کنترل مستقیم توان همزمان در مبدل‌های سمت شبکه و سمت روتور ژنراتور القایی دو سو تغذیه در توربین‌های بادی با حذف هارمونیک‌های جریان شبکه

سید نعمت‌اله حسینی‌موسوی [۱]، حسن براتی* [۲]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، seyednematmosavi@gmail.com
*۲- دانشیار گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، barati216@gmail.com
تاریخ دریافت: ۹۸/۷/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۸/۹/۲۰

چکیده: در این مقاله، از روش کنترل مستقیم توان (DPC) جهت کنترل توان اکتیو و راکتیو DFIG در مرجع سرعت ثابت و نیز مرجع سرعت متغیر توربین براساس منحنی توان بهینه استفاده شده است. از طرفی کاربرد وسیع بارهای غیرخطی در شبکه‌های قدرت سبب بروز مشکلاتی از جمله جریان‌های هارمونیکی بالا شده است. بارهای غیرخطی مانند یک منبع جریان هارمونیکی عمل کرده و جریان‌های هارمونیکی را به شبکه تزریق می‌کنند. وجود هارمونیک‌ها در شبکه باعث افت ولتاژ هارمونیکی شده و سبب می‌شود تا سایر مصرف‌کنندگان ولتاژی با اغتشاش دریافت کنند که خود سبب افزایش دمای خازن‌های تصحیح ضریب توان، موتورها، ترانسفورماتورها و کابل‌ها و عملکرد نادرست تجهیزات حفاظتی می‌شود. از آنجاییکه DFIG کار تزریق توان اکتیو و راکتیو به شبکه را به عهده دارد می‌توان با تزریق توان مناسب، نوسان توان ناشی از بارهای غیرخطی در شبکه را جبران کرد لذا در این مقاله، روش کنترل مستقیم توان جهت کنترل توان DFIG پیاده‌سازی شده و نیز جهت کاهش هارمونیک‌های جریانی شبکه در حضور بارهای غیرخطی با بکارگیری تدابیر کنترلی مناسب همزمان از طریق مبدل‌های سمت روتور و سمت شبکه اقدام شده است. در همین راستا از محیط نرم‌افزاری Matlab/Simulink جهت شبیه‌سازی سیستمی شامل یک واحد نیروگاهی بادی مبتنی بر DFIG استفاده شده است و نتایج حاصله در سناریوهای مختلف تحلیل و مقایسه شده‌اند. نتایج حاصله نشان از کنترل دقیق و سریع توان DFIG همراه با کاهش قابل توجه هارمونیک جریانی شبکه داشته است.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی، ژنراتور القایی‌دو سو تغذیه، کنترل مستقیم توان، منحنی توان بهینه، هارمونیک جریانی شبکه

۱-مقدمه

امروزه سیستم‌های سرعت متغیر در نیروگاه‌های بادی به دلیل قابلیت دریافت حداکثر توان از انرژی باد نسبت به سیستم‌های سرعت ثابت بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از ساختارهایی که بعنوان سیستم سرعت متغیر بکار می‌رود ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) می‌باشد این ماشین به دلیل در برداشتن قابلیت‌هایی نظیر: انعطاف‌پذیری بالا، عملکرد چند ناحیه‌ای، قدرت بالا، کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو، کاهش تنش‌های مکانیکی، بهبود کیفیت توان، و نیز بدلیل قرار گرفتن مبدل‌ها در مدار روتور با توانی معادل ۳۰ درصد توان ژنراتور که باعث کاهش هزینه طراحی و ساخت مبدل‌ها می‌شود گزینه ایده‌آلی برای بهره‌برداری کارآمد از انرژی باد محسوب می‌شود[۱]. از سویی تغییرات سرعت باد و نوسانات توان ناشی از آن، کیفیت توان و عملکرد تجهیزات شبکه را تحت تاثیر قرار می‌دهد لذا جهت بهره‌برداری با حداکثر راندمان و با حداقل نوسانات توان روش‌های کنترلی متعددی جهت کنترل توان اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی دو سو تغذیه ابداع شد از طرفی وجود بارهای غیرخطی باعث تولید هارمونیک در جریان شبکه قدرت می‌شود برخی از آثار سوء هارمونیک‌ها بر سیستم قدرت عبارتند از: تلفات اضافی اهمی و تلفات هسته و در نتیجه کاهش راندمان ماشین‌های الکتریکی، کاهش راندمان ترانسفورماتورها[۲]، شکست عایقی کابل‌ها، تداخل با سیستم-های مخابراتی و PLC، ایجاد خطا در دستگاه‌های اندازه‌گیری و رله‌های حفاظتی، عملکرد نامناسب سیستم‌های کنترل و ایجاد نوسانات مکانیکی می‌باشد[۳]. بطور معمول جهت حذف هارمونیک از فیلتر فعال استفاده می‌شود.

امروزه تکنیک‌های متعددی با درجه پیچیدگی متفاوت جهت کنترل توان وگشتاور ماشین القایی مطرح شده است رایج‌ترین روش‌ها عبارتند

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.0]
Journal of Novel Applied Power - Vol. 8-No. 3-Autumn 2019

از: روش‌های کنترل اسکالر (که بیشتر در کنترل ماشین القایی در وضعیت موتوری بکار می‌روند)، روش کنترل برداری [۱](VC)، روش کنترل مستقیم گشتاور [۲](DTC) و روش کنترل مستقیم توان (DPC) (که پرکاربردترین روش‌ها برای کنترل ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) می‌باشند)، کلیه این روش‌ها مبتنی بر جهت‌یابی شار استاتور و یا روتور می‌باشند[۴]. روش کنترل برداری امکان کنترل ماشین القایی را شبیه ماشین DC فراهم می‌سازد، عیب اصلی این روش وابستگی به پارامترهای دقیق ژنراتور مانند مقاومت و اندوکتانس روتور می‌باشد که با تغییر شرایط کاری ماشین تغییر می‌کنند و عملکرد سیستم کنترل را مختل می‌نمایید همچنین سیستم الگوریتم پیچیده‌ای دارد که پیاده-سازی آن را مشکل می‌سازد[۵و۶]. روش DTC توسط اتاکاهاشی در سال ۱۹۸۶ پیشنهاد شد این روش استفاده از پارامترهای ماشین را به حداقل می‌رساند و پیچیدگی الگوریتم‌های روش کنترل برداری را ندارد و فقط جهت تخمین شار، وابسته به مقاومت استاتور می‌باشد روش DTC مستقیما گشتاور و شار ماشین را بوسیله انتخاب بردارهای ولتاژ مناسب از جدول کلیدزنی و با استفاده از موقعیت شار و گشتاور استاتور کنترل می‌کند از مسائل عمده مرتبط با طرح DTC این است که عملکرد آن در راه‌اندازی و در بهره‌برداری با سرعت بسیار پایین کاهش می‌یابد[۷]. روش ارائه شده جهت رفع این مشکل استفاده از جدول سوئیچینگ اصلاح شده برای بکارگیری بردارهای ولتاژ موجود در توالی مناسب، یا بکارگیری روش‌های حدسی و پیشگویانه می‌باشد[۸و۹]. مشکل دیگر DTCتغییرات فرکانس سوئیچینگ مبدل می‌باشد که به طور قابل توجهی طراحی مدار قدرت را دشوار می‌سازد. پهنای باند کنترل‌کننده هیسترزیس باید با دقت خاصی جهت تضمین آنکه فرکانس سوئیچینگ برای تمام شرایط کاری در حد مجاز مبدل توان باقی می‌ماند، انتخاب گردد[۱۰]. روش‌های DTC اصلاح شده همراه با مدولاسیون بردار فضایی، جهت دستیابی به یک فرکانس سوئیچینگ ثابت در مراجع[۱۱و۱۲] بکار گرفته شده است از دیگر معایب این روش نوسان گشتاور می‌باشد که سیستم کنترل را با مشکل مواجه می‌کند که برای رفع آن از مدولاسیون بردار فضایی استفاده شده است[۱۳].

کنترل DPC سیستم‌های توبین بادی مجهز به DFIG در مراجع[۷و۱۴] مطرح شده است. در مرجع[۱۴] حالات سوئیچینگ مبدل از یک جدول سوئیچینگ بهینه مبتنی بر خطاهای لحظه‌ای بین مقادیر مرجع و برآورد شده توان اکتیو و راکتیو و موقعیت زاویه‌ای بردار ولتاژ ترمینال مبدل انتخاب می‌شوند. در مراجع[۱۵و۱۶] جدول کلیدزنی براساس موقعیت شار روتور و وضعیت توان اکتیو و راکتیو استاتور تنظیم می‌گردد، روش تخمین شار روتور به طور قابل توجهی با تغییرات پارامتر ماشین و از جمله مقاومت روتور تحت تاثیر قرار می‌گیرد. درمراجع[۷و۱۷]، روش DPC مبتنی بر تخمین شار استاتور ارائه شده است. زمانی که ولتاژ (شبکه) استاتور تقریباً فاقد هارمونیک با فرکانس ثابت است، در آن صورت تخمین شار استاتور DFIG می‌تواند قابل اطمینان باشد. بردارهای سوئیچینگ از جدول بهینه سوئیچینگ با استفاده از موقعیت تخمینی شار استاتور و خطاهای توان‌های اکتیو و راکتیو انتخاب شده بودند. بنابراین، کنترل سیستم بسیار ساده است و تاثیر پارامترهای ماشین بر روی عملکرد سیستم قابل صرفنظر می‌باشد. با این حال، همانند DTC مرسوم، DPC نیز دارای فرکانس سوئیچینگ می‌باشد که به طور قابل توجهی با تغییرات توان اکتیو و راکتیو، سرعت کاری ماشین (لغزش روتور) و پهنای باند هیسترزیس کنترل‌کننده‌های توان تغییر می‌یابد[۱۴]. جهت رفع این مشکل روش جدید کنترل DPC با فرکانس سوئیچینگ ثابت و عملکرد گذرای بهبود یافته ارائه شده است[۶]. از دیگر معضلات روش کنترل مستقیم توان، نوسانات توان می‌باشد که در [۱۸] با استفاده از مبدل ماتریسی اقدام به کاهش نوسان شده است. در شبکه برق برحسب ضرورت بارهای غیرخطی نیز وجود دارند حضور بارهای غیرخطی باعث اعوجاج هارمونیک جریان شبکه می-گردد که بطور معمول از فیلتر فعال جهت حذف هارمونیک استفاده می‌شود در مرجع[۱۹] از فیلتر اکتیو تطبیق‌پذیر جهت حذف هارمونیک استفاده شده است جریان بار با استفاده از شبکه عصبی شناسایی شده سپس جریانی که باید فیلتر به شبکه تزریق کند بدست می‌آید. در مرجع[۲۰] از روش فیلترینگ القایی فعال جهت حذف هارمونیک و بهبود کیفیت توان استفاده شده است.

سیستم قدرت بادی می‌تواند بصورت همزمان برای تزریق قدرت الکتریکی به شبکه و فیلتر کردن هارمونیک جریان شبکه بکار رود. برخی مولفان به بررسی این موضوع پرداخته‌اند. گالیارد و همکاران روش جدیدی جهت تشخیص حوزه زمانی هارمونیک با استفاده از کنترل‌کننده هیسترزیس غیرخطی که مبتنی بر فیلتری با قابلیت انتخاب بالاست [۳](HSF) که فقط نیاز به اندازه‌گیری جریان دارد ارائه کردند[۲۱]. اما با این نوع کنترل‌کننده، فرکانس سوئیچینگ ثابت نیست و می‌تواند هارمونیک باند جانبی زیادی در اطراف فرکانس سوئیچینگ ایجاد کند. سوارس وهمکاران با استفاده از تئوری توان لحظه‌ایی p-q جهت استخراج جریان هارمونیکی بار استفاده کرده‌اند اما این روش اجازه تشخیص هارمونیک خاصی را نمی‌دهد[۲۲]، پاپاتاناسیو و پاپادوپولوس از فیلتر بالاگذر [۴](HPF) یا فیلتر پایین‌گذر [۵](LPF) برای تولید جریان‌های هارمونیک مرجع استفاده کردند[۲۳]. در مرجع [۲۴] کنترل‌کننده جریان PWM فرکانس ثابت به جای کنترل‌کننده پسماند غیرخطی بکار رفته است. سیستم ارائه شده علاوه بر حلقه قدرت مبتنی بر کنترل-برداری، حاوی حلقه اندازه‌گیری هارمونیک می‌باشد.

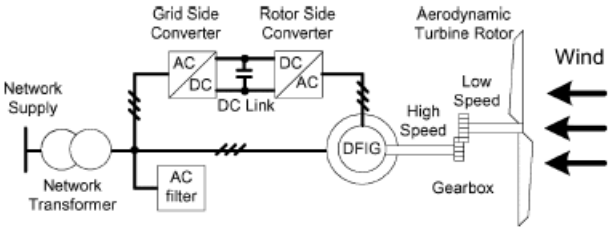
نوآوری در این مقاله، کنترل توان اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی دو سو تغذیه همزمان با حذف هارمونیک جریانی شبکه از روش کنترل مستقیم توان (DPC) از طریق همزمان در هر دو مبدل‌های سمت روتور و سمت شبکه در سرعت ثابت و سرعت متغیر می‌باشد. از آنجایی که تزریق توان اکتیو و راکتیو شبکه بر عهده DFIG می‌باشد، می‌توان با تزریق توان مناسب از طریق DFIG، هارمونیک جریانی ناشی از بار غیرخطی را حذف و نوسان توان ناشی از آن را حذف کرد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

در ادامه سازماندهی مقاله عبارت است از: کنترل مستقیم توان DFIG از طریق مبدل سمت روتور، کنترل مستقیم توان DFIG از طریق مبدل سمت شبکه، بلوک دیاگرام سیستم کنترل با در نظر گرفتن منحنی توان بهینه توربین بادی، بارهای غیرخطی و فیلتر اکتیو موازی، نتایج شبیه‌سازی عملکرد DFIG با روش DPC از مبدل سمت روتور، نتایج شبیه‌سازی با روش DPC در مبدل‌های سمت روتور و شبکه بدون جبران‌سازی، نتایج شبیه‌سازی با روش DPC در مبدل‌های سمت روتور و شبکه با حذف هارمونیک در سرعت ثابت، نتایج شبیه‌سازی با روش DPC در مبدل‌های سمت روتور و شبکه با حذف هارمونیک باسرعت متغیر، و نتیجه‌گیری.

۲-کنترل مستقیم توان DFIG از طریق مبدل سمت روتور

ساختار کلی DFIG، در شکل (۱) نشان داده شده است که در آن از طریق مبدل سمت روتور (RSC) کنترل توان اکتیو و راکتیو DFIG انجام می‌شود و جهت کنترل سطح ولتاژ لینک DC از مبدل سمت شبکه(GSC) استفاده می‌شود.

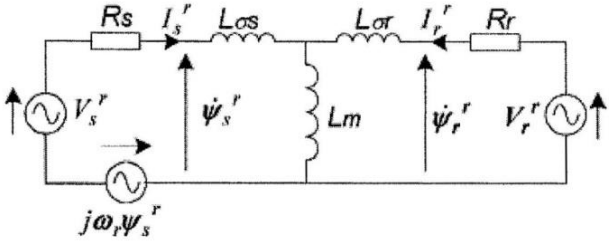


شکل(۱): ساختار کلی DFIG [۶]

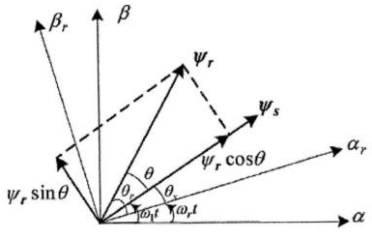
۲-۱-مدل دینامیکی DFIG در قاب مرجع روتور

مدار معادل یک DFIG در قاب مرجع روتور $(\alpha_r - \beta_r)$ در سرعت ω_r در شکل (۲) نشان داده شده است و ارتباط بردارهای شار استاتور و روتور در قاب‌های مرجع ثابت و روتور در شکل(۳) نشان داده شده است. در قاب مرجع روتور، بردارهای شار روتور و استاتور می‌تواند به صورت زیر بیان شود[۷]:

$$\psi_s^r = L_s I_s^r + L_m I_r^r \qquad (۱)$$
$$\psi_r^r = L_r I_r^r + L_m I_s^r$$



شکل(۲): مدار معادل یک DFIG در قاب مرجع روتور[۷].



شکل(۳): بردارهای شار استاتور و روتور در قاب های مرجع ثابت و روتور[۷].

با توجه به شکل‌های (۲) و (۳) و با صرفنظر کردن از تلفات مسی استاتور، توان اکتیو و راکتیو استاتور بصورت زیر بیان می‌شود[۷]:

$$P_s = \frac{3}{2}(\dot{\psi}_s^r + j\omega_r \psi_s^r).I_s^r \qquad (۲)$$

$$Q_s = -\frac{3}{2}(\dot{\psi}_s^r + j\omega_r \psi_s^r) \times I_s^r \qquad (۳)$$

با جایگزینی شار استاتور و روتور در قاب $\alpha_r - \beta_r$ روتور و با فرض اینکه شبکه AC متصل به استاتور متعادل است و سرعت روتور در طول دوره نمونه‌برداری تغییر نکند، توان‌های اکتیو و راکتیو استاتور بصورت زیر بیان می‌شوند:

$$P_s = -\frac{3}{2}\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} w_1 |\psi_s^r||\psi_r^r| \sin\theta \qquad (۴)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}\frac{w_1}{\sigma L_s}\psi_s^r \left| \left(\frac{L_m}{L_r}|\psi_r^r|\cos\theta - |\psi_s^r| \right) \right| \qquad (۵)$$

که $\theta = \theta_r - \theta_s$، زاویه‌ای میان بردارهای شار روتور و استاتور و $\sigma = (L_s L_r - L_m^2)/L_s L_r$، ضریب نشتی است. با مشتق‌گیری از (۴) و (۵) به معادلات زیر می‌رسیم:

$$\frac{dP_s}{dt} = -\frac{3}{2}\frac{L_m}{\sigma L_s L_r}\omega_1 |\psi_s^r| \frac{d(|\psi_r^r|\sin\theta)}{dt}$$
$$\frac{dQ_s}{dt} = \frac{3}{2}\frac{L_m}{\sigma L_s L_r}\omega_1 |\psi_s^r| \frac{d(|\psi_r^r|\cos\theta)}{dt} \qquad (۶)$$

با توجه به رابطه (۶)، می‌توان مشاهده کرد که تغییرات سریع توان اکتیو و راکتیو را بترتیب می‌توان با تغییر $|\psi_r^r|\sin\theta$ و $|\psi_r^r|\cos\theta$ به دست آورد. از شکل (۳)، $|\psi_r^r|\sin\theta$ در جهت عمود و $|\psi_r^r|\cos\theta$ هم جهت شار استاتور می‌باشد این بدین معنی است که، اگر تغییر شار روتور در جهت شار استاتور $|\psi_r^r|\cos\theta$ باشد ، توان راکتیو Q_s تغییر می‌کند. در مقابل، اگر تغییر شار روتور در ۹۰ درجه‌ای جهت شار استاتور $|\psi_r^r|\sin\theta$ باشد، توان اکتیو P_s تغییر می‌کند. موقعیت اولیه شار روتور و دامنه آن، به‌طور مستقیم بر تغییرات توان اکتیو و راکتیو تاثیر نمی‌گذارد.

۲-۲-کنترل شار روتور با استفاده از بردارهای ولتاژ مبدل سمت روتور:

برای یک مبدل دوسطحی نشان‌داده‌شده در شکل(۴)، هریک از خروجی‌های ساق‌های سه فاز υ_a, υ_b و υ_c می‌توانند دو سطح (V_d و

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

۰) داشته باشد. ولتاژهای خروجی سه فاز را می‌توان با یک بردار ولتاژ نشان داد و با توجه به سطوح ولتاژ خروجی هر مرحله هشت بردار ولتاژ ناشی از هشت حالت کلیدزنی وجود دارد. شکل(۵) این هشت بردار ولتاژ را به صورت $V_0(000)-V_7(111)$ نشان می‌دهد که در آن اعداد باینری در پرانتزها الگوی سوئیچینگ را در توالی فاز (a,b,c) بیان می‌کنند و زیرنویس V عبارت دسیمال اعداد باینری است. "1" به این معنی است که سوئیچ بالایی وصل و خروجی ولتاژ V_d است، در حالیکه "0" این معنی است که سوئیچ پایینی وصل و خروجی ولتاژ صفر است. در میان هشت بردار ولتاژ، دو بردار ولتاژ صفر هستند (V7,V0). و شش بردار فعال (اکتیو) می‌باشند (V1-V6). مشابه با شار استاتور، شار روتور یک DFIG در قاب مرجع روتور را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

$$\frac{d\psi_r^r}{dt}=V_r^r-R_rI_r^r \qquad (۷)$$

با صرف‌نظر کردن از اثر مقاومت روتور R_r ، رابطه (۷) نشان می‌دهد که تغییرات شار روتور توسط ولتاژ روتور اعمال شده به مدار روتور تعیین می‌شود. شار روتور در جهت بردار ولتاژ اعمال شده حرکت می‌کند و میزان تغییرات آن متناسب با دامنه بردار ولتاژ اعمال شده است. بنابراین، با انتخاب بردار ولتاژ مناسب، اندازه شار روتور را می‌توان کنترل نمود. انتخاب بردار ولتاژ نیز به موقعیت شار بستگی دارد لذا جهت تعیین موقعیت شار روتور و انتخاب بردار ولتاژ مناسب، صفحه $\alpha_r-\beta_r$ به شش منطقه (I-VI) تقسیم می‌شود که در شکل(۵) نشان داده شده است.

۳-۲-تاثیر بردار ولتاژ بر توان اکتیو و راکتیو

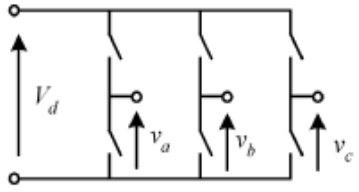
براساس رابطه (۷)، بردارهای ولتاژ صفر، مانع تغییرات شار روتور می‌شود، با صرف نظر از افت ولتاژ در مقاومت روتور، داریم:

$$d\left|\psi_r^r\right|/dt=0,\ d\theta_r/dt=0. \qquad (۸)$$

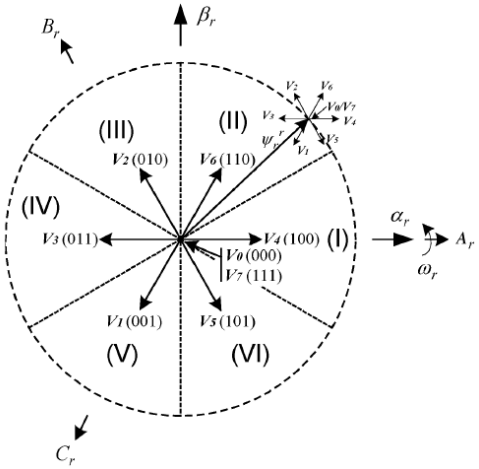
با جایگزینی رابطه (۸) در رابطه (۶) و در نظر گرفتن $\theta=\theta_r-\theta_s$ داریم:

$$\frac{dP_s}{dt}=\frac{3}{2}\frac{L_m}{\sigma L_sL_r}\omega_1\left|\psi_s^r\right|\left|\psi_r^r\right|cos(\theta_r-\theta_s)(\omega_1-\omega_r)$$
$$\frac{dQ_s}{dt}=\frac{3}{2}\frac{L_m}{\sigma L_sL_r}\omega_1\left|\psi_s^r\right|\left|\psi_r^r\right|sin(\theta_r-\theta_s)(\omega_1-\omega_r). \qquad (۹)$$

معادله (۹) نشان می‌دهد که اثر بردارهای فضای صفر بر روی توان اکتیو و راکتیو تا حد زیادی به علامت $(\omega_1-\omega_r)$ بستگی دارد. تحت حالت ژنراتوری، زاویه موقعیت شار روتور همیشه جلوتر از زاویه شار استاتور می‌باشد ($\theta_r>\theta_s$). بنابراین، برای حالت فوق سنکرون، سرعت روتور بالاتر از سرعت استاتور خواهد بود $(\omega_r>\omega_1)$ و اثر بردارهای ولتاژ صفر در جهت کاهش توان اکتیو ورودی و کاهش توان راکتیو خروجی خواهد بود و برای حالت زیرسنکرون تاثیری عکس آن دارد. اگر موقعیت شار استاتور معلوم باشد، تغییرات $\left|\psi_r^r\right|sin\theta$ و $\left|\psi_r^r\right|cos\theta$ را می‌توان به ازای هر بردار ولتاژ اعمال شده به روتور مشخص نمود. بنابراین، با توجه به (۹)، اثر هر یک بردار ولتاژ بر روی توان اکتیو و راکتیو در هر منطقه 60° درجه‌ای را می‌توان محاسبه نمود. تنها موقعیت شار استاتور مورد نیاز است، چرا که شار روتور اولیه بی‌ربط به تغییرات توان اکتیو و راکتیو است. بنابراین، اثرات هشت بردار ولتاژ بر توان اکتیو و راکتیو در هر ناحیه ۶۰ درجه‌ای در جدول(۱) نشان داده شده است.



شکل(۴): مبدل دوسطحی[۷].



شکل(۵): کنترل شار با استفاده از بردارهای ولتاژ[۷].

جدول(۱): تاثیر بردار ولتاژ در توان اکتیو ورودی و توان اکتیو خروجی (↑= افزایش، ↓ = کاهش)[۷].

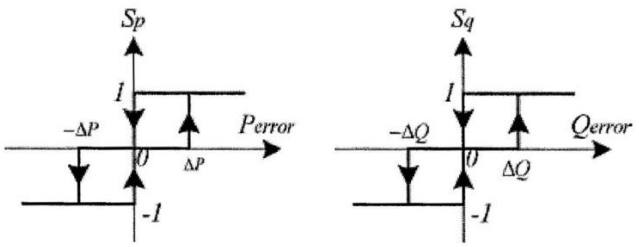
موقعیت ψ_s^r		I	II	III	IV	V	VI
V_1 (001)	Ps	↑	↓/↑	↓	↓	↑/↓	↑
	Qs	↓	↓	↓	↑	↑	↑
V_2 (010)	Ps	↓	↓	↑/↓	↑	↑	↓/↑
	Qs	↓	↑	↓	↑	↓	↓
V_3 (011)	Ps	↓/↑	↓	↑	↑/↓	↑	↑
	Qs	↓	↓	↑	↑	↑	↓
V_4 (100)	Ps	↑/↓	↑	↑	↓/↑	↓	↓
	Qs	↑	↑	↓	↓	↓	↑
V_5 (101)	Ps	↑	↑	↓/↑	↓	↓	↑/↓
	Qs	↑	↓	↓	↓	↑	↑
V_6 (110)	Ps	↓	↑/↓	↑	↑	↓/↑	↓
	Qs	↑	↑	↑	↓	↓	↓

موقعیت ψ_s^r			I—VI
V_0/V_7 (000)/(111)	$\omega_1>\omega_r$	Ps	↑
		Qs	↑
	$\omega_1<\omega_r$	Ps	↓
		Qs	↓

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

۴-۲-راهبرد کنترل مستقیم توان اکتیو و راکتیو

در روش کنترل مستقیم توان ابتدا ولتاژها و جریان‌هایAC سه فاز استاتور اندازه‌گیری شده‌اند و جهت محاسبه توان اکتیو و راکتیو و تخمین شار استاتور به قاب مرجع ساکن منتقل می‌شوند موقعیت روتور نیز اندازه‌گیری شده و برای تبدیل شار استاتور از قاب مرجع ($\alpha-\beta$) به قاب روتور ($\alpha_r-\beta_r$) استفاده می‌شود. توان اکتیو و راکتیو محاسبه شده، با مقادیر مرجع خود از طریق دو مقایسه‌گر هیسترزیس مقایسه می‌شوند و Sp و Sq ایجاد می‌شوند(شکل(۶)) و همراه با موقعیت شار استاتور محاسبه شده، به منظور انتخاب بردار ولتاژ مناسب از جدول کلیدزنی بهینه استفاده می‌شود. در نهایت نیز بردار ولتاژ انتخاب شده توسط مبدل سمت روتور به مدار روتور اعمال می‌گردد. بردار ولتاژ صفر دارای تاثیر متفاوت بر روی توان اکتیو و راکتیو برای سرعت‌های مختلف روتور دارد. با توجه به وجود مقاومت روتور، تاثیر بردار ولتاژ صفر پیچیده‌تر می‌شود، به ویژه هنگامی که سرعت روتور به سرعت سنکرون نزدیک می‌شود. بنابراین، بردار ولتاژ صفر هنگامی استفاده خواهد شدکه تفاضل مقدار لحظه‌ای توان اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری شده با مقدار مرجع صفر باشد.



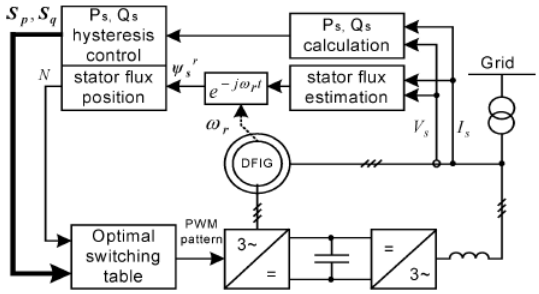
شکل(۶): کنترل‌کننده هیسترزیس توان اکتیو و راکتیو[۷].

براساس تحلیل بالا، جدول کلیدزنی بهینه (۲) مرتب شده است. درDPC نیز رابطه هندسی میان شارهای استاتور و روتور برقرار بوده و کنترل جامع شار روتور از طریق RSC انجام می‌پذیرد.

در شکل(۷) طرح کلی DPC جهت کنترل DFIG ارائه شده است.

جدول(۲): جدول کلیدزنی بهینه[۷].

		I	II	III	IV	V	VI
Sq=1	Sp=1	101	100	110	010	011	001
	Sp=0	100	110	010	011	001	101
	Sp=-1	110	010	011	001	101	100
Sq=0	Sp=1	001	101	100	110	010	011
	Sp=0	111/000	111/000	111/000	111/000	111/000	111/000
	Sp=-1	010	011	001	101	100	110
Sq=-1	Sp=1	001	101	100	110	010	011
	Sp=0	011	001	101	100	110	010
	Sp=-1	010	011	001	101	100	110



شکل(۷): طرح کلی DPC جهت کنترل DFIG در مبدل سمت روتور[۷].

۳-کنترل مستقیم توان DFIG از طریق مبدل سمت شبکه

مبدل سمت شبکه (GSC) جهت کنترل سطح ولتاژ خازن لینک DC مورد استفاده قرار می‌گیرد در این روش از جریان‌های خط نمونه‌برداری شده و ولتاژهای خط محاسبه می‌شوند و زاویه بردار فضایی ولتاژ تعیین می‌گردد. با استفاده از ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده، توان اکتیو و راکتیو ورودی نیز محاسبه می‌گردد.

مقدار مرجع توان راکتیو نیز برای داشتن ضریب توان نزدیک به یک، صفر در نظر گرفته می‌شود. برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده توان-های اکتیو و راکتیو، با مقادیر مرجع آنها از کنترل‌کننده هیسترزیس دو سطحی استفاده می‌شود در صورتیکه مقدار توان اندازه‌گیری شده از مقدارمرجع به اضافه باند هیسترزیس کنترل‌کننده بیشتر باشد، خروجی منفی یک می‌شود و اگر از مقدار مرجع منهای باند هیسترزیس کمتر باشد، یک می‌گردد. در غیر این صورت همان مقدار قبلی خود را حفظ می‌کند. زاویه بردار فضایی ولتاژ نیز بر طبق رابطه (۱۰) محاسبه می-گردد[۲۵]:

$$\phi = \tan^{-1}(V_q / V_d) \qquad (۱۰)$$

فضای برداری در این روش به دوازده بخش تقسیم می‌گردد. با استفاده از مقدار زاویه بردار فضایی و خروجی کنترل‌کننده‌های هیسترزیس، بردار مناسب از جدول کلیدزنی که قبلا حالت‌های مناسب استخراج شده و به کلیدها اعمال می‌گردد. حالت جدید کلیدها به گونه‌ای انتخاب شده تا برای هر بخش کمیت‌های توان اکتیو و راکتیو را به سمتی سوق دهند تا به مقدار مرجع خود نزدیک شوند با توجه به شکل(۸) روابط ولتاژ مبدل بصورت زیر می‌باشد. روابط (۱۲) و (۱۳) انتقال یافته رابطه (۱۱) به قاب مرجع سنکرون می‌باشد بار همان مبدل سمت روتور می‌باشد.

$$V_{abc} = RI_{abc} + L\frac{dI_{abc}}{dt} + V_{cabc} \qquad (۱۱)$$

$$V_q = RI_q + L\frac{dI_q}{dt} + \omega_1 LI_q + V_{cq} \qquad (۱۲)$$

$$V_d = RI_d + L\frac{dI_d}{dt} - \omega_1 LI_d + V_{cd} \qquad (۱۳)$$

می‌توان نشان داد که تغییرات توان اکتیو و راکتیو مبدل عبارتند از[۲۵]:

[Downloaded from ijepezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9] Electrical Power

$$\frac{dP}{dt} \propto V_m - V_{cd} \quad , \quad \frac{dQ}{dt} \propto V_{cq} \qquad (۱۴)$$

از طرفی داریم:

$$V_{cd} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c)\cos(\omega t) \\ + \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c)\sin(\omega t) \end{bmatrix} V_{dc} \qquad (۱۵)$$

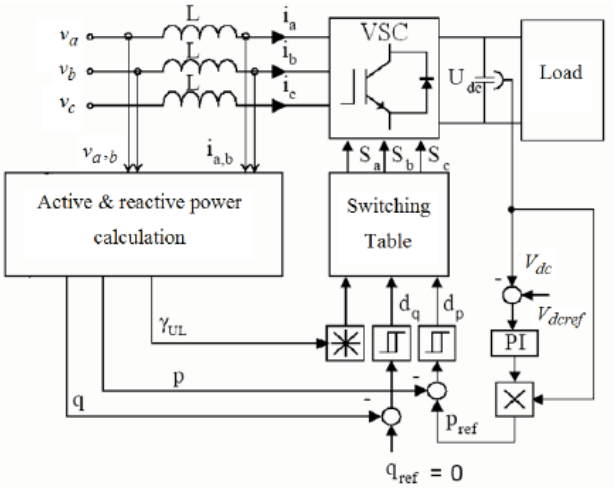
$$V_{cq} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c)\cos(\omega t) \\ - \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c)\sin(\omega t) \end{bmatrix} V_{dc} \qquad (۱۶)$$

در روابط فوق(S_a و S_b و S_c) ساق‌های مبدل دوسطحی می‌باشند ازطرفی مقدار نرمالیزه $\frac{V_d}{V_{dc}} = 0.6$ را در نظر می‌گیریم و با جایگزینی روابط (۱۵) و (۱۶) در روابط (۱۴) داریم:

$$\frac{dP}{dt} \propto V_d - V_{cd} = \frac{V_d}{V_{dc}} - \frac{V_{cd}}{V_{dc}} = 0.6 - \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c)\cos(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c)\sin(\omega t) \qquad (۱۷)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{V_{cq}}{V_{dc}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c)\cos(\omega t) - \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c)\sin(\omega t) \qquad (۱۸)$$

به ازای هشت حالت کلیدزنی وبا توجه به روابط فوق می‌توان جدول کلیدزنی بهینه (۳) را تنظیم کرد. بلوک دیاگرام استراتژی کنترل مستقیم توان مبتنی بر جدول سوئیچینگ در شکل(۸) نشان داده شده است.



شکل(۸): بلوک دیاگرام استراتژی کنترل مستقیم توان مبتنی بر جدول کلیدزنی در مبدل سمت شبکه[۲۵].

جدول(۳): جدول کلیدزنی بهینه مبدل سمت شبکه[۲۵].

d_p	d_q	سکتور ولتاژ											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-1	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5
	1	V_8	V_8	V_7	V_7	V_8	V_8	V_7	V_7	V_8	V_8	V_7	V_7
-1	-1	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6
	1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1

۴-بلوک دیاگرام سیستم کنترل با در نظر گرفتن منحنی توان بهینه توربین بادی

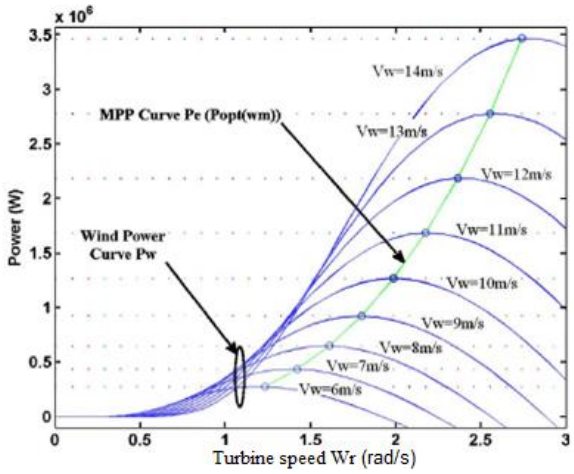
در عمل توان توربین بادی از منحنی توان بهینه پیروی می‌کند که در آن قدرت خروجی توربین P_m تابعی از شکل پره، زاویه پره، شعاع و سرعت چرخش روتور است[۲۶].

$$P_m = \frac{1}{2}\pi\rho C_P(\lambda,\beta)R^2V^3 \qquad (۱۹)$$

ρ چگالی هوا، β زاویه پره برحسب (درجه)، و $C_P(\lambda,\beta)$ ضریب قدرت توربین بادی می‌باشد، R شعاع پره (به متر) و V سرعت باد (m/s) است. مقدار λ، نسبت بیشینه سرعت، نیز طبق رابطه (۲۰) تعریف می‌شود[۴۱]:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V} \qquad (۲۰)$$

که ω_r سرعت زاویه‌ای روتور ژنراتور بادی برحسب (rad/s) است.



شکل(۹): تغییرات در قدرت ژنراتور بادی را متناسب با سرعت توربین بادی برمبنای منحنی بهینه توان- سرعت[۲۶].

از شکل(۹) می‌توان مشاهده کرد که به ازای زاویه پره مشخصی و سرعت‌های متفاوت باد، سرعت‌های روتور بهینه‌ای وجود دارند که به ازای آنها حداکثر توان‌های خروجی حاصل می‌شود و از اتصال این نقاط منحنی حداکثر توان ترسیم می‌شود و توان بهینه (یا ماکزیمم) از رابطه زیر محاسبه می‌شود[۲۶].

$$P_{mopt} = \frac{1}{2}\pi\rho C_{P\max}R^2\left(\frac{R}{\lambda_{opt}}\right)^3\omega_r^3 \qquad (۲۱)$$

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

سیستم کنترل، تغییرات سرعت باد و در نتیجه توان توربین، براساس منحنی بهینه بعنوان مرجع تغییرات توان به باید به سیستم کنترل در بلوک دیاگرام اعمال می‌گردد.

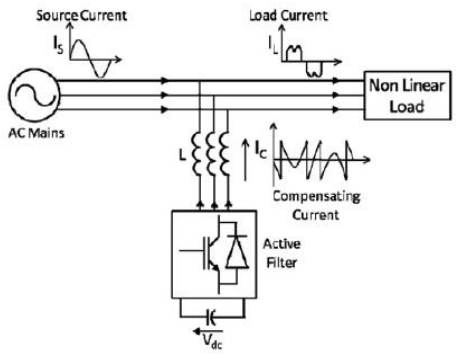
۵-بارهای غیرخطی و فیلتر اکتیو موازی:

کاربرد بارهای غیرخطی در شبکه‌های قدرت ناشی از تزریق جریان‌های هارمونیکی به شبکه، سبب بروز مشکلات بسیاری در کیفیت توان سیستم‌ها شده‌اند. بنابراین لازم است با نصب تجهیزات جبرانساز مناسب، هارمونیک‌های تولید شده را حذف کرد. یکی از این تجهیزات فیلتر اکتیو موازی است (شکل(۱۰))، که با جذب هارمونیک‌های جریان مانع از انتشار آنها در شبکه می‌شود[۱۹و۲۷].

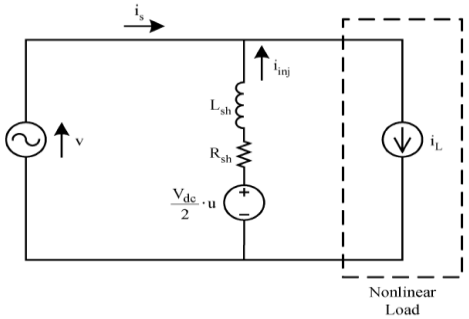
شکل(۱۱) مدار معادل یک فیلتر فعال موازی را نشان می‌دهد. جریان بار غیرخطی i_L را می‌توان بصورت زیر نمایش داد:

$$\begin{aligned} i_L &= I_{Lf}\sin(wt-\phi_{Lf}) + \sum_{h=3,5,\dots}^{\infty} I_{Lh}\sin(hwt-\phi_{Lh}) \\ &= I_{Lf}\sin wt\cos\phi_{Lf} - I_{Lf}\cos wt\sin\phi_{Lf} \\ &\quad + \sum_{h=3,5,\dots}^{\infty} I_{Lh}\sin(hwt-\phi_{Lh}) \end{aligned} \qquad (۲۲)$$

که I_{Lf} دامنه مؤلفه اصـــلی جریان بار، I_{Lh} دامنه هارمونیک hام جریان بار، φ_{Lf} و φ_{Lh} به‌ترتیب زاویه فاز مؤلفه اصـــلی و هارمونیک hام جریان بار می‌باشند.



شکل(۱۰): بکارگیری اکتیو فیلتر جهت حذف هارمونیک بار غیرخطی[۲۷].



شکل(۱۱): مدار معادل تکفاز یک فیلتر فعال موازی[۱۹].

منبع ولتاژ v نمایانگر ولتاژ تغذیه PCC، i_s جریان تحویلی منبع تغذیه به بار و i_{inj} جریان تزریقی فیلتر به مدار می‌باشد. نصب فیلتر اکتیو جهت حذف هارمونیک مستلزم صرف هزینه و به‌کارگیری سیستم کنترلی مستقل می‌باشد در این مقاله، سعی شده است با بکارگیری هر دو مبدل-های سمت روتور و سمت استاتور سیستم DFIG نیاز به فیلتر اکتیو جهت کاهش هارمونیک جریان شبکه را حذف نماید. روابط توان بار غیرخطی را می‌توان بصورت زیر ارائه داد:

$$\begin{aligned} P_L &= \frac{3}{2}V_1 L_1\cos\varphi_1 \\ &\quad + \frac{3}{2}\sum_{h=2}^{\infty} V_1 I_{Lh}\cos((h-1)\omega_s t+\varphi_h) \end{aligned} \qquad (۲۳)$$

$$\begin{aligned} Q_L &= \frac{3}{2}V_1 L_1\sin\varphi_1 \\ &\quad + \frac{3}{2}\sum_{h=2}^{\infty} V_1 I_{Lh}\sin((h-1)\omega_s t+\varphi_h) \end{aligned} \qquad (۲۴)$$

با توجه به روابط فوق می‌توان مشاهده کرد توان اکتیو و راکتیو بار غیرخطی شامل دوجمله می‌باشد که عبارت ثابت (P_{L1} و Q_{L1}) و عبارت دوم توان هارمونیکی (P_{Lh} و Q_{Lh}) می‌باشد:

$$\begin{aligned} P_L &= P_{L1} + P_{Lh} \\ Q_L &= Q_{L1} + Q_{Lh} \end{aligned} \qquad (۲۵)$$

با طراحی فیلتر پایین‌گذر می‌توان مولفه اصلی توان بار غیرخطی را از کل مولفه توان آن تفکیک نمود سپس با تفریق مولفه اصلی از مؤلفه کل به توان هارمونیکی بار غیرخطی دست یافت که در حقیقت با تفکیک مولفه فرکانس بالای هارمونیکی یک فیلتر بالاگذر طراحی شده است، در ادامه مؤلفه های هارمونیکی توان را با توان مرجع سیستم اضافه نموده و به عنوان داده‌های مرجع به سیستم کلیدزنی مبدل‌ها اعمال شده است. این راهکار قابل اعمال از طرف مبدل سمت شبکه و مبدل سمت روتور و در سرعت‌های ثابت و متغیر می‌باشد.

در بلوک دیاگرام شکل(۱۲) (که نوآوری مقاله محسوب می‌شود)، سیستم کنترل مبدل سمت روتور، سیستم کنترل مبدل سمت شبکه، محاسبات توان مرجع در سرعت متغیر برحسب منحنی توان- سرعت بهینه، و اعمال استراتژی حذف هارمونیک جریان شبکه به مدار سوئیچینگ مبدل سمت شبکه را نشان می‌دهد. همچنین می‌توان استراتژی حذف هارمونیک جریان شبکه به مدار سوئیچینگ مبدل سمت روتور اعمال شود.

۶-نتایج شبیه‌سازی عملکرد DFIG با روش DPC از مبدل سمت روتور:

شبیه‌سازی سیستم کنترل پیشنهادی برای ژنراتور با قدرت نامی۲ مگاوات و در محیط نرم‌افزاری Matlab/Simulink انجام شده است.

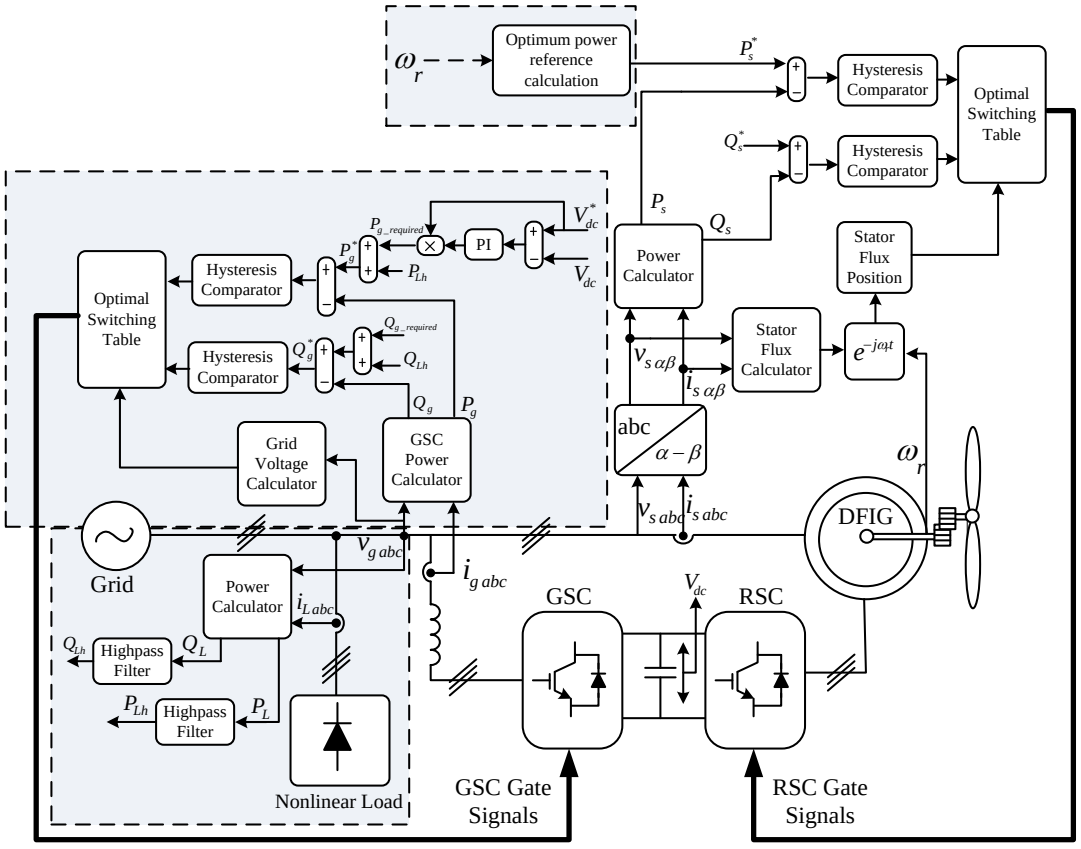
پارامترهای مورد نیاز شبیه‌سازی در جدول (پ) پیوست داده شده است. مبدل سمت روتور برای کنترل توان اکتیو و راکتیو استاتور DFIG مبتنی بر استراتژی پیشنهادی DPC مورد استفاده قرار گرفته است. درطول شبیه‌سازی، فرکانس نمونه‌برداری ۲۰کیلو هرتز و پهنای باند کنترل‌کننده‌های هیسترزیس توان اکتیو و راکتیو ٪ ۴± توان ژنراتور

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23224568.1398.8.3.4.9] Journal of New Research on Electrical Power - Vol. 8-No.3

تنظیم می‌شود. هدف اصلی مبدل سمت شبکه، تثبیت ولتاژ لینک DC است. ابتدا مبدل سمت شبکه فعال می‌شود به طوری که ولتاژ لینک DC مشترک تنظیم شود. استاتور DFIG سپس با چرخش روتور توسط توربین بادی در یک سرعت تنظیم شده، انرژی‌دار می‌شود. در این حالت مبدل سمت روتور غیرفعال می‌باشد مبدل سمت روتور در۰/۲ ثانیه فعال می‌شود و ژنراتور توان اکتیو ۲مگاوات تولید و توان راکتیو ۰/۶۶- مگاوار را دریافت می‌نماید. شبیه‌سازی برای سرعت ثابت ۱پریونیت انجام شده است و به منظور اعتبارسنجی روش مورد استفاده، نتایج شبیه‌سازی در سرعت ۱ پریونیت با نتایج مرجع[۷] در شکل(۱۳)، مقایسه شده‌اند. توان اکتیو و راکتیو بترتیب در ۰/۴ ثانیه از ۲- مگاوات به ۱- مگاوات و در ۰/۶ ثانیه از ۰/۶۶- به ۰/۶۶ مگاوار تغییر می‌کند. Ir و Is به‌ترتیب جریان روتور و استاتور برحسب کیلوآمپر می‌باشند موثربودن استراتژی کنترل پیشنهادی به وضوح در شکل (۱۳) نشان داده است. دینامیک پاسخ سریع و دقیق می‌باشد. با توجه به شکل (۱۳)، در ۰/۲ ثانیه مبدل سمت روتور وصل می‌شود و به همین علت و نیز تبادل توان ژنراتور با شبکه باعث افت لحظه‌ای کمی در ولتاژ لینک DC می‌شود. سیستم کنترل اقدام به جبران و تثبیت سطح ولتاژ می‌نماید طبق شکل (۱۳) در ۰/۴ ثانیه و ۰/۶ ثانیه نیز به‌ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تغییر می‌نمایند که پاسخ سیستم کنترل، سریع و دقیق می‌باشد و دربرگیرنده حداقل تغییرات ولتاژ می‌باشد.

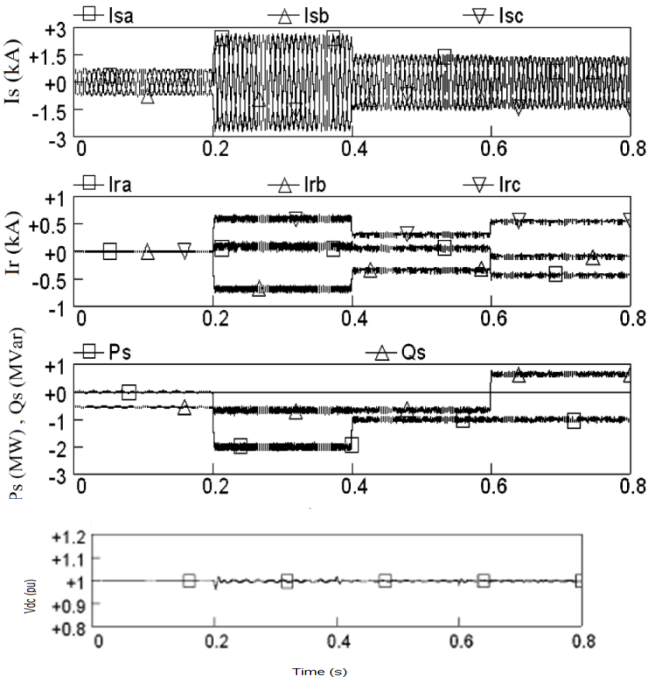
۷-نتایج شبیه‌سازی با روش DPC در مبدل‌های سمت روتور و شبکه بدون جبران‌سازی

با در نظر گرفتن روش کنترلی PDC در هر دو مبدل سمت روتور و نیز مبدل سمت شبکه در بلوک دیاگرام شکل (۱۲)، نتایج شبیه‌سازی جریان بار غیرخطی، جریان شبکه، توان و جریان استاتور در شکل‌های (۱۴) نشان داده شده است. جریان بار غیرخطی۶۶۰ آمپر می‌باشد و THD بار غیرخطی برابر ٪۲۳ و برای جریان شبکه ٪۲۰/۹۱ می‌باشد بار غیرخطی توان هارمونیکی مورد نیاز را از شبکه دریافت خواهد کرد بدلیل کنترل توان DFIG بصورت متعادل و عدم استفاده از مؤلفه جبرانساز هارمونیکی در سیستم کنترلی آن، در جهت حذف هارمونیک جریان شبکه بی‌تاثیر می‌باشد.

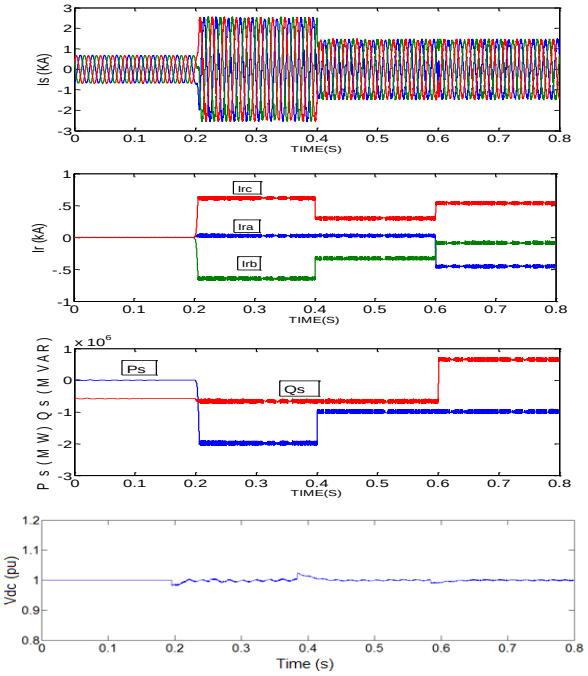


شکل(۱۲): حذف هارمونیک جریان شبکه در سرعت متغیر مبتنی بر منحنی بهینه ازطرف مبدل سمت شبکه

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

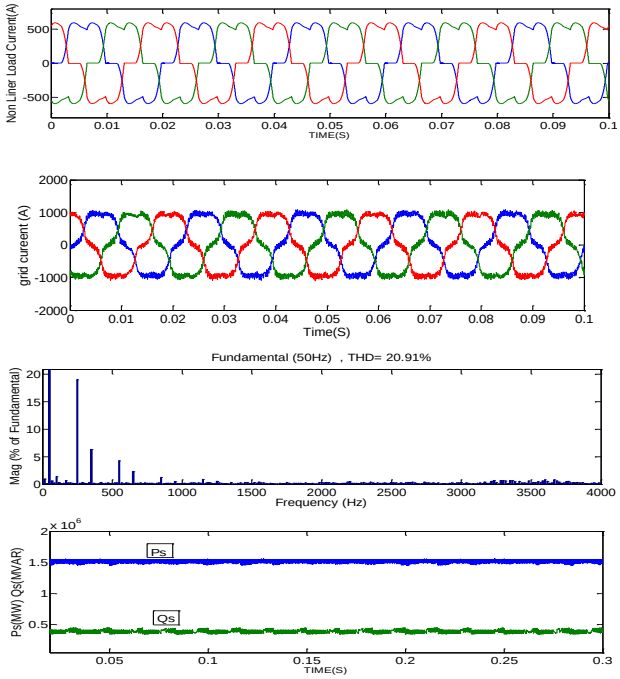


شکل(ب) نتایج مرجع[۷] .



شکل(الف) نتایج شبیه سازی

شکل(۱۳): کنترل توان DFIG در سرعت pu ۱



شکل(۱۴): نتایج در حضور بار غیرخطی و بدون جبران‌سازی

با درنظرگرفتن بلوک دیاگرام شکل(۱۲) پس از جداسازی مؤلفه توان هارمونیکی بارغیرخطی توسط فیلتر بالاگذر، و اعمال به مدار سوئیچینگ مبدل سمت شبکه اقدام به تامین توان هارمونیکی موردنیاز بار در زمان ۰/۱ثانیه از طریق مبدل سمت شبکه شده‌است. نتایج شبیه-سازی در شکل‌الف-(۱۵) نشان داده‌شده‌اند. باتوجه به این نتایج، THD جریان شبکه از ٪۲۰/۹۱ به ٪۵/۲۷ کاهش یافته و مؤلفه‌های هارمونیکی جریان شبکه به‌شدت کاهش یافته‌اند.

میزان درصد اندازه هارمونیک‌های ۵، ۷و ۱۱ نسبت به مولفه اصلی در جدول(۵) ارائه‌شده‌است. جریان‌های استاتور، روتور و توان ژنراتور فاقد اعوجاج هارمونیکی ناشی از بار غیرخطی می‌باشند.

ب)جبران‌سازی از طریق مبدل سمت روتور

با در نظرگرفتن بلوک دیاگرام شکل(۱۲) پس از جداسازی مؤلفه توان هارمونیکی بار غیرخطی توسط فیلتر بالاگذر و اعمال به مدار سوئیچینگ مبدل سمت روتور اقدام به تامین توان هارمونیکی مورد نیاز بار در زمان ۰/۱ثانیه از طریق استاتور ژنراتور شده‌است. نتایج شبیه‌سازی در شکل ب-(۱۵) نشان داده شده‌اند. با توجه به این نتایج، THD جریان شبکه از ٪۲۰/۹۱ به ٪۵/۲۶ کاهش یافته و مؤلفه‌های هارمونیکی جریان شبکه به‌شدت کاهش یافته‌اند. میزان درصد اندازه هارمونیک‌های ۵، ۷و ۱۱ نسبت به مولفه اصلی در جدول(۴) ارائه‌شده‌است. توان ژنراتور دچار نوسان محدودی می‌گردد و جریان استاتور دچار اعوجاج هارمونیکی به میزان ٪۷/۶۰ می‌گردد باتوجه به میزان اعوجاج هارمونیکی جریان شبکه، این اعوجاج قابل‌قبول می‌باشد. معمولاً در اعوجاج‌های پایین‌تر

۸-نتایج شبیه‌سازی با روش DPC در مبدل‌های سمت روتور و شبکه با حذف هارمونیک در سرعت ثابت

الف) جبران‌سازی از طریق مبدل سمت شبکه:

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019

جریان شبکه، اعوجاج جریان استاتور بسیار پایین‌تر می‌باشد. در جدول (۴) نتایج حذف هارمونیک در سرعت ثابت از طریق مبدل‌های سمت روتور و شبکه در مقایسه با حالت بدون جبران‌سازی با هم مقایسه‌شده‌اند. حالت اول نتایج شبیه‌سازی بدون استراتژی جبران‌سازی می‌باشد، درحالت دوم جبران‌سازی و حذف هارمونیک از طریق مبدل سمت روتور و حالت سوم جبران‌سازی از طریق مبدل سمت شبکه صورت‌گرفته شده‌است. نتایج حاصل از جدول(۴) نشان‌می‌دهد که به‌کارگیری روش کنترلی DPC در هر دو مبدل سمت روتور و نیز سمت شبکه با در نظرگرفتن جبران‌سازی، در محتوای هارمونیکی بهبودی حاصل می‌شود.

۹-نتایج شبیه‌سازی با روش DPC در مبدل‌های سمت روتور و شبکه با حذف هارمونیک باسرعت متغیر:

الف)جبران‌سازی از طریق مبدل سمت شبکه

با در نظر گرفتن بلوک دیاگرام شکل (۱۲) پس از جداسازی مؤلفه توان هارمونیکی بار غیرخطی توسط فیلتر بالاگذر، و اعمال به مدار سوئیچینگ مبدل سمت شبکه اقدام به تامین توان هارمونیکی مورد از طریق مبدل سمت شبکه شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل ب-(۱۶) نشان داده شده‌اند. با توجه به این نتایج، THD جریان شبکه از ٪۲۰/۹۱ به ٪۵/۸۷ کاهش می یابد و نیز مؤلفه‌های هارمونیکی جریان شبکه کاهش یافته‌اند مؤلفه‌های هارمونیکی جریان شبکه بشدت کاهش یافته‌اند میزان درصد اندازه هارمونیک‌های ۵، ۷ و ۱۱ نسبت به مولفه اصلی در جدول (۵) ارائه شده است.

جریان‌های استاتور و روتور و نیز توان ژنراتور فاقد اعوجاج هارمونیکی ناشی از بار غیرخطی می‌باشند. با افزایش توان تولیدی DFIG، توان مورد نیاز بار بیشتر از DFIG تامین می‌گردد لذا جریان شبکه کاهش می‌یابد درحین تغییر وضعیت از حالت زیرسنکرون به فوق‌سنکرون، توان اکتیو و جریان مبدل سمت شبکه با نزدیک شدن به سرعت سنکرون کاهش می‌یابند.

ب) جبران‌سازی از طریق مبدل سمت روتور

با در نظر گرفتن بلوک دیاگرام شکل (۱۲) پس از جداسازی مؤلفه توان هارمونیکی بار غیرخطی توسط فیلتر بالاگذر، و اعمال به مدار سوئیچینگ مبدل سمت روتور اقدام به تامین توان هارمونیکی مورد نیاز بار در زمان ۰/۱ ثانیه از طریق استاتور ژنراتور شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل الف-(۱۶) نشان داده شده‌اند.

با توجه به این نتایج، THD جریان شبکه از ٪۲۰/۹۱ به ٪۶/۱ کاهش یافته و مؤلفه‌های هارمونیکی جریان شبکه بشدت کاهش یافته‌اند میزان درصد اندازه هارمونیک‌های ۵، ۷و ۱۱ نسبت به مولفه اصلی در جدول(۵) ارائه شده است. توان ژنراتور دچار نوسان محدودی می‌گردد و جریان استاتور دچار اعوجاج هارمونیکی به میزان ٪۷/۶۰ می‌گردد با توجه به میزان اعوجاج هارمونیکی جریان شبکه، این اعوجاج قابل قبول می‌باشد. معمولاً در اعوجاج‌های پایین‌تر جریان شبکه، اعوجاج جریان استاتور بسیار پایین‌تر می‌باشد. لذا عملکرد سیستم کنترل به لحاظ حذف هارمونیک مطلوب می‌باشد.درجدول(۵)، نتایج حذف هارمونیک در سرعت متغیر از طریق مبدل‌های سمت روتور و شبکه در مقایسه با حالت بدون جبران‌سازی با هم مقایسه شده‌اند. حالت اول نتایج شبیه‌سازی بدون استراتژی جبران‌سازی می‌باشد، در حالت دوم جبران‌سازی و حذف هارمونیک از طریق مبدل سمت روتور و حالت سوم جبران‌سازی از طریق مبدل سمت شبکه صورت گرفته شده است. نتایج حاصل از جدول(۵) نشان می‌دهد که بکارگیری روش کنترلی DPC در هر دو مبدل سمت روتور و نیز سمت شبکه با در نظر گرفتن جبران‌سازی، در محتوای هارمونیکی بهبودی حاصل می‌شود.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، اعوجاج هارمونیکی جریان شبکه بطور قابل توجه‌ای کاهش یافته است. با جبران‌سازی از طریق مبدل سمت روتور، جریان استاتور در سرعت ثابت دچار اعوجاج در حد ٪۷/۶ مؤلفه اصلی جریان استاتور می‌شود که با توجه به اعوجاج ٪۲۱/۹۱ جریان شبکه قابل قبول می‌باشد و THD جریان شبکه به ٪۵/۲۶ کاهش یافته است و مولفه‌های هارمونیکی جریان شبکه با توجه به جدول(۴) در هر دو حالت حذف هارمونیک، از سمت شبکه و سمت روتور بشدت کاهش یافتند با جبران‌سازی از طریق مبدل سمت شبکه بدون اعمال هرگونه اعوجاج در جریان استاتور، THD جریان شبکه به ٪۵/۲۷ کاهش یافته که نسبت به جبران‌سازی از طریق مبدل روتور بعلت عدم ایجاد اعوجاج هارمونیکی در جریان استاتور مزیت دارد زیرا اعوجاج در جریان استاتور باعث ایجاد تلفات در ژنراتور می‌گردد و بار شبکه نیز توان همراه با نوسان را دریافت خواهد کرد. با توجه به این که مبدل سمت شبکه در مدار روتور ژنراتور دارد نسبت به جبران‌سازی از طریق ژنراتور، ظرفیت بار کمتری را قادر به جبران‌سازی می‌باشد ولی با در نظر گرفتن یک مزرعه بادی که شامل تعداد زیادی توربین بادی می‌باشد این عیب نیز برطرف می‌شود. حذف هارمونیک در سرعت متغیر نیز مطابق نتایج شبیه‌سازی و جدول(۵) نتایج مطلوبی دارد و هارمونیک جریان شبکه کاهش می‌یابد.

۱۰-نتیجه‌گیری

سیستم مجهز به DFIG با قابلیت کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو و عملکرد در سرعت‌های فوق‌سنکرون و زیرسنکرون، تلفات پایین، راندمان بالا و هزینه کمتر نسبت به سایر سیستم‌های گزینه مطلوبی جهت تولید انرژی الکتریکی بادی می‌باشد. در میان روش‌های کنترل توان DFIG روش کنترل مستقیم توان یکی از قدرتمندترین روش‌ها می‌باشد. طبق نتایج شبیه‌سازی، پاسخ روش DPC بکار رفته در جهت کنترل تغییرات توان دقیق و سریع بوده و حداقل وابستگی به پارامترهای ماشین را نسبت به سایر روش‌ها دارد در نتیجه با تغییرات پارامترهای ماشین دچار اختلال نمی‌شود و بعلت محاسبات کمتر نسبت به سایر روش‌ها، به تجهیزات کمتری جهت پیاده‌سازی نیاز دارد. بکارگیری همزمان سیستم کنترل DPC در مبدل سمت شبکه و نیز مبدل سمت روتور در سیستم

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

بادی مبتنی بر DFIG در حضور بارهای غیرخطی می‌تواند عملکرد مناسبی در مرجع سرعت ثابت و سرعت متغیر داشته باشد. در حضور بارهای غیرخطی و با تفکیک مؤلفه توان هارمونیکی بار غیرخطی توسط فیلتر بالاگذر و اعمال به سیستم کلیدزنی مبدل سمت روتور و و همچنین مبدل سمت شبکه، اعوجاج هارمونیکی جریان شبکه بطور قابل توجه‌ای کاهش یافت. در ادامه کار می‌توان به موارد زیر پرداخت: کنترل مستقیم توان در شبکه نامتعادل با بار غیرخطی همراه با حذف هارمونیک، کنترل مستقیم توان با به‌کارگیری روش کلیدزنی ثابت در حضور بار غیرخطی، و کنترل مستقیم توان با حذف همزمان هارمونیک جریان شبکه و ریپل توان ژنراتور.

منابع:

[1] Heng Nian, Yipeng Song, "Direct Power Control of Doubly Fed Induction Generator Under Distorted Grid Voltage", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 29, No. 2, 2014.

[2] R.D Henderson, p.j Rose , "Harmonics: The effects on power quality and transformer", IEEE Trans. on Industary Application, Vol. 30, No. 3, 1994.

[۳] حسینیان سید حسین. درودی عارف، "کیفیت توان"، انتشارات برق منطقه ای، ۱۳۸۳، تهران.

[4] Etienne Tremblay, Sergio Atayde, Ambrish Chandra, "Comparative Study of Control Strategies for the Doubly Fed Induction Generator in Wind Energy Conversion Systems: A DSP-Based Implementation Approach", IEEE Trans. on Sustainable Energy, Vol. 2, No. 3, 2011.

[5] Chia-Chi Chu, Chia-Chun Hung, Yuan-Zheng Lin, ZenJey Guey, "Universal field-oriented rotor-side controllers for doubly-fed induction generators", International Conference on Power Electronics and Drive Systems, (PEDS), 2009, pp. 342 – 347.

[6] Dawei Zhi, and Lie Xu, "Direct Power Control of DFIG With Constant Switching Frequency and Improved Transient Performance", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 22, No. 1, 2007.

[7] Lie Xu, and Phillip Cartwright, "Direct Active and Reactive Power Control of DFIG For Wind Energy Generation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 21, No. 3, 2006.

[8] Peter Vas, "Sensor Less Vector and Direct Torque Control", Oxrord University Press, 1998.

[9] U. Baader, M. Depenbrock, and G. Gierse, "Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine-A basis for speed control without speed measurement", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 28, No. 3, 1992, pp. 581–588.

[10] D. Casadei, G. Grandi, G. Serra, and A. Tani, "Effects of flux and torque hysteresis band amplitude in direct torque control of induction machines", in Proc. 20th Int. Conf. Ind. Electron., Control Instrum., 1994, pp. 299–304.

[11] T. G. Habetler, F. Profumo, M. Pastorelli, and L. M. Tolbert, "Direct torque control of Induction Machines Using Space Vector Modulation", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 28, No. 5, 1992, pp. 1045–1053.

[12] J. Kang and S. Sul, "New direct torque control of induction motor for minimum torque ripple and constant switching frequency", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 35, No. 5, 1999, pp. 1076–1082.

[13] Zhifengz, renyuant T., Baodony B. Dexinx, "Novel Direct Torque Control Base on Space Vector Modu lation With Adaptive Stator Flux Observer For Induction Motor", IEEE Trans. on Mag. , Vol. 46, 2010, pp. 3133-3136.

[14] [19] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, and I. Takahashi, , "Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 34, No. 3, 1998, pp. 473–479.

[15] Ferede Blaabjerg and zhe chen, "Power electronics for modern wind turbines", Morgan & Claypool, 2006.

[16] Jamal A. Baroudi, Venkata Dinavahi, Andrew M. Knight, "A review of power converter topologiesfor wind generators", Elsevier, Renewable Energy, Vol. 32, No. 14, 2007, pp. 2369-2385.

[17] M. V. Kazemi, A. S. Yazdankhah, H. M. Kojabadi, "Direct power control of DFIG based on discrete space vector modulation", Elsevier, Renewable Energy, Vol. 35, No. 5, 2010. pp. 1033-1042.

[18] Arjang Yousefi-Talouki, Edris Pouresmaeil, Bo Nŕregaard Jŕgensen, "Active and reactive power ripple minimization in direct power control of matrix converter-fed DFIG", Elsever, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 63, 2014. pp 600-608.

[19] L. H. Tey, P. L. So, and Y. C. Chu, "Improvement of Power Quality Using Adaptive Shunt Active Filter", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, 2005, pp 1558-1568.

[20] Yong Li, Tapan Kumar Saha, OlavKrause, Yijia Cao, and Christian Rehtanz, "An Inductively Active Filtering Method for Power-Quality Improvement of Distribution Networks With Nonlinear Loads", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 28, No. 4, 2013.

[21] Gaillard A, Poure P, Saadate S, Machmoum M., "Variable speed wind energy system for power generation and harmonic current mitigation", Renewable Energy, Vol. 34, 2009, pp 1545–1553.

[22] Soares dos Reis F, Ale J, Adegas F, Tonkoski R, Slan S, Tan K, "Active shunt filter for harmonic mitigation in wind turbines generators", In: Proc 37th IEEE power electronics specialists conference, 2006, pp. 1–6.

[23] Papathanassiou S, Papadopoulos MP, "Harmonic analysis in a power system with wind generation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, 2006, pp. 2006-2016.

[24] M. Kesraoui A. Chaib, A. Meziane, A. Boulezaz, "Using a DFIG based wind turbine for grid current harmonics filtering", Elsevier, Energy Conversion and Management, Vol.78, 2014, pp. 968-975.

[25] A. Baktash; A. Vahedi, M. A. S. Masoum, "New switching table for improved direct power control of three-phase PWM rectifier", Australian Journal of Electrical & Electronics Engineering, Vol 5, No. 2, 2009, pp. 161-167.

[41] Yu Zou, Malik E. Elbuluk, and Yilmaz Sozer, "Stability Analysis of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Method in Wind Power Systems", IEEE Trans. on Industrry Application, Vol. 49, No. 3, 2013.

[26] Z. Liu, O.A. Mohammed, and S. Liu, "A Novel Direct Torque Control of Doubly-Fed Induction Generator Used for Variable Speed Wind Power Generation", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007, pp. 1-6.

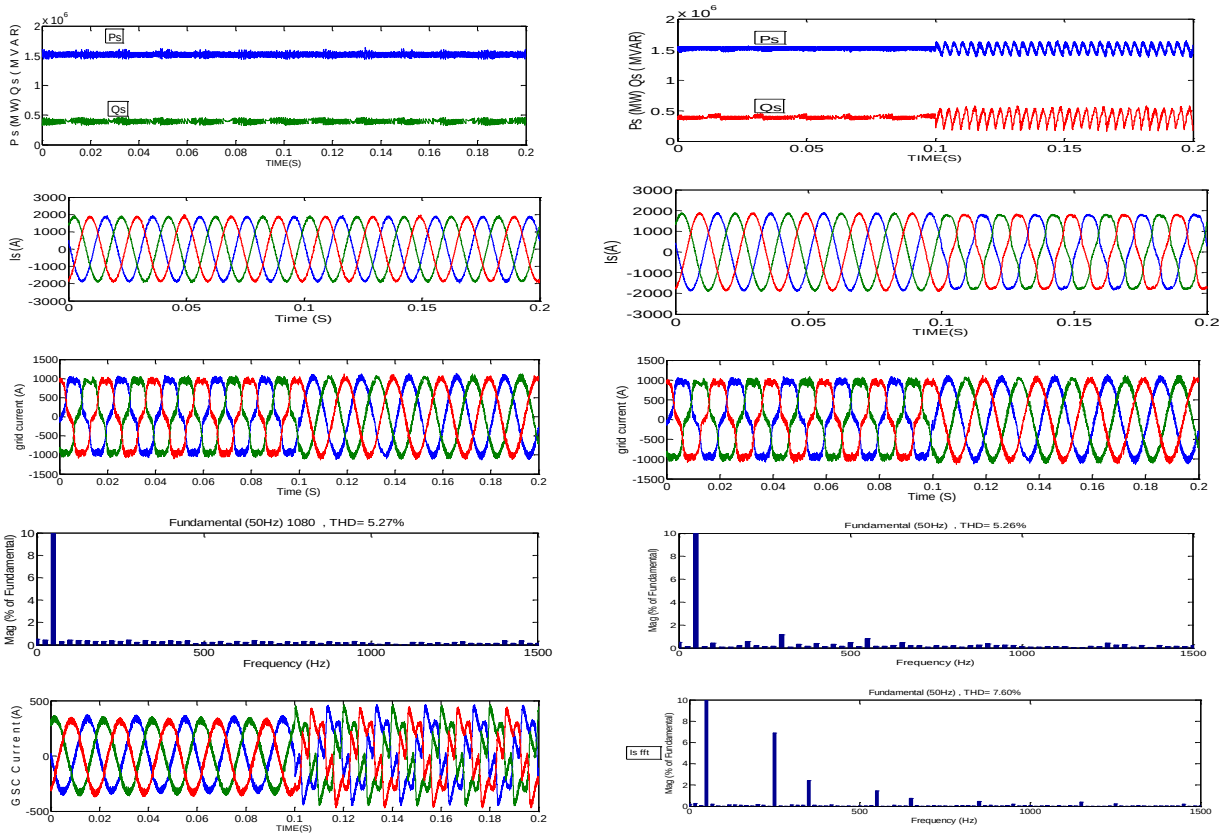
[27] Siddharthsingh K. Chauhan, Mihir C. Shah, Ram Ratan Tiwari, P. N. Tekwani, "Analysis design and digital implementation of a shunt active power filter with different schemes of reference current generation", Published in IET Power Electronics Nirma University, Gujarat, India, 2013.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 3- Autumn 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

پیوست:

جدول(پ): مشخصات DFIG شبیه‌سازی شده

توان نامی	۲MW	ژنراتور
ولتاژ استاتور	۶۹۰V	
نسبت تبدیل استاتور به روتور	۰/۳	
R_s	۰/۰۱۰۸pu	
R_r	۰/۰۱۲۱pu	
L_m	۳/۳۶۲pu	
L_{ls}	۰/۱۰۲pu	
L_{lr}	۰/۱۱pu	
H	۰/۵s	
تعداد جفت قطب	۲	
ولتاژ لینک DC	۱۲۰۰V	مبدل
خازن لینک DC	۱۶ mF	
اندوکتانس مبدل سمت شبکه	۰/۴ mH	
فرکانس قطع	۵Hz	فیلتر پایین‌گذر
ضریب کیفیت	۰/۷۰۷	



ب) از طریق مبدل سمت روتور الف) از طریق مبدل سمت شبکه

شکل(۱۵): نتایج شبیه‌سازی با حذف هارمونیک در سرعت ثابت

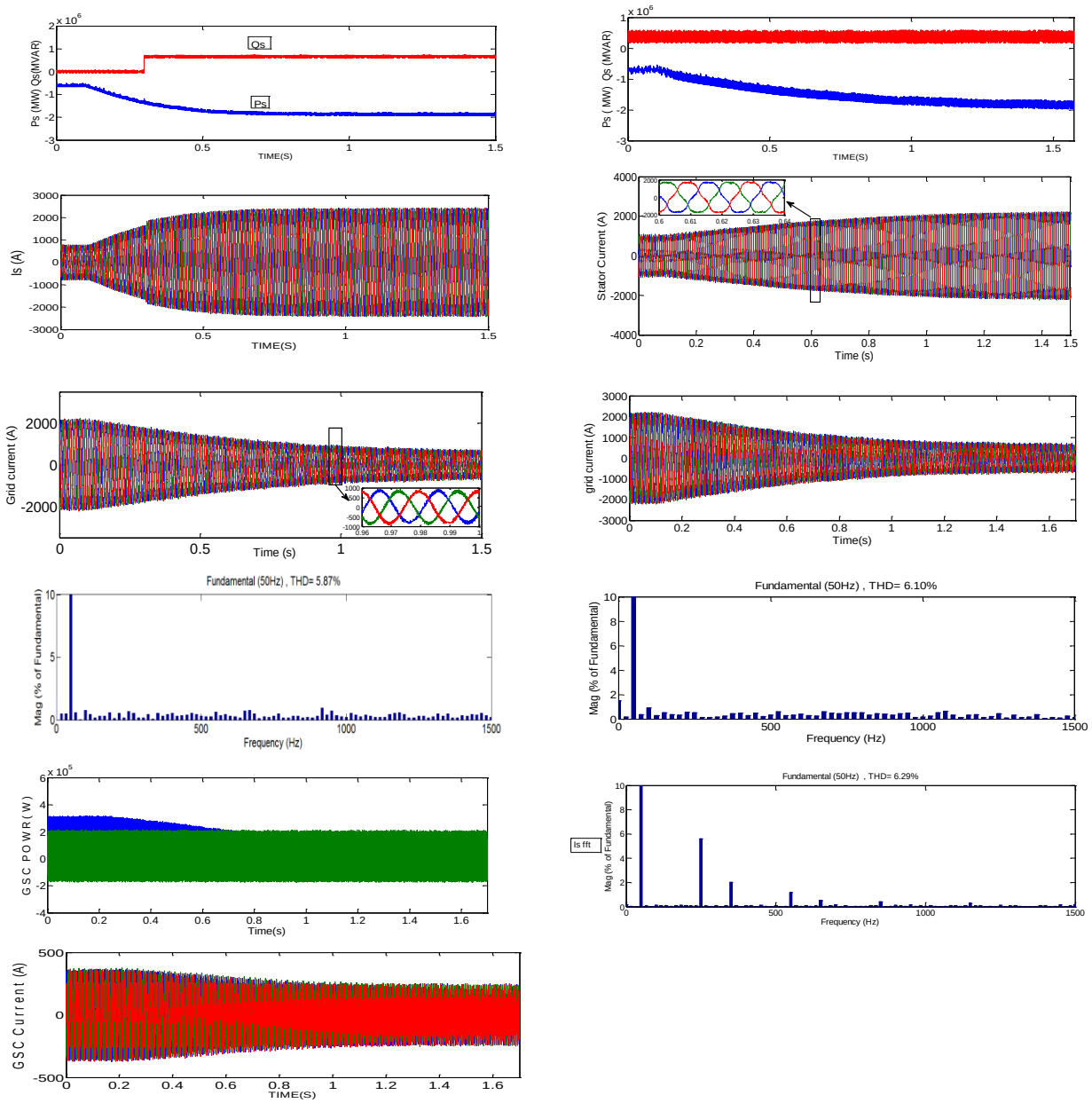
جدول(۴): مقایسه محتوای هارمونیکی حالت‌های مختلف به‌ازای بار غیرخطی و سرعت ثابت توربین بادی

حالتهای مختلف	مبدل سمت شبکه		مبدل سمت روتور		THD (%)	درصد هارمونیک پنجم نسبت به مؤلفه اصلی	درصد هارمونیک هفتم نسبت به مؤلفه اصلی	درصد هارمونیک یازدهم نسبت به مؤلفه اصلی
	DPC بدون جبرانسازی	DPC با جبرانسازی	DPC بدون جبرانسازی	DPC با جبرانسازی				
۱	✓		✓		۲۰/۹۱	۱۸/۹۸	۶/۳۴	۴/۲۷
۲	✓			✓	۵/۲۶	۰/۱۱	۰/۳۳	۰/۸۲
۳		✓	✓		۵/۲۷	۰/۳۲	۰/۲۶	۰/۳

[Downloaded from ijeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]
Journal of Advanced Research in Electrical Power - Vol. 8 - No. 3 - Autumn 2019

جدول(۵): مقایسه محتوای هارمونیکی حالت‌های مختلف به‌ازای بار غیرخطی و سرعت متغیر توربین بادی

حالتهای مختلف	مبدل سمت شبکه		مبدل سمت روتور		THD (%)	درصد هارمونیک پنجم نسبت به مؤلفه اصلی	درصد هارمونیک هفتم نسبت به مؤلفه اصلی	درصد هارمونیک یازدهم نسبت به مؤلفه اصلی
	DPC بدون جبرانسازی	DPC با جبرانسازی	DPC بدون جبرانسازی	DPC با جبرانسازی				
۱	✓		✓		۲۰/۹۱	۱۸/۹۸	۶/۳۴	۴/۲۷
۲	✓			✓	۶/۱۰	۰/۶۲	۰/۹۵	۰/۷۹
۳		✓	✓		۵/۸۷	۰/۶۸	۰/۵۴	۰/۶۲



الف- از طریق مبدل سمت روتور ب- از طریق مبدل سمت شبکه

شکل(۱۶): نتایج شبیه‌سازی با حذف هارمونیک با سرعت متغیر

[Downloaded from ijeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]
Journal of Advanced Research in Electrical Power - Vol. 8 No. 3 Autumn 2019

زیرنویس‌ها:

1 Vector Control (VC)
2 Direct Torque Control (DTC)
3 High selective filter(HSF)
4 High pass filter(HPF)
5 Low pass filter (LPF)

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]

Direct power control simultaneously in the rotor side converter and grid side converter of DFIG for wind turbines with elimination of network current harmonics

S. N. Hosseini Mousavi, Hassan Barati*
Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Abstract: In this paper, direct power control (DPC) was used for active and reactive power control of DFIG in constant speed reference and variable turbine speed reference based on the optimal power curve. On the other hand, wide application of nonlinear loads in power networks has caused problems such as high current harmonics. Non-linear loads act like harmonic current sources and inject harmonic currents into the supply network. The presence of harmonics in the network causes the harmonic voltage drop and causes other consumers to receive distorted supply voltage, which may cause overheating of power factor correction capacitors, motors, transformers and cables, and mal-operation of some protection devices. Since DFIG is responsible for injection of active and reactive power to the network, it is possible to compensate for the fluctuation of power due to nonlinear loads in the network by proper power injection. Therefore, in this paper, direct power control is implemented to control the power of DFIG, and also to reduce the network current harmonics in the presence of nonlinear loads by using the proper control methods through the rotor side converter and grid side convertors. In this regard, the Matlab/Simulink software is used to simulate a system including a DFIG-based wind power unit and the results are analyzed and compared in different scenarios. The results indicate that accurate and fast control of the DFIG power is along with a significant reduction of network current harmonics.

Keywords: wind turbine, DFIG, Direct Power Control, optimum Power Curve, network current harmonics.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.3.4.9]