

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 پذیرش: ۹۸/۹/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۷/۱۰

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 هارمونیک بالا شده است. بارهای غیرخطی مانند یک منبع جریان هارمونیک عمل کرده و جریان‌های هارمونیک را به شبکه تزریق می‌کنند. وجود هارمونیک‌ها در شبکه باعث افت ولتاژ هارمونیک شده و سبب می‌شود تا سایر مصرف‌کنندگان ولتاژی با اغتشاش دریافت کنند که خود سبب افزایش دمای خازن‌های تصحیح ضریب توان، موتورهای 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 القایی دو سو تغذیه، کنترل مستقیم توان، منحنی توان بهینه، هارمونیک جریانی شبکه

۱-مقدمه

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 سیستم‌های 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 و گشتاور ماشین القایی مطرح شده است رایج‌ترین روش‌ها عبارتند

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

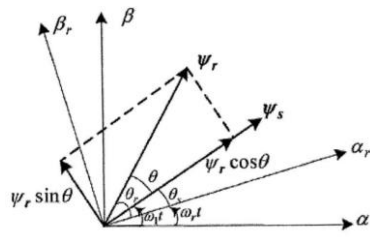
استفاده از موقعیت تخمینی شار استاتور و خطاهای توان‌های اکتیو و راکتیو انتخاب شده بودند. بنابراین، کنترل سیستم بسیار ساده است و تاثیر پارامترهای ماشین بر روی عملکرد سیستم قابل صرف نظر می‌باشد. با این حال، همانند DTC مرسوم، DPC نیز دارای فرکانس سوئیچینگ می‌باشد که به طور قابل توجهی با تغییرات توان اکتیو و راکتیو، سرعت کاری ماشین (لغزش روتور) و پهنای باند هیستریزس 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 بر حسب ضرورت بارهای غیرخطی نیز وجود دارند حضور بارهای غیرخطی باعث اعوجاج هارمونیک جریان شبکه می‌گردد 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 هیستریزس 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 و همکاران با استفاده از تئوری توان لحظه‌ای $p-q$ جهت استخراج جریان هارمونیک بار استفاده کرده‌اند اما این روش اجازه تشخیص هارمونیک خاصی را نمی‌دهد [۲۲]، پاپاتاناسیو و پادوپولوس 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.

از: روش‌های کنترل اسکالر (که بیشتر در کنترل ماشین القایی در وضعیت موتوری بکار می‌روند)، روش کنترل برداری (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 می‌نمایند همچنین سیستم الگوریتم پیچیده‌ای دارد که پیاده‌سازی آن را مشکل می‌سازد [۶ و ۵]. 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 مستقیماً 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 [۹ و ۸]. مشکل دیگر DTC تغییرات فرکانس سوئیچینگ مبدل می‌باشد که به طور قابل توجهی طراحی مدار قدرت را دشوار می‌سازد. پهنای باند کنترل‌کننده هیستریزس 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 [۱۱ و ۱۲] 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 توپین بادی مجهز به DFIG در مراجع [۱۴ و ۱۵] 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 [۱۵ و ۱۶] 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. در مراجع [۱۷ و ۱۸]، 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



شکل (۳): بردارهای شار استاتور و روتور در قاب های مرجع ثابت و روتور [۷].
با توجه به شکل های (۲) و (۳) و با صرف نظر کردن از تلفات مسی استاتور، توان اکتیو و راکتیو استاتور بصورت زیر بیان می شود [۷]:

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

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

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 نمونه برداری تغییر نکند، توان های اکتیو و راکتیو استاتور بصورت زیر بیان می شوند:

$$P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_1 |\psi_s^r| |\psi_r^r| \sin \theta \quad (4)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{w_1}{\sigma L_s} \psi_s^r \left(\frac{L_m}{L_r} |\psi_r^r| \cos \theta - |\psi_s^r| \right) \quad (5)$$

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

$$\frac{dP_s}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_1 |\psi_s^r| \frac{d(|\psi_r^r| \sin \theta)}{dt} \quad (6)$$

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

با توجه به رابطه (۶)، می توان مشاهده کرد که تغییرات سریع توان اکتیو و راکتیو را بترتیب می توان 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 می باشد این بدین معنی است که، اگر تغییر شار روتور در جهت شار استاتور $|\psi_r^r| \cos \theta$ باشد، توان راکتیو Q_s تغییر می کند. در مقابل، اگر تغییر شار روتور در 90° درجه ای جهت شار استاتور $|\psi_r^r| \sin \theta$ باشد، توان اکتیو P_s تغییر می کند. موقعیت اولیه شار روتور و دامنه آن، به طور مستقیم بر تغییرات توان اکتیو و راکتیو تاثیر نمی گذارد.

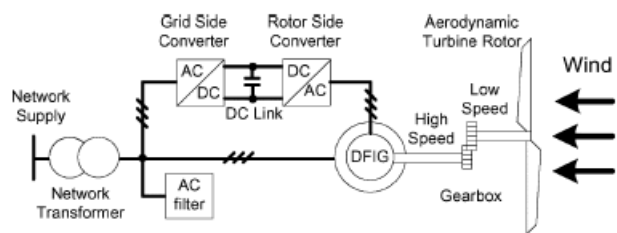
۲-۲- کنترل شار روتور با استفاده از بردارهای ولتاژ مبدل سمت روتور:

برای یک مبدل دوسطحی نشان داده شده در شکل (۴)، هریک از خروجی های ساق های سه فاز U_a, U_b, U_c و V_c می توانند دو سطح V_d و

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 شبیه سازی عملکرد DFIG با روش DPC از مبدل سمت روتور، نتایج شبیه سازی با روش DPC در مبدل های سمت روتور و شبکه بدون جبران سازی، نتایج شبیه سازی با روش DPC در مبدل های سمت روتور و شبکه با حذف هارمونیک در سرعت ثابت، نتایج شبیه سازی با روش DPC در مبدل های سمت روتور و شبکه با حذف هارمونیک با سرعت متغیر، و نتیجه گیری.

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 می شود و جهت کنترل سطح ولتاژ لینک DC از مبدل سمت شبکه (GSC) استفاده می شود.



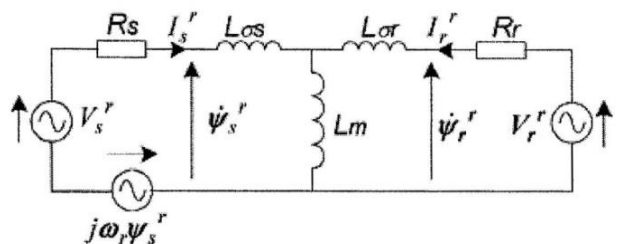
شکل (۱): ساختار کلی DFIG [۶]

۱-۲- 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 قاب های مرجع ثابت و روتور در شکل (۳) نشان داده شده است. در قاب مرجع روتور، بردارهای شار روتور و استاتور می تواند به صورت زیر بیان شود [۷]:

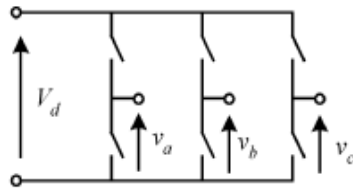
$$\psi_s^r = L_s I_s^r + L_m I_r^r \quad (1)$$

$$\psi_r^r = L_r I_r^r + L_m I_s^r$$

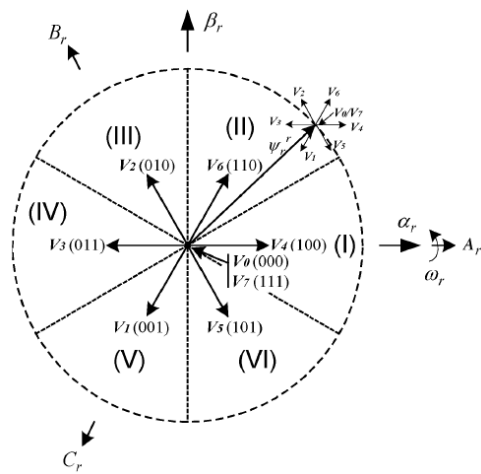


شکل (۲): مدار معادل یک DFIG در قاب مرجع روتور [۷].

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 60° 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 ($\uparrow$ = افزایش، $\downarrow$ = کاهش) [۷].

ψ_s^r موقعیت		I	II	III	IV	V	VI
V_1 (001)	Ps	$\uparrow$	$\downarrow/\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow/\downarrow$	$\uparrow$
	Qs	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
V_2 (010)	Ps	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow/\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow/\uparrow$
	Qs	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
V_3 (011)	Ps	$\downarrow/\uparrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow/\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
	Qs	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
V_4 (100)	Ps	$\uparrow/\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow/\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
	Qs	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$
V_5 (101)	Ps	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow/\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow/\downarrow$
	Qs	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
V_6 (110)	Ps	$\downarrow$	$\uparrow/\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow/\uparrow$	$\downarrow$
	Qs	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
ψ_s^r موقعیت		I—VI					
V_0/V_7 (000)/(111)	$\omega_1 > \omega_r$	Ps	$\uparrow$				
		Qs	$\uparrow$				
	$\omega_1 < \omega_r$	Ps	$\downarrow$				
		Qs	$\downarrow$				

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 پراتنرها 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 (V_7, V_0) و شش بردار فعال (اکتیو) می‌باشند ($V_1 - V_6$). مشابه با شار استاتور، شار روتور یک DFIG در قاب مرجع روتور را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

$$\frac{d\psi_r^r}{dt} = V_r^r - R_r I_r^r \quad (7)$$

با صرف نظر 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 $\alpha_r - \beta_r$ شش منطقه (I-VI) تقسیم می‌شود که در شکل (۵) نشان داده شده است.

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

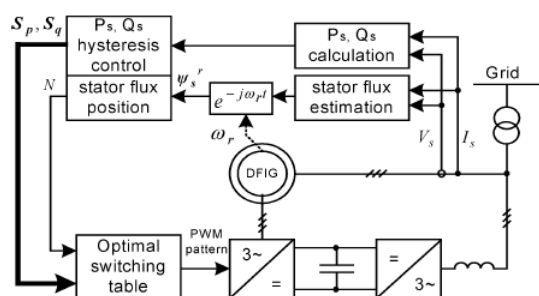
براساس رابطه (۷)، بردارهای ولتاژ صفر، مانع تغییرات شار روتور می‌شود، با صرف نظر از افت ولتاژ در مقاومت روتور، داریم:

$$d|\psi_r^r|/dt = 0, \quad d\theta_r/dt = 0. \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{dP_s}{dt} &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_1 |\psi_s^r| |\psi_r^r| \cos(\theta_r - \theta_s) (\omega_1 - \omega_r) \\ \frac{dQ_s}{dt} &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_1 |\psi_s^r| |\psi_r^r| \sin(\theta_r - \theta_s) (\omega_1 - \omega_r). \end{aligned} \quad (9)$$

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 تاثیر عکس آن دارد. اگر موقعیت شار استاتور معلوم باشد، تغییرات $|\psi_r^r| \sin \theta$ و $|\psi_r^r| \cos \theta$ را می‌توان به ازای هر بردار ولتاژ اعمال شده به روتور مشخص نمود. بنابراین، با



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 می گیرد در این روش از جریان های خط نمونه برداری شده و ولتاژ های خط محاسبه می شوند و زاویه بردار فضایی ولتاژ تعیین می گردد. با استفاده از ولتاژ و جریان اندازه گیری شده، توان اکتیو و راکتیو ورودی نیز محاسبه می گردد.

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

$$\phi = \tan^{-1}(V_q / V_d) \quad (10)$$

فضای برداری در این روش به دوازده بخش تقسیم می گردد. با استفاده از مقدار زاویه بردار فضایی و خروجی کنترل کننده های هیستریزس، بردار مناسب از جدول کلیدزنی که قبلاً حالت های مناسب استخراج شده و به کلیدها اعمال می گردد. حالت جدید کلیدها به گونه ای انتخاب شده تا برای هر بخش کمیت های 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 می باشد. روابط (۱۲) و (۱۳) انتقال یافته رابطه (۱۱) به قاب مرجع سنکرون می باشد بار همان مبدل سمت روتور می باشد.

$$V_{abc} = RI_{abc} + L \frac{dI_{abc}}{dt} + V_{cabc} \quad (11)$$

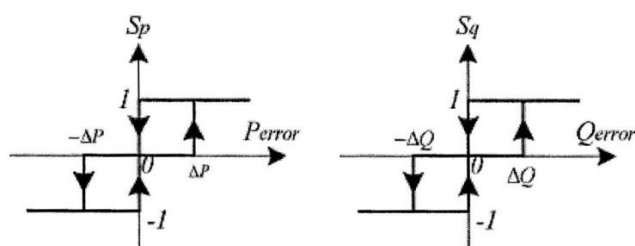
$$V_q = RI_q + L \frac{dI_q}{dt} + \omega_1 LI_q + V_{cq} \quad (12)$$

$$V_d = RI_d + L \frac{dI_d}{dt} - \omega_1 LI_d + V_{cd} \quad (13)$$

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

۴-۲- راهبرد کنترل مستقیم توان اکتیو و راکتیو

در روش کنترل مستقیم توان ابتدا ولتاژها و جریان های AC سه فاز استاتور اندازه گیری شده اند و جهت محاسبه توان اکتیو و راکتیو و تخمین شار استاتور به قاب مرجع ساکن منتقل می شوند موقعیت روتور نیز اندازه گیری شده و برای تبدیل شار استاتور از قاب مرجع $(\alpha - \beta)$ به قاب روتور $(\alpha_r - \beta_r)$ استفاده می شود. توان اکتیو و راکتیو محاسبه شده، با مقادیر مرجع خود از طریق دو مقایسه گر هیستریزس مقایسه می شوند و S_p و S_q ایجاد می شوند (شکل (۶)) و همراه با موقعیت شار استاتور محاسبه شده، به منظور انتخاب بردار ولتاژ مناسب از جدول کلیدزنی بهینه استفاده می شود. در نهایت نیز بردار ولتاژ انتخاب شده توسط مبدل سمت روتور به مدار روتور اعمال می گردد. بردار ولتاژ صفر دارای تاثیر متفاوت بر روی توان اکتیو و راکتیو برای سرعت های مختلف روتور دارد. با توجه به وجود مقاومت روتور، تاثیر بردار ولتاژ صفر پیچیده تر می شود، به ویژه هنگامی که سرعت روتور به سرعت سنکرون نزدیک می شود. بنابراین، بردار ولتاژ صفر هنگامی استفاده خواهد شد که تفاضل مقدار لحظه ای توان اکتیو و راکتیو اندازه گیری شده با مقدار مرجع صفر باشد.



شکل (۶): کنترل کننده هیستریزس توان اکتیو و راکتیو [۷].

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

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

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
	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

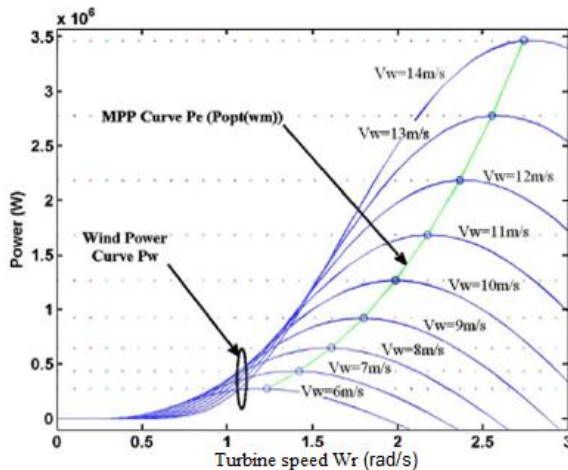
در عمل توان توربین بادی از منحنی توان بهینه پیروی می کند که در آن قدرت خروجی توربین P_m تابعی از شکل پره، زاویه پره، شعاع و سرعت چرخش روتور است [۲۶].

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

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

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

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



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

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

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

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

از طرفی داریم:

$$V_{cd} = \left[\begin{array}{l} \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) \cos(\omega t) \\ + \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \sin(\omega t) \end{array} \right] V_{dc} \quad (۱۵)$$

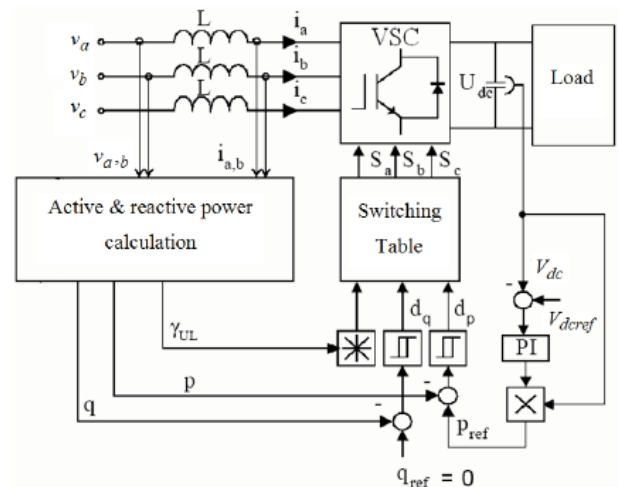
$$V_{cq} = \left[\begin{array}{l} \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \cos(\omega t) \\ - \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) \sin(\omega t) \end{array} \right] V_{dc} \quad (۱۶)$$

در روابط فوق (S_a و S_b و S_c) ساق های مبدل دوسطحی می باشند از طرفی مقدار نرمالیزه $\frac{V_d}{V_{dc}} = 0.6$ را در نظر می گیریم و با جایگزینی روابط (۱۵) و (۱۶) در روابط (۱۴) داریم:

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

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

به ازای هشت حالت کلیدزنی وبا توجه به روابط فوق می توان 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].

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:

$$P_L = \frac{3}{2} V_1 L_1 \cos \varphi_1 + \frac{3}{2} \sum_{h=2}^{\infty} V_1 I_{Lh} \cos((h-1)\omega_s t + \varphi_h) \quad (23)$$

$$Q_L = \frac{3}{2} V_1 L_1 \sin \varphi_1 + \frac{3}{2} \sum_{h=2}^{\infty} V_1 I_{Lh} \sin((h-1)\omega_s t + \varphi_h) \quad (24)$$

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 هارمونیک $(P_{Lh}$ و Q_{Lh}) می‌باشد:

$$P_L = P_{L1} + P_{Lh} \quad (25)$$

$$Q_L = Q_{L1} + Q_{Lh}$$

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 هارمونیک بار غیرخطی دست یافت که در حقیقت با تفکیک مولفه فرکانس بالای هارمونیک یک فیلتر بالاگذر طراحی شده است، در ادامه مؤلفه های هارمونیک 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 نامی ۲ 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 ۲۰ کیلو هرتز و پهنای باند کنترل‌کننده‌های هیستریزس توان اکتیو و راکتیو $\pm 4\%$ توان ژنراتور

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:

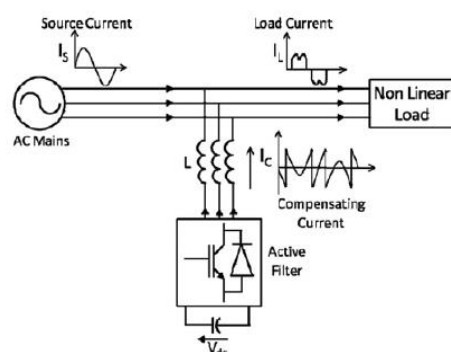
کاربرد بارهای غیرخطی در شبکه‌های قدرت ناشی از تزریق جریان‌های هارمونیک به شبکه، سبب بروز مشکلات بسیاری در کیفیت توان سیستم‌ها شده‌اند. بنابراین لازم است با نصب تجهیزات جبران‌ساز مناسب، هارمونیک‌های تولید شده را حذف کرد. یکی از این تجهیزات فیلتر اکتیو موازی است (شکل (۱۰))، که با جذب هارمونیک‌های جریان مانع از انتشار آنها در شبکه می‌شود [۱۹ و ۲۷].

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

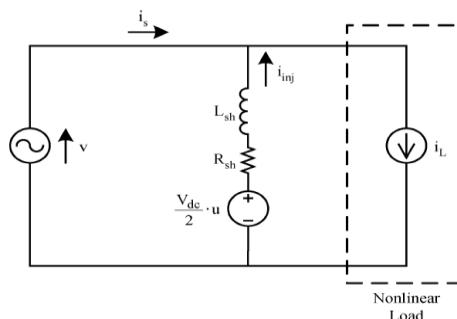
$$i_L = I_{Lf} \sin(\omega t - \phi_{Lf}) + \sum_{h=3,5,\dots}^{\infty} I_{Lh} \sin(h\omega t - \phi_{Lh})$$

$$= I_{Lf} \sin \omega t \cos \phi_{Lf} - I_{Lf} \cos \omega t \sin \phi_{Lf} + \sum_{h=3,5,\dots}^{\infty} I_{Lh} \sin(h\omega t - \phi_{Lh}) \quad (22)$$

که I_{Lf} دامنه مؤلفه اصلی جریان بار، I_{Lh} دامنه هارمونیک h ام جریان بار، ϕ_{Lf} و ϕ_{Lh} به ترتیب زاویه فاز مؤلفه اصلی و هارمونیک h ام جریان بار می‌باشند.



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



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

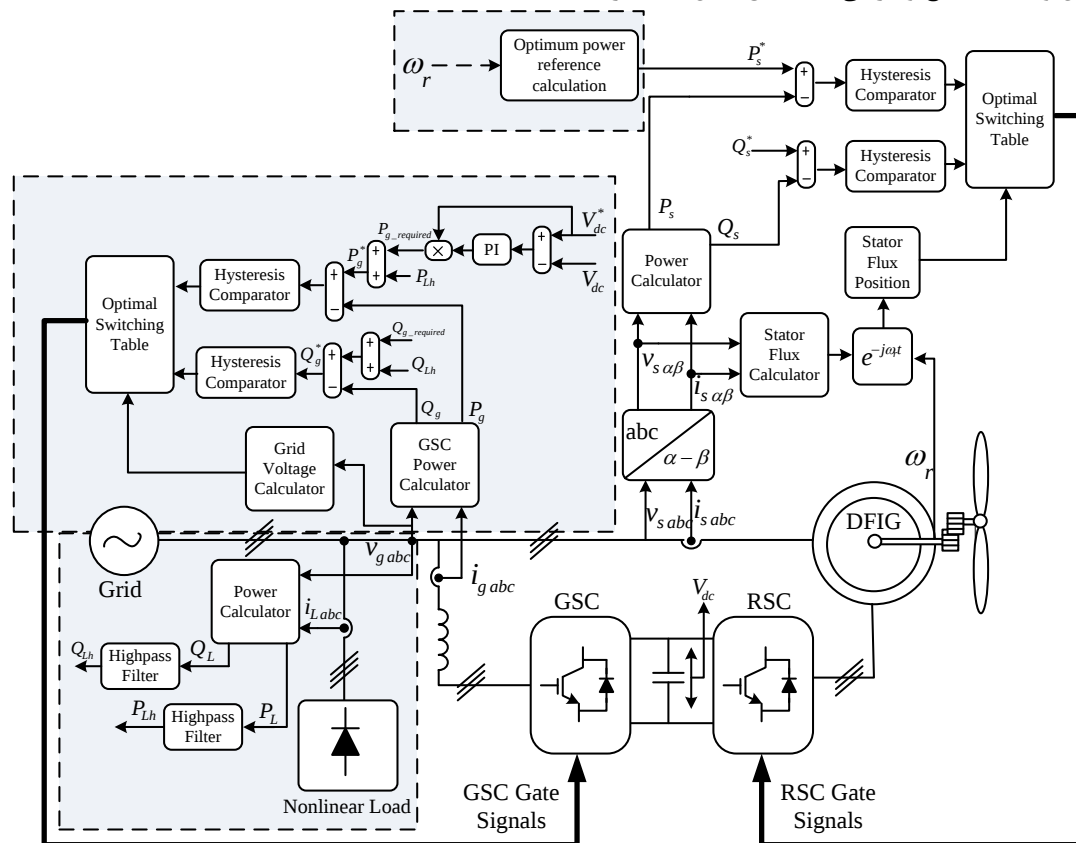
منبع ولتاژ V نمایانگر ولتاژ تغذیه PCC، i_s جریان تحویلی منبع تغذیه به بار و i_{inj} جریان تزریقی فیلتر به مدار می‌باشد. نصب فیلتر اکتیو جهت حذف هارمونیک مستلزم صرف هزینه و به‌کارگیری سیستم کنترلی

ثانیه و ۰/۶ ثانیه نیز به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو تغییر می‌نمایند که پاسخ سیستم کنترل، سریع و دقیق می‌باشد و دربرگیرنده حداقل تغییرات ولتاژ می‌باشد.

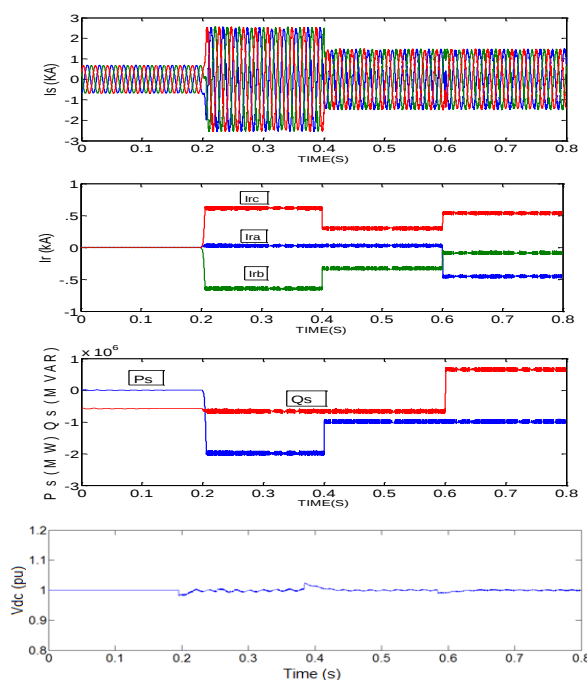
۷- نتایج شبیه‌سازی با روش DPC در مبدل‌های سمت روتور و شبکه بدون جبران‌سازی

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 غیرخطی ۶۶۰ آمپر می‌باشد و THD بار غیرخطی برابر ۲۳٪ و برای جریان شبکه ۲۰/۹۱٪ می‌باشد بار غیرخطی توان هارمونیک مورد نیاز را از شبکه دریافت خواهد کرد بدلیل کنترل توان DFIG بصورت متعادل و عدم استفاده از مؤلفه جبران‌ساز هارمونیک در سیستم کنترلی آن، در جهت حذف هارمونیک جریان شبکه بی‌تاثیر می‌باشد.

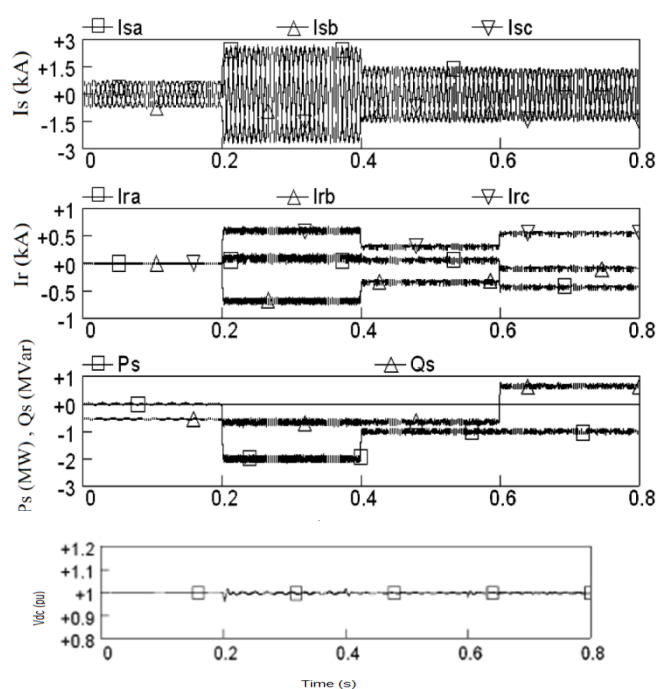
تنظیم می‌شود. هدف اصلی مبدل سمت شبکه، تثبیت ولتاژ لینک DC است. ابتدا مبدل سمت شبکه فعال می‌شود به طوری که ولتاژ لینک DC مشترک تنظیم شود. استاتور DFIG سپس با چرخش روتور توسط توربین بادی در یک سرعت تنظیم شده، انرژی دار می‌شود. در این حالت مبدل سمت روتور غیرفعال می‌باشد مبدل سمت روتور در ۰/۲ ثانیه فعال می‌شود و ژنراتور توان اکتیو ۲ مگاوات تولید و توان راکتیو ۰/۶۶- مگاوار را دریافت می‌نماید. شبیه‌سازی برای سرعت ثابت ۱ پریونیت 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 به ترتیب در ۰/۴ ثانیه از ۲- مگاوات به ۱- مگاوات و در ۰/۶ ثانیه از ۰/۶۶- به ۰/۶۶ مگاوات تغییر می‌کند. I_s و I_r به ترتیب جریان روتور و استاتور برحسب کیلوآمپر می‌باشند مؤثر بودن استراتژی کنترل پیشنهادی به وضوح در شکل (۱۳) نشان داده شده 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



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



شکل (الف) نتایج شبیه سازی



شکل (ب) نتایج مرجع [۷].

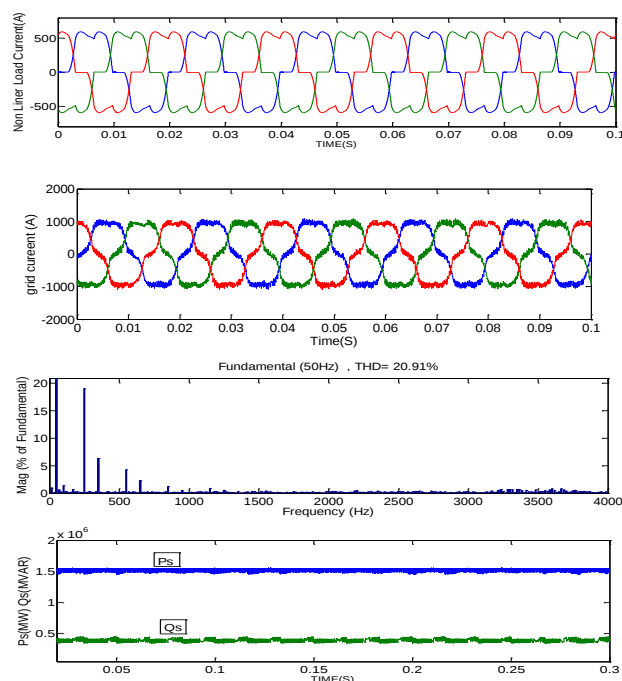
شکل (۱۳): کنترل توان DFIG در سرعت ۱ pu

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 نیاز بار در زمان ۰/۱ ثانیه از طریق مبدل سمت شبکه شده است. نتایج شبیه سازی در شکل الف- (۱۵) نشان داده شده اند. باتوجه به این نتایج، THD جریان شبکه از ۲۰/۹۱٪ به ۵/۲۷٪ کاهش یافته و مؤلفه های هارمونیکی جریان شبکه به شدت کاهش یافته اند.

میزان درصد اندازه هارمونیک های ۵، ۷ و ۱۱ نسبت به مولفه اصلی در جدول (۵) ارائه شده است. جریان های استاتور، روتور و توان ژنراتور فاقد اعوجاج هارمونیکی ناشی از بار غیرخطی می باشند.

ب) جبران سازی 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 شبیه سازی در شکل ب- (۱۵) نشان داده شده اند. با توجه به این نتایج، THD جریان شبکه از ۲۰/۹۱٪ به ۵/۲۶٪ کاهش یافته و مؤلفه های هارمونیکی جریان شبکه به شدت کاهش یافته اند. میزان درصد اندازه هارمونیک های ۵، ۷ و ۱۱ نسبت به مولفه اصلی در جدول (۴) ارائه شده است. توان ژنراتور دچار نوسان محدودی می گردد و جریان استاتور دچار اعوجاج هارمونیکی به میزان ۷/۶۰٪ می گردد باتوجه به میزان اعوجاج هارمونیکی جریان شبکه، این اعوجاج قابل قبول می باشد. معمولاً در اعوجاج های پایین تر



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

۸- نتایج شبیه سازی با روش DPC در مبدل های سمت روتور و شبکه با حذف هارمونیک در سرعت ثابت

الف) جبران سازی از طریق مبدل سمت شبکه:

معمولاً در اعوجاج‌های پایین‌تر جریان شبکه، اعوجاج جریان استاتور بسیار پایین‌تر می‌باشد. لذا عملکرد سیستم کنترل به لحاظ حذف هارمونیک مطلوب می‌باشد. در جدول (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 هارمونیک بهبودی حاصل می‌شود.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، اعوجاج هارمونیک جریان شبکه بطور قابل توجه‌ای کاهش یافته است. با جبران‌سازی از طریق مبدل سمت روتور، جریان استاتور در سرعت ثابت دچار اعوجاج در حد $7/6\%$ مؤلفه اصلی جریان استاتور می‌شود که با توجه به اعوجاج $21/91\%$ جریان شبکه قابل قبول می‌باشد و THD جریان شبکه به $5/26\%$ کاهش یافته است و مؤلفه‌های هارمونیک 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 $5/27\%$ کاهش یافته که نسبت به جبران‌سازی از طریق مبدل روتور بعلت عدم ایجاد اعوجاج هارمونیک 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

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 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 (۴) نشان می‌دهد که به‌کارگیری روش کنترلی DPC در هر دو مبدل سمت روتور و نیز سمت شبکه با در نظر گرفتن جبران‌سازی، در محتوای هارمونیک بهبودی حاصل می‌شود.

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

الف) جبران‌سازی از طریق مبدل سمت شبکه

با در نظر گرفتن بلوک دیاگرام شکل (۱۲) پس از جداسازی مؤلفه توان هارمونیک بار غیرخطی توسط فیلتر بالاگذر، و اعمال به مدار سوئیچینگ مبدل سمت شبکه اقدام به تامین توان هارمونیک 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 $20/91\%$ به $5/87\%$ کاهش می‌یابد و نیز مؤلفه‌های هارمونیک جریان شبکه کاهش یافته‌اند مؤلفه‌های هارمونیک جریان شبکه بشدت کاهش یافته‌اند میزان درصد اندازه هارمونیک‌های ۵، ۷ و ۱۱ نسبت به مؤلفه اصلی در جدول (۵) ارائه شده است.

جریان‌های استاتور و روتور و نیز توان ژنراتور فاقد اعوجاج هارمونیک 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 هارمونیک بار غیرخطی توسط فیلتر بالاگذر، و اعمال به مدار سوئیچینگ مبدل سمت روتور اقدام به تامین توان هارمونیک مورد نیاز بار در زمان $0/1$ 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 $20/91\%$ به $6/1\%$ کاهش یافته و مؤلفه‌های هارمونیک جریان شبکه بشدت کاهش یافته‌اند میزان درصد اندازه هارمونیک‌های ۵، ۷ و ۱۱ نسبت به مؤلفه اصلی در جدول (۵) ارائه شده است. توان ژنراتور دچار نوسان محدودی می‌گردد و جریان استاتور دچار اعوجاج هارمونیک به میزان $7/60\%$ می‌گردد با توجه به میزان اعوجاج هارمونیک جریان شبکه، این اعوجاج قابل قبول می‌باشد.

- [14] 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] Ferde 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 topologies for 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 Niregaard Jrgensen, "Active and reactive power ripple minimization in direct power control of matrix converter-fed DFIG", Elsevier, 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, Olav Krause, 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 Industry 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] Siddharth Singh 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.

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 هارمونیک بار غیرخطی توسط فیلتر بالاگذر و اعمال به سیستم کلیدزنی مبدل سمت روتور و همچنین مبدل سمت شبکه، اعوجاج هارمونیک جریان شبکه بطور قابل توجهی 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 رپل توان ژنراتور.

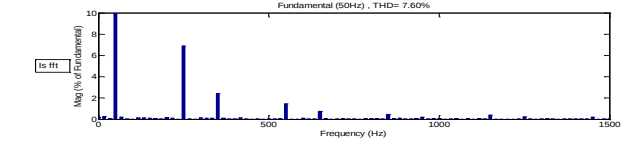
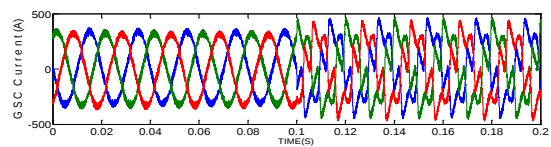
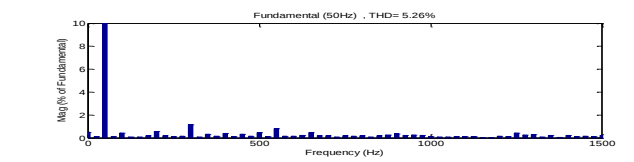
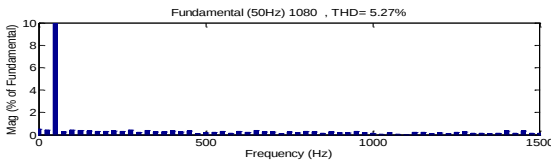
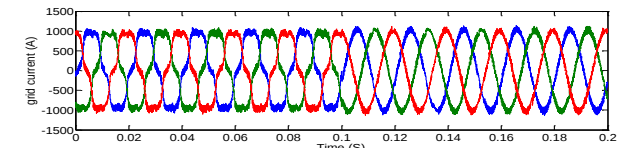
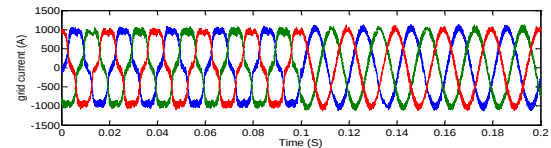
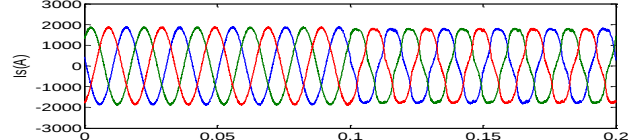
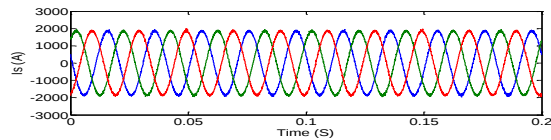
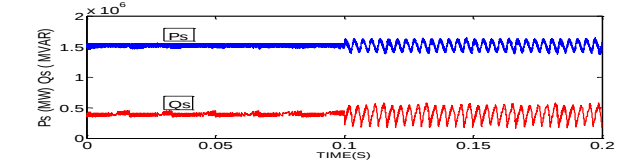
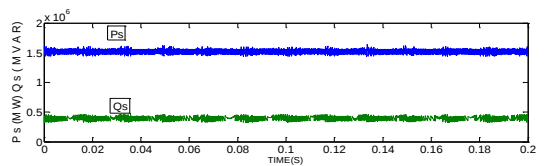
منابع:

- [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 Industry 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", Oxford 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 Modulation With Adaptive Stator Flux Observer For Induction Motor", IEEE Trans. on Mag., Vol. 46, 2010, pp. 3133-3136.

پایوست:

جدول (پ): مشخصات DFIG شبیه سازی شده

۲MW	توان نامی	رژکتور
۶۹۰V	ولتاژ استاتور	
۰/۳	نسبت تبدیل استاتور به روتور	
۰/۰۱۰۸pu	R_s	
۰/۰۱۲۱pu	R_r	
۳/۳۶۲pu	L_m	
۰/۱۰۲pu	L_{ls}	
۰/۱۱pu	L_{lr}	
۰/۰۵S	H	میدل
۲	تعداد جفت قطب	
۱۲۰۰V	ولتاژ لیک DC	
۱۶ mF	خازن لیک DC	
۰/۴ mH	اندوکتانس میدل سمت شبکه	فیلتر پایین گذر
۵Hz	فرکانس قطع	
۰/۷۰۷	ضریب کیفیت	



الف) از طریق میدل سمت شبکه

ب) از طریق میدل سمت روتور

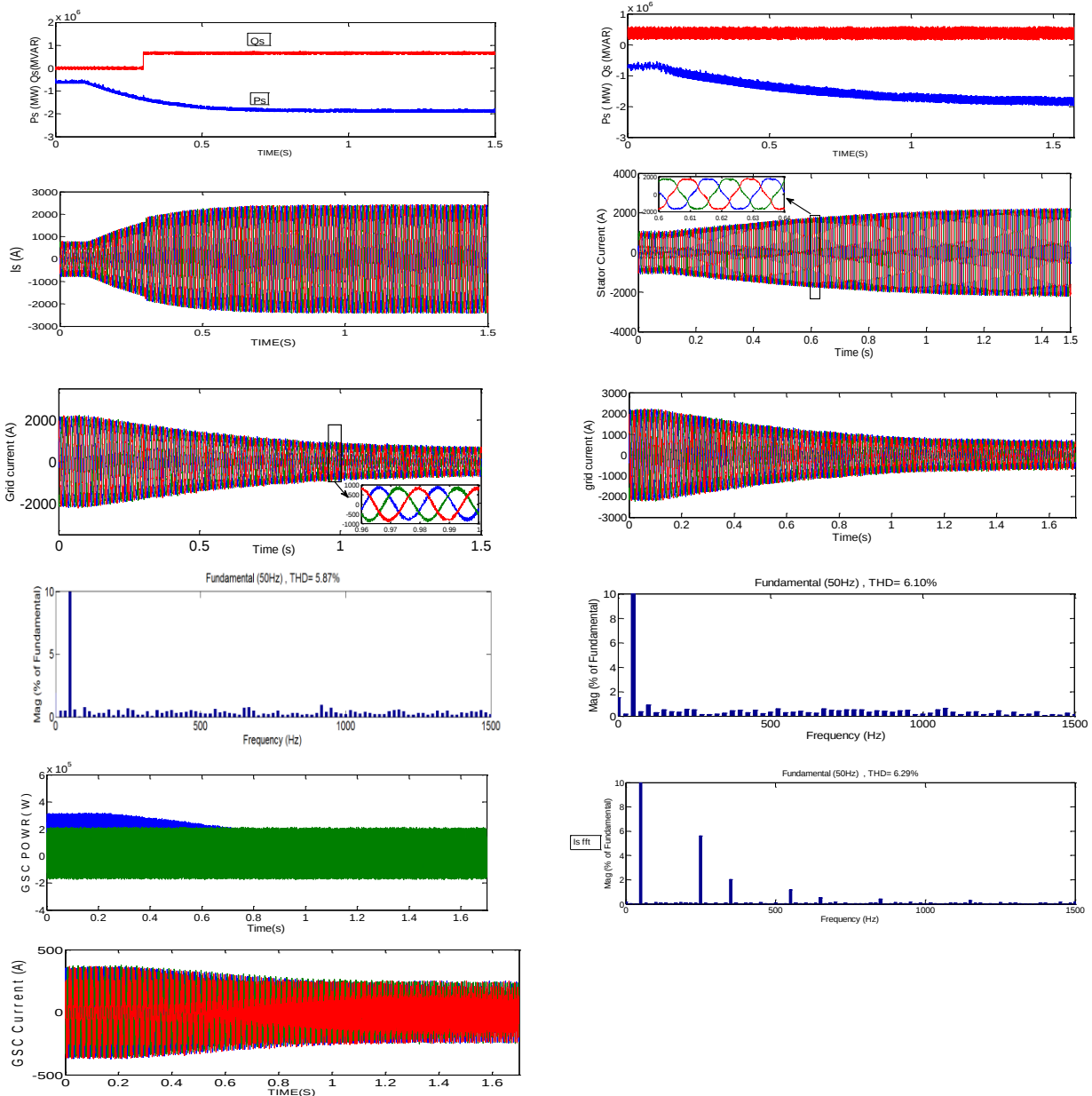
شکل (۱۵): نتایج شبیه سازی با حذف هارمونیک در سرعت ثابت

جدول (۴): مقایسه محتوای هارمونیک حالت های مختلف به ازای بار غیرخطی و سرعت ثابت توربین بادی

حالت های مختلف	میدل سمت شبکه		میدل 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 جبران سازی	DPC با جبران سازی	DPC بدون جبران سازی	DPC با جبران سازی				
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

جدول (۵): مقایسه محتوای هارمونیک 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



ب- از طریق مبدل سمت شبکه

الف- از طریق مبدل سمت روتور

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

زیر نویس ها:

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

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.

