دارای نوساناتی با دامنه زیاد و با فرکانس ۱۲۰ Hz می باشد که این نوسانات ناشی از نوسانات توانهای

اکتیو خروجی از استاتور و GSC می باشد (شکل های (۴-۱-۳۷-۵) و (۵-۱-۳۷-۵)). در نمودار مربوط به ولتاژ خازن DC-Link نیز، نوسانات این ولتاژ که ناشی از نوسانات توان ها است، مشهود می باشد (شکل (۸-۱-۳۷-۵)).

نمودارهای شکل (۲-۳۷-۵)، نتایج شبیه سازی بدست آمده برای کنترل هماهنگ مبدل ها با توجه به روش سوم، را نشان می دهند. اهداف اصلی این روش نیز با حذف نوسانات جریانهای سه فاز روتور و توان اکتیو کل خروجی از DFIG، با توجه به شکل های (۱-۲-۳۷-۵) و (۶-۲-۳۷-۵)، بدست آمده اند. اما با توجه به شکل (۴-۲-۳۷-۵)، نوسانات توان اکتیو استاتور نسبت به روش اول، کاهش یافته است به طوریکه خنثی کردن این نوسانات توسط مبدل سمت شبکه راحتتر صورت می گیرد و نوسانات این مبدل نیز نسبت به روش اول، با توجه به شکل (۵-۲-۳۷-۵)، کاهش یافته است. در شکل (۷-۲-۳۷-۵)، نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی، مشهود می باشد که البته در مقایسه با نوسانات گشتاور بدست آمده در شرایطی که هیچگونه کنترلی بر روی جریانهای توالی منفی روتور صورت نمی گیرد، کاهش چشمگیری پیدا کرده است. نوسانات ولتاژ خازن DC-Link که ناشی از نوسانات توانها می باشد، در شکل (۸-۲-۳۷-۵) مشهود است.

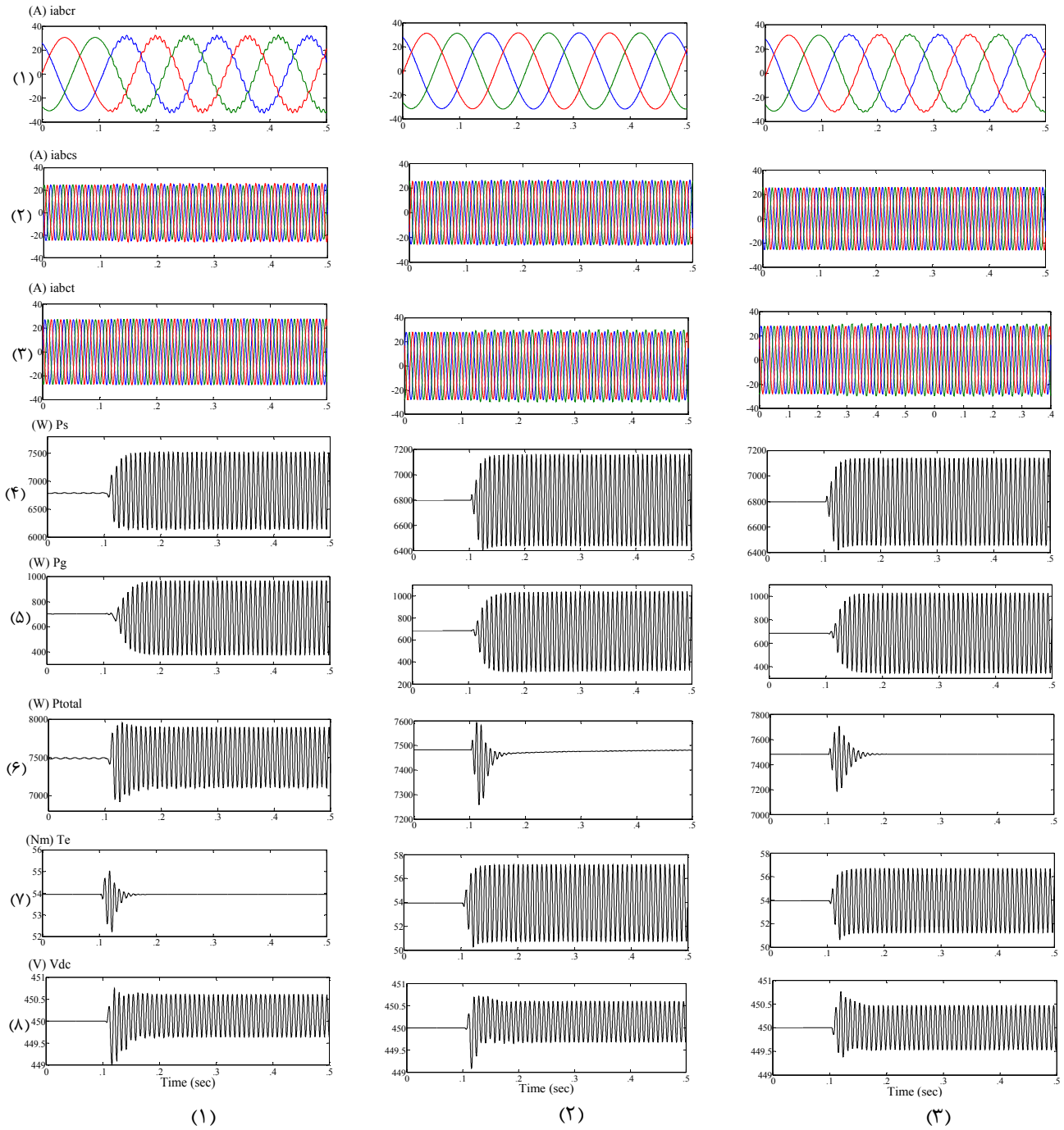
در روش چهارم، با متعادل کردن جریان استاتور، دامنه نوسانات توان اکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی نیز کاهش قابل توجهی می یابد که این امر در نمودارهای مربوطه در شکل های (۵-۳۷-۳-۲)، (۴-۳۷-۳-۴) و (۷-۳۷-۳-۵) مشهود می باشد. تحت این شرایط، دامنه نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی نیز نسبت به حالتی که هیچگونه کنترلی بر روی جریانهای توالی منفی روتور صورت نمی گیرد نسبتاً خوبی داشته است. با توجه به کاهش دامنه نوسانات توان اکتیو استاتور، خنثی کردن این نوسانات توسط مبدل سمت شبکه، راحتتر صورت می گیرد و دامنه نوسانات توان اکتیو خروجی از مبدل نیز نسبت به روش اول، با توجه به شکل (۵-۳۷-۳-۵)، کاهش خوبی پیدا کرده است. نوسانات ولتاژ DC-Link نیز فقط ناشی از نوسانات توان ورودی از شفت روتور می باشد که برای

کاهش دامنه این نوسانات نیز می توان از خازن با ظرفیت بزرگتر برای DC-Link استفاده کرد (شکل (۵-۳۷-۳-۸)).

در جدول (۵-۱)، مقایسه ای بین روشهای کنترل هماهنگ مبدلهای سمت روتور و شبکه مذکور، به ازای وقوع نامتعادلی ولتاژ ۵٪ در پایانه های استاتور، صورت گرفته است. محاسبه میزان درصد نامتعادلی جریانهای سه فاز استاتور و نیز جریانهای سه فاز کل خروجی از DFIG، بر اساس استاندارد IEC 60034-26 صورت گرفته است. همچنین میزان درصد نامتعادلی جریان روتور نیز با توجه به نسبت دامنه جریان توالی منفی روتور به دامنه جریان توالی مثبت آن، بدست آمده است. میزان درصد نوسانات دیگر در این جدول نیز، نسبت بین دامنه نوسانات و دامنه مؤلفه ثابت هر متغیر را نشان می دهند.

جدول (۵-۱): مقایسه بین روشهای کنترل هماهنگ مبدلهای سمت روتور و شبکه به ازای وقوع نامتعادلی ولتاژ ۵٪ در پایانه های استاتور

| روش کنترلی                            | بدون کنترل جریانهای توالی منفی | روش اول | روش دوم | روش سوم | روش چهارم |
|---------------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|-----------|
| درصد نامتعادلی جریان استاتور          | ۴۳                             | ۵       | ۵       | ۵       | ۰         |
| درصد نامتعادلی جریان کل خروجی از DFIG | ۴۶                             | ۵/۴     | ۰       | ۵       | ۵         |
| درصد نامتعادلی جریان روتور            | ۳۹/۶                           | ۵/۸     | ۵/۸     | ۰       | ۴         |
| درصد نوسانات $P_s$                    | ۴۲/۹                           | ۱۰/۷    | ۱۰/۷    | ۵/۳     | ۵         |
| درصد نوسانات $P_g$                    | ۹۱/۷                           | ۹۳/۶    | ۳۷/۸    | ۵۲      | ۴۹        |
| درصد نوسانات $P_{total}$              | ۴۶                             | ۰       | ۵/۳     | ۰       | ۰         |
| درصد نوسانات $T_e$                    | ۴۵/۳                           | ۰       | ۰       | ۵/۸     | ۵         |
| درصد نوسانات $V_{dc}$                 | ۰/۲۴                           | ۰       | ۰/۱۴    | ۰/۱۳    | ۰/۱۱      |



شکل (۵-۳۷): نتایج شبیه سازی رفتار DFIG به ازای وقوع نامتعادلی ولتاژ ۵٪ در پایانه های استاتور، با کنترل میدل های آن با توجه روشهای دوم، سوم و چهارم (۱): نتایج شبیه سازی برای روش دوم (۲): نتایج شبیه سازی برای روش سوم (۳): نتایج شبیه سازی برای روش چهارم

# فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات



## ۵-۱- نتیجه گیری:

نیروگاههای بادی معمولاً در مناطق دارای شرایط مساعد از لحاظ وضعیت وزش باد، احداث می گردند به طوریکه اینگونه مناطق معمولاً در نقاط دور دست واقع شده اند. از دیدگاه شبکه های قدرت، اینگونه مناطق در انتهای خطوط انتقال توان قرار گرفته اند که وقوع نامتعادلی ولتاژ در این نقاط، امری غیر معمول نمی باشد. همچنین ممکن است نامتعادلی ولتاژ، در اثر توزیع نامتعادل بار در یک شبکه ضعیف متصل به نیروگاه بادی، بوجود بیاید.

وقوع نامتعادلی ولتاژ شبکه در محل اتصال نیروگاه بادی به شبکه، می تواند اثرات مخربی بر روی ژنراتور و توربین بادی نیروگاه داشته باشد. به طوریکه وقوع یک نامتعادلی ولتاژ پایین در پایانه های ماشین، می تواند باعث ایجاد جریانهای نامتعادل بالا در سیم پیچ استاتور گردد. این جریانهای نامتعادل بالا نیز باعث افزایش حرارت نامتعادل در سیم پیچ های ماشین می گردد و در نتیجه اثرات مخربی بر سیم پیچ ها و عایق و هسته ماشین می گذارد. از طرفی نیز بعلت جاری شدن جریانهای توالی منفی روتور در این شرایط، جریانهای روتور نیز دارای نوسان خواهند شد به طوریکه جریانهای نامتعادل استاتور و نیز جریانهای نوسانی روتور، باعث ایجاد نوساناتی با دامنه زیاد و فرکانسی معادل با ۲ برابر فرکانس شبکه در گشتاور الکترومغناطیسی، توان اکتیو و راکتیو خروجی از استاتور و نیز ولتاژ DC-Link می گردد. به طوریکه این نوسانات می توانند آسیب های شدیدی را به توربین و ژنراتور وارد سازند.

حال با توجه به اینکه در این شرایط، متغیرهای ولتاژ و جریان و شار دارای مؤلفه های توالی مثبت و منفی می باشند بنابراین مطلوب است که در این شرایط از ۲ دستگاه مرجع سنکرون مثبت  $(dq)^+$  و دستگاه مرجع سنکرون منفی  $(dq)^-$  استفاده شود. به طوریکه کنترل DFIG در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^+$ ، دقیقاً مشابه با کنترل آن در شرایط متعادل است و اهدافی که برای این کنترل در نظر گرفته می شود دقیقاً همان اهدافی است که برای کنترل DFIG در شرایط متعادل، مشخص شده

است. اما اهمیت کنترل DFIG در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$  در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه، بسیار حائز اهمیت است.

در این شرایط، برای کنترل جریانهای توالی منفی روتور و نیز جریانهای توالی منفی خروجی از مبدل سمت شبکه، در دستگاه مرجع سنکرون  $(dq)^-$ ، توسط مبدلهای سمت روتور و شبکه، می توان اهداف گوناگونی را در نظر گرفت. به طوریکه در این پایان نامه، از ترکیب این اهداف، روشهای زیر برای کنترل هماهنگ مبدلهای سمت روتور و شبکه، بدست آمدند و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند:

۱- از بین بردن نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی و توان اکتیو کل خروجی از DFIG

۲- از بین بردن نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی و متعادل کردن جریانهای سه فاز خروجی از

DFIG

۳- از بین بردن نوسانات جریانهای سه فاز روتور و توان اکتیو کل خروجی از DFIG

۴- متعادل کردن جریان های سه فاز استاتور و از بین بردن نوسانات توان اکتیو کل خروجی از

DFIG

در بین روشهای فوق، روش اول نسبت به سایر روشها، کاملتر به نظر می رسد. اما در این روش برای از بین بردن نوسانات توان اکتیو کل خروجی، بایستی نوسانات توان اکتیو خروجی از استاتور و GSC، یکدیگر را خنثی نمایند. بنابراین با افزایش درصد نامتعادلی ولتاژ، دامنه نوسانات توان اکتیو استاتور و در نتیجه دامنه نوسانات توان اکتیو خروجی از GSC نیز افزایش می یابد که با توجه به محدودیتهای این مبدل، کنترل کامل برای خنثی کردن نوسانات توان اکتیو استاتور مقدور نمی باشد و همچنین می تواند به این مبدل، آسیب وارد کند. در روش دوم، به نوسانات ایجاد شده در توان اکتیو کل خروجی از DFIG، توجهی نشده است بنابراین کاربرد این روش در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه، باعث پایین آمدن کیفیت توان خروجی از DFIG، می گردد. برای حل مشکل محدودیت مبدل سمت شبکه، برای حذف نوسانات توان اکتیو استاتور به ازای وقوع نامتعادلی ولتاژ بالاتر، روش های سوم و چهارم ارائه می گردد. به طوریکه در روش سوم، جریانهای توالی منفی روتور توسط مبدل سمت روتور،

در مقدار صفر تنظیم می گردند. تحت این شرایط نوسانات گشتاور و توان اکتیو استاتور تا حدود خوبی کاهش می یابند و شرایط برای کنترل مبدل سمت شبکه به منظور خنثی کردن نوسانات توان اکتیو استاتور، راحتتر می گردد. در روش چهارم نیز، جریانهای dq توالی منفی روتور، میانگینی از جریانهای مرجع بدست آمده برای حذف نوسانات توان اکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی، در نظر گرفته می شوند. جریانهای مرجع بدست آمده برابر با جریانهای مرجع در نظر گرفته شده برای متعادل کردن جریان استاتور می باشند. بنابراین تحت این شرایط، علاوه بر کاهش دامنه نوسانات توان اکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی، جریان های سه فاز استاتور نیز متعادل می گردند. همچنین با توجه به نتایج شبیه سازی بدست آمده در این پایان نامه، دامنه نوسانات توان اکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی در این روش نسبت به روش سوم، کمتر می باشد. لذا با بکارگیری این روش نیز، کنترل مبدل سمت شبکه برای خنثی کردن نوسانات توان اکتیو استاتور، راحتتر می گردد.

حال از آنجا که برای کنترل مبدل سمت روتور، از دستگاه dq همراستا با بردار شار استاتور و یا دستگاه dq همراستا با بردار ولتاژ استاتور استفاده می گردد و نیز اینکه، مبدل سمت شبکه در دستگاه dq همراستا با ولتاژ استاتور، کنترل می گردد بنابراین برای پیاده سازی کنترل هماهنگ مبدلها، با توجه به دستگاههای مرجع مورد استفاده فوق، ۲ حالت زیر بدست می آید:

۳- کنترل مبدلهای سمت روتور و شبکه، به ترتیب در دستگاه های dq همراستا با بردار شار و

ولتاژ استاتور

۴- کنترل مبدلهای سمت روتور و شبکه، در دستگاه dq همراستا با بردار ولتاژ استاتور

با توجه به اینکه، تخمین زاویه بردار ولتاژ استاتور بخصوص در شرایط نامتعادلی ولتاژ استاتور، دقیقتر و در عین حال ساده تر صورت می گیرد بنابراین پیاده سازی کنترل هماهنگ مبدلهای سمت روتور و شبکه در دستگاه مرجع dq همراستا با بردار ولتاژ استاتور، در این شرایط، نتایج بهتری را به همراه دارد.

## ۵-۲- پیشنهادات:

در شرایط وقوع نامتعادلی ولتاژ بالا در شبکه، برای رفع مشکل محدودیت مبدل سمت شبکه به منظور حذف نوسانات توان اکتیو کل خروجی از DFIG، پیشنهاد می گردد که از ۲ روش پیشنهادی سوم و چهارم به جای روش اول، استفاده گردد. حال با توجه به نتایج شبیه سازی بدست آمده در این پایان نامه، دامنه نوسانات توان اکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی در این روش چهارم نسبت به روش سوم، کمتر می باشد. لذا بکارگیری روش چهارم به جای روش سوم، در شرایط وقوع نامتعادلی ولتاژ بالا در شبکه، منطقی تر به نظر می رسد.

همچنین با توجه به اینکه، نتایج بهتری از پیاده سازی کنترل هماهنگ مبدل‌های سمت روتور و شبکه، در دستگاه مرجع dq همراه با بردار ولتاژ استاتور، بخصوص در شرایط نامتعادلی ولتاژ شبکه، بدست می آید بنابراین، پیشنهاد می گردد که از این دستگاه برای کنترل مبدل‌ها، استفاده گردد.

مراجع

## مراجع:

- [1] T. Ackermann, (2005), “**Wind Power in Power Systems**”, NJ: Wiley, (ISBN: 0-470-85508-8), Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [2] S. Muller, M. Deicke, and R. W. De Doncker. (2002), “Doubly fed induction generator systems for wind turbines”, **IEEE Ind. Appl. Mag.**, vol. 17, n. 1, pp. 26–33.
- [3] M. Yamamoto and O. Motoyoshi, (1991), “Active and reactive power control for doubly-fed wound rotor induction generator,” **IEEE Trans. Power Electronic**, vol. 6, n. 4, pp. 624–629.
- [4] L. Xu, (2006), “Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation,” **IEEE Trans. Energy Conversion**, vol. 21, n. 3.
- [5] F. M. Hughes, O. Anaya-Lara, N. Jenkins, and G. Strbac, (2005), “Control of DFIG-based wind generation for power network support,” **IEEE Trans. Power Systems.**, vol. 20, n. 4, pp. 1958–1966.
- [6] M. Kayıkcı, J. V. Milanović, (2007), “Reactive Power Control Strategies for DFIG-Based Plants,” **IEEE Trans. Energy Conversion**, VOL. 22, N. 2.
- [7] L. Holdsworth, X. G. Wu, and J. B. Ekanayake, (2003), “Comparison of fixed speed and doubly fed induction wind turbines during power system disturbances,” *Proc. Inst. Elect. Eng. Generation, Transm. Distrib.*, vol. 150, n. 3, pp. 343–352.
- [8] R. Pena, J.C Clare, G.M Asher, (1996), “Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind- energy generation,” **IEEE Proc. Electric Power Appl.**, vol. 143, n. 3.
- [9] B. Hopfensperger, D. Atkinson, and R. A. Lakin, (1999), “Stator flux oriented control of a cascaded doubly-fed induction machine,” **IEE Proc. Electr. Power Appl.**, vol. 146, n. 6, pp. 597–605.
- [10] A. V. Jouanne, B. Baberjee, (2001), “Assessment of voltage unbalance,” **IEEE Trans. Power Delivery**, vol. 16, n. 4.
- [11] P. Gnacinski, (2008), “Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over- or under voltages,” **IEEE Trans. Energy Conversion.**, vol. 23, n. 2, pp. 363–371.

- [12] F. Jiang, Z. Q. Bo, and R. Li, (1998), "Performance of induction generator in parallel with an unbalanced three phase system," in **Proc. 1998, POWERCON**, vol. 2, pp. 1193–1197.
- [13] E. Muljadi, T. Batan, D. Yildirim, and C. P. Butterfield, (1999), "Understanding the unbalanced-voltage problem in wind turbine generation," in **Proc. 34th IAS Annu. Meet.**, vol. 2, pp. 1359–1365.
- [14] S. A. Papathanassiou and M. P. Papadopoulos, (2001), "Mechanical stresses in fixed-speed wind turbines due to network disturbances," **IEEE Trans. Energy Conversion.**, vol. 16, n. 4, pp. 361–367.
- [15] Y. Zhou, P. Bauer, J. A. Ferreira and J. Pierik, (2009), "Operation of Grid-Connected DFIG under Unbalanced Grid Voltage Condition," **IEEE Trans. Energy Conversion**, vol. 24, n. 1.
- [16] T. K. A. Brekken and N. Mohan, (2007), "Control of a doubly fed induction wind generator under unbalanced grid voltage conditions," **IEEE Trans. Energy Conversion**, vol. 22, n. 1, pp. 129–135.
- [17] L. Xu, (2008), "Coordinated Control of DFIG's Rotor and Grid Side Converters during Network Unbalance," **IEEE Trans. Power Electronic**, vol. 23, n. 3.
- [18] A. Tapia, G. Tapia, J.X. Ostolaza, J.R. Saenz, (2003), "Modeling and control of a wind turbine driven DFIG," **IEEE Trans. Energy Conversion**. vol. 18, n. 2, pp. 194-204.
- [19] J. B. Ekanayake, L. Holdsworth, X. G. Wu, and N. Jenkins, (2003), "Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines," **IEEE Trans. Power Systems**, vol. 18, n. 2, pp. 803–809.
- [۲۰] پال. سی. کراوز، (۱۳۸۶) "تحلیل ماشینهای الکتریکی" جلد اول، چاپ دوم، دکتر سید مرتضی سقائیان نژاد ومهندس حسن نیک خواجوئی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [21] Vic Gosbell, Sarath Perera , Vic Smith , (2002), " Voltage Unbalance ," Technical Note No.6, Power Quality Centre, University of Wollongong.
- [22] IEC Standards, (1994), "IEC61000-X-X - Electromagnetic compatibility (EMC)".
- [23] L. Xu, Yi Wang, (2007), "Dynamic Modeling and Control of DFIG-Based Wind Turbines Under Unbalanced Network Conditions," **IEEE Trans. Power Systems**, vol. 22, n. 1.

- 
- [24] H. Bing, H. Kang, N. Heng, (2007), "Enhanced control of DFIG-used back-to-back PWM VSC under unbalanced grid voltage conditions," **Journal of Zhejiang University SCIENCE A**.
- [25] L. Xu, (2008), "Enhanced Control and Operation of DFIG-Based Wind Farms during Network Unbalance," **IEEE Trans. Energy Conversion**, vol. 23, n. 4.
- [26] Y. Wang and L. Xu, (2010), "Coordinated Control of DFIG and FSIG-Based Wind Farms Under Unbalanced Grid Conditions," **IEEE Trans. Power Delivery**, vol. 25, n. 1.
- [27] Javan.E, Darabi. A, (2011), "A new control strategy of DFIG-based wind turbines under unbalanced grid voltage conditions," **PEDSTC Conference**, pp. 175-180.



## Abstract

The control of Doubly-fed induction generators (DFIG) based wind turbine, regardless of unbalanced voltage conditions cause malfunction of DFIG. If these conditions are neglected to control of the DFIG, undoubtedly occurring small unbalanced voltage in the terminals of the machine can lead to creating high unbalanced currents in the stator windings that causes the trips in the wind farms. Furthermore, occurring unbalanced voltage in the network, creates the oscillations with high amplitude at double the network frequency in the electromagnetic torque and power and DC-Link voltage. In this thesis, the DFIG system is modeled, under balanced conditions, and then the vector control method for controlling the converters of DFIG is analyzed. Then by modeling the DFIG system, under unbalanced voltage conditions, the unbalanced voltage effects on its performance are analyzed. Thus, a variety of control methods is presented to improve the performance of the DFIG based wind turbine. In all these control strategies, the rotor side converter (RSC) and grid side converter (GSC) are controlled in two positive and negative  $((dq)^+$  and  $(dq)^-$ ) reference frames. It is worth noting that the control of these converters in the  $(dq)^+$  frame is the same as the control of them under balanced conditions. A variety of goals can be considered for controlling the negative sequence currents by of the RSC and GSC, in the  $(dq)^-$  reference frame. Therefore, the different strategies can be applied for controlling both the RSC and GSC. In the first control strategy, the RSC is controlled in the  $(dq)^-$  frame to eliminate the electromagnetic torque oscillations. However, the GSC is controlled to cancel the oscillation of the stator active power by its output active power. But In this strategy, when the voltage unbalance is somewhat severe, the amplitude of stator active power oscillations increases and the compensation of the stator active power oscillation will not be achieved completely, due to limited capacity of the GSC. In this thesis, tow control strategies are proposed to achieve more improved performance of the DFIG under these conditions. In the first one, the rotor current pulsation is eliminated by controlling the RSC. This control target gives good attenuations of both stator active power and torque oscillations. Therefore, the GSC is easily controlled to eliminate the total active power oscillations. In the second one, the negative sequence reference rotor currents are given as the average of the reference negative sequence currents obtained for eliminating the electromagnetic torque and stator active power oscillations. These reference currents are also used for balancing the stator currents. Thus this target not only removes any stator current unbalance but also gives good attenuations of both the stator active power and torque oscillations. According to the simulation results, the

amplitude of the electromagnetic torque and stator active power oscillations obtained in this strategy, are smaller than those of obtained in the first proposed control strategy. Hence the control of the GSC for eliminating the oscillation of the total active power is done easily.

Furthermore, high computational error is accompanied with the estimation of the positive stator-flux space vector position, especially under unbalanced voltage conditions. Therefore, in order to achieve the accurate control of the DFIG, the proposed control strategies of the RSC and GSC are implemented in the stator-voltage oriented frame. The simulation results obtained for a 7.5 kW DFIG based wind turbine validate the enhancement of system operation using the proposed control strategies during unbalanced voltage network.

**Key words:** Doubly-fed Induction Generator (DFIG), Wind Turbine, Control, Reference Frame, Unbalanced Voltage.