

بهبود تلفات هارمونیک و کیفیت توان به دلیل سوئیچینگ مبدل ماتریسی در ژنراتور القایی تغذیه دوسویه با استفاده از فیلتر پسیو هیبریدی

ندا قادری، هدی نادری، محمد عابدینی و محمدحسن مرادی

[۱]. سیستم‌های تبدیل انرژی بادی به دو صورت سرعت ثابت و متغیر تقسیم می‌شوند [۲]. هدف از انرژی باد، تولید انرژی الکتریکی است که این کار با قراردادن توربین بادی در مسیر باد صورت می‌گیرد. ژنراتورهای مختلفی در توربین‌های بادی استفاده می‌شوند که شامل ژنراتور القایی قفس سنجابی^۱ (SCIG)، ژنراتور القایی تغذیه دوسویه^۲ (DFIG)، ژنراتور سنکرون روتور سیم‌پیچی^۳ (WRSG) و ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم^۴ (PMSG) هستند [۳] تا [۶]؛ اما DFIGها بیشترین کاربرد را در توربین بادی دارند و نیز ژنراتورهای القایی با توجه به مزیت‌های اقتصادی و فنی، کاربرد گسترده‌ای در تولید انرژی الکتریکی به‌خصوص در نیروگاه‌های بادی دارند. مهم‌ترین مزایای توربین بادی بر اساس DFIG، داشتن سرعت متغیر، قابلیت توان چهار ربعی، کاهش نوسانات توان الکتریکی، کاهش هزینه مبدل و کاهش تلفات توان است [۷] و [۸].

سیم‌پیچ‌های استاتور در ژنراتور القایی تغذیه دوسویه مستقیماً به شبکه و سیم‌پیچ‌های روتور از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند. این مبدل‌ها شامل Back-to-Back و مبدل‌های ماتریسی مستقیم و غیرمستقیم هستند. مبدل‌های Back-to-Back ساختار دومرحله‌ای می‌باشند که تلفات نسبتاً بالا و با وجود خازن لینک DC، حجم و وزن زیادی دارند و در این مقاله برای برطرف کردن مشکل مبدل Back-to-Back مبدل‌های ماتریسی جایگزین این مبدل پیشنهاد شده است.

استراتژی‌های مختلفی برای کنترل DFIG وجود دارد؛ از جمله روش کنترل برداری، کنترل مستقیم گشتاور و روش کنترل مستقیم توان و کنترل تطبیقی. در [۹] کنترل برداری برای ژنراتور القایی تغذیه دوسویه با وجود سیستم تبدیل انرژی استفاده شده است. هدف از این کنترل، به‌دست آوردن مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو برابر با مقدار مرجعشان است، کنترل‌کننده انتگرالی-تناسبی^۵ (PIC) برای تنظیم جریان روتور استفاده شده است. کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو توسط کنترل‌کننده جریان روتور به‌دست می‌آیند. نتایج شبیه‌سازی عملکرد دینامیکی بالا تحت شرایط خطا را نشان می‌دهد. سیستم کنترل پیشنهادی DFIG

چکیده: در ژنراتور القایی تغذیه دوسویه، سیم‌پیچ‌های استاتور مستقیماً به شبکه متصل می‌شوند؛ در صورتی که سیم‌پیچ‌های روتور از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند. این مبدل‌ها شامل Back-to-Back و مبدل‌های ماتریسی مستقیم و غیرمستقیم هستند. مبدل‌های Back-to-Back دارای ساختار دومرحله‌ای می‌باشند که تلفات نسبتاً بالا و با وجود خازن لینک DC، حجم و وزن زیادی دارند. در این مقاله برای برطرف کردن مشکل مبدل Back-to-Back، مبدل‌های ماتریسی جایگزین این مبدل پیشنهاد می‌گردد و از کنترل مستقیم توان در ژنراتورهای القایی تغذیه دوسویه با استفاده از مبدل ماتریسی استفاده شده است. این مبدل در طول تغییرات توان مرجع و توربین به‌خوبی مقادیر مرجع را دنبال می‌کند. چالش اصلی استفاده از مبدل‌ها این است که باعث ایجاد هارمونیک و نوسانات توان می‌شوند که برای برطرف کردن این مشکل از فیلتر پسیو هیبریدی در ورودی و خروجی مبدل ماتریسی استفاده شده که باعث کاهش نوسانات توان‌های اکتیو و راکتیو و بهبود THD جریان و کیفیت توان می‌شود. به‌علاوه پاسخ دینامیکی دقیق به هنگام تغییرات توان مرجع دارد و این عدم نیاز به حلقه‌های کنترل جریان، باعث ایجاد ساختار ساده با کمترین محاسبات شده است. نتیجه حاصل از روش پیشنهادی با استفاده از فیلتر و بدون فیلتر مقایسه می‌شود که نتایج نشان از عملکرد خوب و برتری استفاده از فیلتر دارد.

کلیدواژه: ژنراتور القایی تغذیه دوسویه، فیلتر پسیو هیبریدی، کنترل مستقیم توان، مبدل ماتریسی.

۱- مقدمه

انرژی باد، یکی از منابع پایان‌ناپذیر جهان هستی است که بر اثر اختلافات ترمودینامیکی نظیر اختلاف دما و فشار بین نواحی مجاور به‌وجود می‌آید. این انرژی که یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر است، تحت تأثیرات آلودگی محیط و منابع انرژی فسیلی قرار گرفته است

این مقاله در تاریخ ۲۲ تیر ماه ۱۴۰۱ دریافت و در تاریخ ۸ فروردین ماه ۱۴۰۳ بازنگری شد.

ندا قادری (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان، همدان، ایران، (email: n.ghaderi92@gmail.com).

هدی نادری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان، همدان، ایران، (email: h.naderi63@gmail.com).

محمد عابدینی، دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه آیت‌الله بروجردی، بروجرد، ایران، (email: m.abedini@abru.ac.ir).

محمدحسن مرادی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، (email: mh_moradi@yahoo.co.uk).

1. Squirrel Cage Induction Generator
2. Doubly Fed Induction Generator
3. Wound Rotor Synchronous Generator
4. Permanent Magnet Synchronous Generator
5. Proportion Integral Control

باد مقاوم است. هدف این استراتژی، کاهش ریبیل توان‌ها و کاهش ریبیل گشتاور در شفت توربین می‌باشد. در این مقاله ساختار مبدل دومرحله‌ای است و با وجود خازن لینک DC، حجم و وزن بالایی دارد.

در [۱۷] از استراتژی کنترل یک DFIG با مبدل ماتریس غیرمستقیم استفاده شده است. مدولاسیون مبدل ورودی برای تولید سطوح مختلف ولتاژ لینک DC مجازی مورد استفاده قرار می‌گیرد و با کموتاسیون VSI استفاده شده در این روش، ولتاژ کاهش یافته که منجر به کاهش تلفات کموتاسیون در مبدل خروجی می‌شود. برای مبدل ورودی، کموتاسیون سوئیچینگ نرم با همگام‌سازی الگوهای PWM ورودی و خروجی استفاده شده است. این استراتژی در کاربردهای DFIG قابل استفاده است؛ بنابراین با نزدیک شدن سرعت DFIG به سرعت سنکرون، ولتاژ مورد نیاز روتور کاهش می‌یابد. مشکل اصلی این روش در جایی است که از ولتاژ DC کاهش یافته استفاده می‌شود؛ چرا که اندکی افزایش در جریان مبدل ورودی مشاهده می‌شود؛ اما با طراحی مناسب فیلتر ورودی می‌توان بر این امر غلبه کرد.

در [۱۸] کنترل بارگذاری مصنوعی موتورهای القایی در مبدل ماتریسی ارائه شده است. همچنین مشکلات ناشی از تأثیر فیلتر ورودی باعث اضافه ولتاژ در سیستم شده که راه حل‌های پیشنهادی شامل عملیات احیاکننده درایو مبدل ماتریسی و بارگذاری مصنوعی موتور القایی است. برای جلوگیری از اضافه ولتاژ، ولتاژ خازن باید همواره نظارت شود. اگر مقدار آن خیلی کوچک باشد، کنتاکتور بای‌بک باید باز شود. به این ترتیب برق‌رسانی ایمن ماتریس (از طریق مقاومت‌های میرایی) تضمین می‌گردد. همچنین در هنگام کاهش ولتاژ، اگر ولتاژ خازن بیش از حد کاهش یابد، مقاومت‌های میرایی در مدار فیلتر ورودی متصل می‌شوند. در این مقاله طراح باید مقادیر فیلتر ورودی و خازن را تأیید کند تا خطر اضافه ولتاژ را کاهش دهد.

در [۱۲] تکنیک کنترل مستقیم توان در ژنراتور القایی تغذیه دوسویه در مبدل ماتریسی پیشنهاد شده است. توان‌های اکتیو و راکتیو در فرکانس سوئیچینگ ثابت با استفاده از تکنیک مدولاسیون بردار فضایی غیرمستقیم (ISVM) تنظیم می‌شوند. فرکانس سوئیچینگ ثابت در روش پیشنهادی منجر به طراحی دقیق فیلترها می‌شود. علاوه بر این، مؤلفه راکتیو سمت ورودی MC کنترل می‌شود که منجر به کاهش اعوجاج در شکل موج جریان شبکه می‌گردد؛ اما خطای ولتاژ غیرخطی مبدل ماتریسی ممکن است باعث کنترل نادرست توان شود. با توجه به استراتژی‌های انجام شده و مبدل مورد استفاده، مشکلاتی وجود داشت؛ از جمله حجم و وزن بالا در سیستم و هارمونیک و نوسانات توان.

نوآوری این مقاله به‌طور خلاصه به‌صورت زیر می‌باشد:

- استفاده از مبدل ماتریسی فاقد خازن لینک DC و کمتر شدن حجم نسبت به مبدل Back-to-Back و حذف کنترل‌کننده سمت شبکه
- استفاده از استراتژی کنترل مستقیم توان که بیانگر پاسخ دینامیکی دقیق به هنگام تغییرات توان مرجع است و این عدم نیاز به حلقه‌های کنترل جریان، باعث ایجاد ساختار ساده با کمترین محاسبات شده است.
- هارمونیک‌ها در بیشتر ادوات الکترونیک قدرت بر اثر سوئیچینگ مبدل‌ها به‌وجود می‌آیند که استفاده از فیلتر پسیو هیبریدی به‌صورت سری و موازی باعث کاهش THD و بهبود کیفیت توان می‌شود.
- در انتخاب مقدار المان‌های فیلترینگ باید دقت شود که بالا بودن این مقادیر، تأثیرات منفی بر روی کیفیت توان دارند که باعث اضافه ولتاژ و افزایش حجم و وزن سیستم می‌شوند. برای رفع این مشکل

وابسته به پارامترهای ماشین است و برای رفع مشکل، روش کنترل گشتاور مستقیم^۱ (DTC) یا کنترل مستقیم توان پیشنهاد شده است. در [۲] کنترل گشتاور مستقیم در DFIG با استفاده از مبدل ماتریسی غیرمستقیم پیشنهاد شده است. این کنترل چندین مزیت دارد که شامل فرکانس سوئیچینگ ثابت، کاهش ریبیل‌های شار و گشتاور و کاهش THD برای جریان‌های استاتور و روتور است؛ اما هدف از کنترل گشتاور مستقیم، کنترل شار و گشتاور می‌باشد.

در [۱۰] جدول سوئیچینگ جدید بر اساس استراتژی کنترل مستقیم توان^۲ (DPC) در DFIG با استفاده از مبدل ماتریسی^۳ (MC) پیشنهاد شده است. دلیل استفاده از MC عدم نیاز به خازن لینک DC حجیم، حذف کنترل‌کننده مبدل طرف شبکه و قابلیت تنظیم ضریب توان ورودی واحد می‌باشد؛ اما نوسانات توان همچنان موجود است.

در [۱۱] از استراتژی پیشنهادی DPC استفاده شده که دارای فرکانس سوئیچینگ متغیر است و طراحی مدار قدرت را نیز پیچیده می‌کند؛ لذا ترکیب این استراتژی با مدولاسیون بردار فضا^۴ (SVM) باعث ثابت شدن فرکانس سوئیچینگ می‌شود. هدف از استراتژی SVM-DPC، کاهش نوسانات توان اکتیو و راکتیو استاتور است؛ اما این توان‌ها ریبیل دارند.

در [۱۲] کنترل مستقیم توان در ژنراتور القایی تغذیه دوسویه با استفاده از مبدل ماتریسی پیشنهاد شده است. در این سیستم، مبدل پیشنهادی برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو و تنظیم ضریب توان نزدیک به واحد به دلیل تعداد زیادی بردارهای ولتاژ خروجی در مقایسه با اینورترهای منبع ولتاژ ارائه شده است. در اثر بار غیرخطی متصل به شبکه با استفاده از این روش از ایجاد هارمونیک‌ها در شبکه جلوگیری می‌شوند. حذف کنترل طرف شبکه و فاقد خازن لینک DC از نقاط برجسته این کار است؛ با وجود این، جریان‌ها هارمونیک دارند.

در [۱۳] ژنراتور توان بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تغذیه دوسویه با استفاده از مبدل Back-to-Back و مدولاسیون پهنای پالس انجام شده است. هدف از استفاده فیلتر، حذف هارمونیک با استفاده از مبدل PWM می‌باشد. فیلتر LCL در هر دو طرف مبدل سمت شبکه و روتور طراحی گردیده است؛ اما مبدل و فیلتر استفاده شده از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه نیست.

در [۱۴] بررسی کنترل برداری DFIG در سیستم توان بادی ارائه شده است. نوسانات توان در سیستم‌های ضعیف به دلیل محدودیت ولتاژ و فرکانس باعث ناپایداری سیستم می‌شود. هدف این روش آن است که وجود سیستم ذخیره انرژی به کاهش نوسانات توان‌ها کمک کند. مشکل روش وابستگی به پارامترهای ماشین و نیاز به رگولاتورهای جریان است.

در [۱۵] آنالیز، مدلینگ و کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوسویه در سیستم‌های توربین بادی سرعت متغیر به‌صورت راه‌اندازی توربین در شبکه ارائه شده است. هدف از استفاده کنترل‌کننده منطبق فازی برای بهبود مقاومت عملکرد سیستم کنترل شده در صورت تغییر پارامترهای ماشین می‌باشد؛ اما استفاده از مبدل Back-to-Back به دلیل وجود خازن لینک DC حجم و وزن بالایی دارد و باعث افزایش تلفات می‌شود.

در [۱۶] از کنترل مستقیم توان تطبیقی برای ژنراتور القایی تغذیه دوسویه استفاده شده است. این استراتژی در مقابل تغییرات بار و سرعت

1. Direct Torque Control
2. Direct Power Control
3. Matrix Converter
4. Space Vector Modulation

که $\sigma = (L_s L_r - L_m^2) / (L_s L_r)$ فاکتور نشتی است. توان اکتیو ورودی استاتور از شبکه و توان راکتیو خروجی استاتور بر اساس ولتاژ و جریان استاتور را می‌توان طبق (۶) و (۷) بیان کرد [۱۹]

$$P_s = \frac{3}{2} v_s^r \cdot i_s^r \quad (۶)$$

$$Q_s = -\frac{3}{2} v_s^r \times i_s^r \quad (۷)$$

از آنجا که $|\psi_s^s| = |\psi_r^r| = cte$ است، شار استاتور در دستگاه مرجع روتور می‌توان استنتاج کرد

$$\psi_s^r = \psi_s^s e^{-j\omega_s t} = |\psi_s^s| e^{j\omega_s t} e^{-j\omega_r t} = |\psi_s^r| e^{j(\omega_s - \omega_r)t} \quad (۸)$$

بنابراین $d\psi_s^r/dt$ در (۱) به صورت زیر است

$$\frac{d\psi_s^r}{dt} = j(\omega_s - \omega_r)\psi_s^r \quad (۹)$$

که ω_s سرعت سنکرون می‌باشد. با جاگذاری (۱)، (۵) و (۹) در (۶) و (۷) و با صرف نظر کردن از مقاومت استاتور، نتایج زیر به دست می‌آید

$$P_s = -\frac{3\omega_s}{2\sigma L_s} |\psi_s^r| |\psi_r^r| \sin \gamma = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\psi_s^r| |\psi_r^r| \sin \gamma \quad (۱۰)$$

$$Q_s = \frac{3\omega_s}{2\sigma L_s} |\psi_s^r| \left(\frac{L_m}{L_r} |\psi_r^r| \cos \gamma - |\psi_s^r| \right) \quad (۱۱)$$

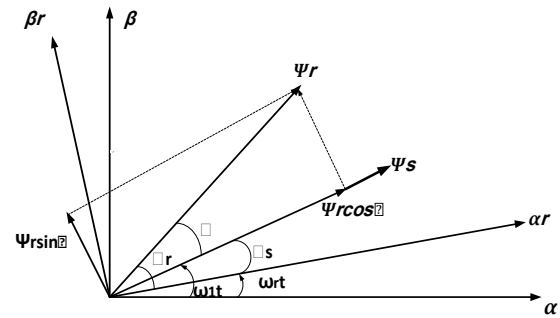
که در آن γ زاویه بین بردارهای فضای شار استاتور و روتور است. با مشتق‌گیری از (۱۰) و (۱۱) روابط زیر به دست می‌آیند

$$\frac{dP_s}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\psi_s^r| \frac{d(|\psi_r^r| \sin \gamma)}{dt} \quad (۱۲)$$

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

که در (۱۲) مشاهده می‌شود تغییرات سریع در توان اکتیو و راکتیو با تغییر $|\psi_r^r| \sin \gamma$ و $|\psi_r^r| \cos \gamma$ به ترتیب حاصل می‌شود. در شکل ۱، $|\psi_r^r| \sin \gamma$ و $|\psi_r^r| \cos \gamma$ به ترتیب نمایانگر مؤلفه‌های شار روتور ψ_r^r در جهت عمود و در جهت شار استاتور هستند. این نشان می‌دهد که اگر تغییر شار روتور در جهت شار استاتور باشد، در آن صورت $|\psi_r^r| \cos \gamma$ و توان راکتیو Q_s تغییر می‌کند. همچنین اگر تغییر در شار روتور، ۹۰ درجه نسبت به جهت شار استاتور باشد، در آن صورت $|\psi_r^r| \sin \gamma$ و توان اکتیو P_s تغییر می‌کند. موقعیت اولیه شار روتور و مقدار آن به طور مستقیم تغییری در توان اکتیو و راکتیو ایجاد نمی‌کند.

کنترل مستقیم توان‌های اکتیو و راکتیو در ژنراتور القایی تغذیه دوسویه، دلیل استفاده از استراتژی کنترل مستقیم توان در DFIG است که باعث کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو، کاهش ریپل توان‌های اکتیو و راکتیو و حذف حلقه‌های کنترل جریان می‌شود. از امتیازات روش DPC، رفتار گذرای نسبتاً خوب و وابستگی بسیار کم نسبت به پارامترهای ماشین است. شکل ۲ اینورتر منبع ولتاژ (VSI) سه‌فاز دوسطحی را نشان می‌دهد که شامل هشت بردار است؛ دو بردار آن صفر و شش بردار دیگر آن، ولتاژ



شکل ۱: بردارهای شار استاتور و روتور در دستگاه مرجع روتور [۲۰].

باید از افزایش فرکانس سوئیچینگ استفاده کرد؛ اما از طرفی این افزایش باعث افزایش تلفات سیستم و نیز استرس روی سوئیچ‌ها می‌شود که در این مقاله، توازن میان انتخاب مقادیر فیلترینگ و فرکانس سوئیچینگ در نظر گرفته شده است.

هدف از انجام این مقاله، بهبود کیفیت توان و تولید انرژی الکتریکی با حداقل نوسانات است که رسیدن به این هدف با انجام این مراحل میسر می‌شود: استراتژی کنترل مستقیم توان در ژنراتور القایی تغذیه دوسویه با استفاده از مبدل ماتریسی مستقیم ارائه شده است. کنترل پیشنهادی باعث کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو می‌شود. این استراتژی همراه با مبدل ماتریسی مستقیم در اثر سرعت متغیر توربین و تغییرات توان‌های مرجع بوده که توان‌های اکتیو و راکتیو به خوبی مقادیر مرجع را دنبال می‌کنند. در مبدل ماتریسی چون فاقد لینک DC است، هر گونه اعوجاج و اختلال در ولتاژ ورودی به خروجی منتقل می‌شود و سوئیچینگ مبدل ماتریسی باعث ایجاد هارمونیک و نوسان نامطلوب در تولید توان‌های اکتیو و راکتیو می‌شوند. بنابراین برای رفع این مشکل از فیلتر پسیو هیبریدی استفاده شده که باعث کاهش هارمونیک جریان‌ها و کاهش ریپل توان‌های اکتیو و راکتیو می‌شود. شبیه‌سازی در محیط Matlab/Simulink برای سیستم DFIG معادل ۲ مگاوات پیاده‌سازی شده است.

در بخش دوم، معادلات ریاضی در DFIG معرفی شده و بخش سوم به ساختار کنترل مستقیم توان در DFIG می‌پردازد. بخش چهارم کنترل‌کننده پیشنهادی با استفاده از مبدل و فیلتر پسیو هیبریدی را ارائه می‌دهد. در بخش پنجم، شبیه‌سازی و مقایسه نتایج صورت می‌گیرد و در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ششم آمده است.

۲- معادلات ریاضی ژنراتور القایی تغذیه دوسویه

ژنراتور القایی تغذیه دوسویه به دلیل داشتن سرعت متغیر و کاهش تلفات توان، بیشترین کاربرد را در توربین‌های بادی دارد. هدف از توربین‌های بادی تولید توان الکتریکی است. معادلات DFIG در دستگاه مرجع روتور به صورت زیر بیان می‌شوند

$$v_s^r = R_s i_s^r + \frac{d\psi_s^r}{dt} + j\omega_r \psi_s^r \quad (۱)$$

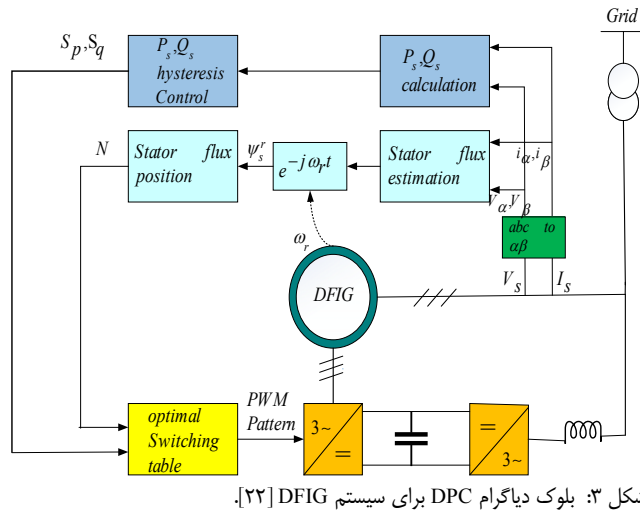
$$v_r^r = R_r i_r^r + \frac{d\psi_r^r}{dt} \quad (۲)$$

$$\psi_s^r = L_s i_s^r + L_m i_r^r \quad (۳)$$

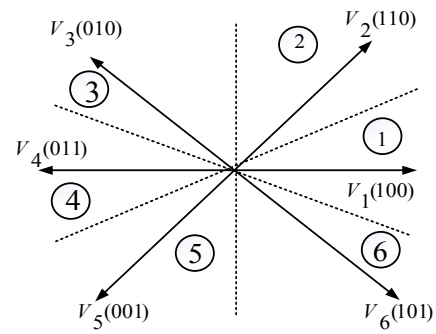
$$\psi_r^r = L_s i_r^r + L_m i_s^r \quad (۴)$$

طبق (۳) و (۴)، جریان استاتور را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد

$$i_s^r = \frac{\psi_s^r}{\sigma L_s} - \frac{L_m \psi_r^r}{\sigma L_s L_r} \quad (۵)$$



شکل ۳: بلوک دیاگرام DPC برای سیستم DFIG [۲۲].



شکل ۲: بردارهای فضای ولتاژ خروجی در VSI دوسطحی [۲۱].

جدول ۱: سوئیچینگ بهینه در DPC [۲۲].

		I	II	III	IV	V	VI
$S_q = 1$	$S_p = 1$	۱۰۱	۱۰۰	۱۱۰	۰۱۰	۰۱۱	۰۰۱
	$S_p = ۰$	۱۰۰	۱۱۰	۰۱۰	۰۱۱	۰۰۱	۱۰۱
	$S_p = -1$	۱۱۰	۰۱۰	۰۱۱	۰۰۱	۱۰۱	۱۰۰
$S_q = ۰$	$S_p = 1$	۰۰۱	۱۰۱	۱۰۰	۱۱۰	۰۱۰	۱۱۰
	$S_p = ۰$	۱۱۱/۰۰۰	۱۱۱/۰۰۰	۱۱۱/۰۰۰	۱۱۱/۰۰۰	۱۱۱/۰۰۰	۱۱۱/۰۰۰
	$S_p = -1$	۰۱۰	۰۱۱	۰۰۱	۱۰۱	۱۰۰	۱۱۰
$S_q = -1$	$S_p = 1$	۰۰۱	۱۰۱	۱۰۰	۱۱۰	۰۱۰	۰۱۱
	$S_p = ۰$	۰۱۱	۰۰۱	۱۰۱	۱۰۰	۱۱۰	۰۱۰
	$S_p = -1$	۰۱۰	۰۱۱	۰۰۱	۱۰۱	۱۰۰	۱۱۰

نشان داده شده است. این مبدل نیازی به عناصر ذخیره‌کننده انرژی ندارد و فاقد لینک DC می‌باشد. با چنین آرایشی از کلیدها، مبدل قادر به انتقال انرژی دوطرفه خواهد بود.

مبدل‌های ماتریسی مزایای فراوان دارند که از جمله می‌توان به شکل موج‌های با کیفیت بالا در ورودی و خروجی، قابلیت تنظیم ضریب قدرت ورودی تا عدد یک، قابلیت انتقال توان در هر دو جهت، نداشتن خازن لینک DC، امکان کنترل اختلاف فاز ولتاژ خروجی و حجم و وزن کمتر نسبت به مبدل‌های AC/DC/AC اشاره کرد.

کاربردهای مبدل‌های ماتریسی، نشان‌دهنده رشد روزافزون استفاده از این مبدل‌ها در صنعت است که از جمله می‌توان به کاربرد مبدل‌های ماتریسی در درایو موتورهای القایی، صنایع هوایمایی، منابع تغذیه سوئیچینگ و رگولاتورهای ولتاژ اشاره کرد. بردار فضای ولتاژهای خروجی و جریان ورودی به صورت زیر بیان می‌شود

$$\bar{V}_o = \frac{2}{3}(V_A + V_B e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_C e^{-j\frac{2\pi}{3}}) \quad (14)$$

$$\bar{i}_i = \frac{2}{3}(i_a + i_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_c e^{-j\frac{2\pi}{3}}) \quad (15)$$

در شکل ۴ برای هر فاز خروجی، سه حالت سوئیچ‌زنی هست و بنابراین $2^3 = 27$ حالت سوئیچ‌زنی وجود دارد. ۲۱ بردار مناسب در الگوریتم DPC به کار برده می‌شود؛ چون جهت آنها ثابت است [۲۳] که حالات این بردارها در جدول ۲ نشان داده شده است، تعداد زیادی بردارهای ولتاژ خروجی در مبدل‌های ماتریسی وجود دارد و برای کنترل توان اکتیو و راکتیو و نیز ضریب توان ورودی نزدیک به یک کنترل می‌شود. بنابراین

اکتیو هستند و به شش سکتور تقسیم می‌شوند. شار روتور از رابطه زیر به دست می‌آید

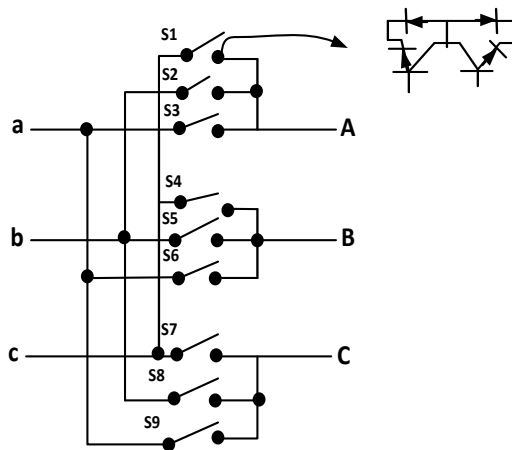
$$\frac{d\psi_r^r}{dt} = V_r^r - R_r i_r^r \approx V_r^r \quad (13)$$

صرف‌نظر کردن از مقاومت روتور در (۱۳) بیانگر این است که تغییر شار روتور با ولتاژ اعمال شده به روتور تعیین می‌شود؛ بنابراین با انتخاب بردار ولتاژ مناسب، شار روتور کنترل می‌شود. اگر موقعیت شار استاتور معلوم باشد، تغییرات شار روتور کنترل می‌شود. برای هر بردار ولتاژ روتور تعیین می‌گردد. بنابراین طبق (۱۲)، تأثیر هر یک از بردارهای ولتاژ بر توان اکتیو و راکتیو در هر ناحیه ۶۰ درجه محاسبه می‌گردد که تنها باید موقعیت شار استاتور معلوم باشد. در شکل ۳ بلوک دیاگرام DPC در DFIG نشان داده شده است. توان‌های اکتیو و راکتیو با مقدار مرجعشان مقایسه می‌شوند و خطاها به دو جبران‌ساز هیستریزس سه‌سطحی ارسال می‌شوند. با استفاده از خروجی‌های جبران‌ساز هیستریزس و تعداد سکتور که شار استاتور در قاب روتور واقع شده، یک بردار ولتاژ مناسب از جدول سوئیچینگ که در جدول ۱ آمده است، انتخاب می‌شود [۱۹].

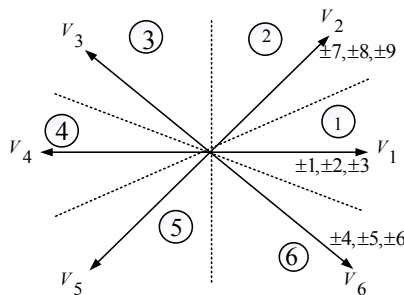
۳- روش پیشنهادی

۳-۱ مبدل ماتریسی

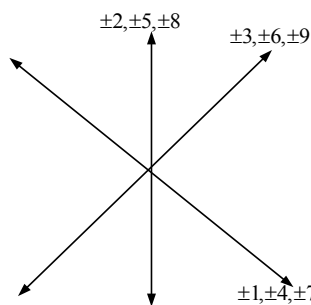
مبدل ماتریسی مستقیم، یک مبدل AC-AC با ۲۷ حالت سوئیچ‌زنی می‌باشد. این سوئیچ‌ها دوجته هستند که هر فاز ولتاژ ورودی را به هر فاز ولتاژ خروجی متصل می‌کنند. در شکل ۴ توپولوژی مبدل ماتریسی سه‌فاز



شکل ۴: شماتیک مبدل ماتریسی [۲۲].



شکل ۵: بردارهای ولتاژ خروجی [۲۲].



شکل ۶: بردارهای جریان ورودی [۲۲].

مستقل توان اکتیو و راکتیو، پاسخ دینامیکی سریع نسبت به روش کنترل برداری، عدم نیاز به حلقه‌های کنترل جریان و کاهش ریبیل توان اکتیو و راکتیو است [۱۹]. این استراتژی، فرکانس سوئیچینگ متغیر دارد که استفاده از استراتژی SVM-DPC باعث ثابت شدن فرکانس سوئیچینگ می‌شود. این کنترل طوری طراحی شده که بتواند پاسخ دینامیکی سریع و با عملکرد قابل قبول در حالت ماندگاری^۱ داشته باشد. این شرایط با استفاده از جدول سوئیچ زنی و انتخاب بردارهای مناسب ولتاژ امکان پذیر خواهد بود که حالت‌های سوئیچینگ مبدل با استفاده از DPC بر اساس خطاهای لحظه‌ای توان اکتیو و راکتیو و موقعیت زاویه‌ای بردار ولتاژ انتخاب می‌شوند [۲۴].

تعداد زیادی از بردارهای ولتاژ خروجی در مبدل‌های ماتریسی وجود دارد که برای کنترل توان اکتیو و راکتیو و ضریب توان ورودی نزدیک به یک کنترل می‌شود. بنابراین روش DPC با استفاده از مبدل ماتریسی یک ترتیب سوئیچ زنی مناسب برای کنترل توان اکتیو و راکتیو تحت محدودیت ضریب توان واحد انتخاب می‌شود. مقدار ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی،

جدول ۲: حالات سوئیچینگ مبدل ماتریسی [۲۲].

State	A	B	C	$ V_c $	α°
+۱	a	b	b	$\frac{2}{3} V_{ab} $	۰°
-۱	b	a	a	$-\frac{2}{3} V_{ab} $	۰°
+۲	b	c	c	$\frac{2}{3} V_{ab} $	۰°
-۲	c	b	b	$-\frac{2}{3} V_{ab} $	۰°
+۳	c	a	a	$\frac{2}{3} V_{ab} $	۰°
-۳	a	c	c	$-\frac{2}{3} V_{ab} $	۰°
+۴	b	a	b	$\frac{2}{3} V_{ab} $	۱۲۰°
-۴	a	b	a	$-\frac{2}{3} V_{ab} $	۱۲۰°
+۵	c	b	c	$\frac{2}{3} V_{ab} $	۱۲۰°
-۵	b	c	b	$-\frac{2}{3} V_{ab} $	۱۲۰°
+۶	a	c	a	$\frac{2}{3} V_{ab} $	۱۲۰°
-۶	c	a	c	$-\frac{2}{3} V_{ab} $	۱۲۰°
+۷	b	b	a	$\frac{2}{3} V_{ab} $	-۱۲۰°
-۷	a	a	b	$-\frac{2}{3} V_{ab} $	-۱۲۰°
+۸	c	c	b	$\frac{2}{3} V_{ab} $	-۱۲۰°
-۸	b	b	c	$-\frac{2}{3} V_{ab} $	-۱۲۰°
+۹	a	a	c	$\frac{2}{3} V_{ab} $	-۱۲۰°
-۹	c	c	a	$-\frac{2}{3} V_{ab} $	-۱۲۰°
۰	a	a	a	۰	-
۰	b	b	b	۰	-
۰	c	c	c	۰	-

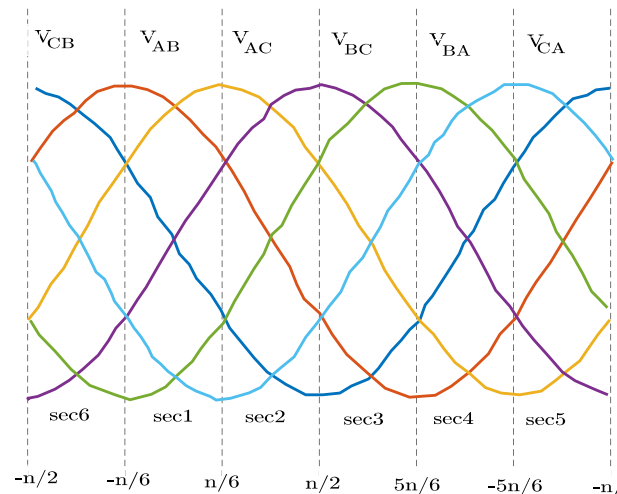
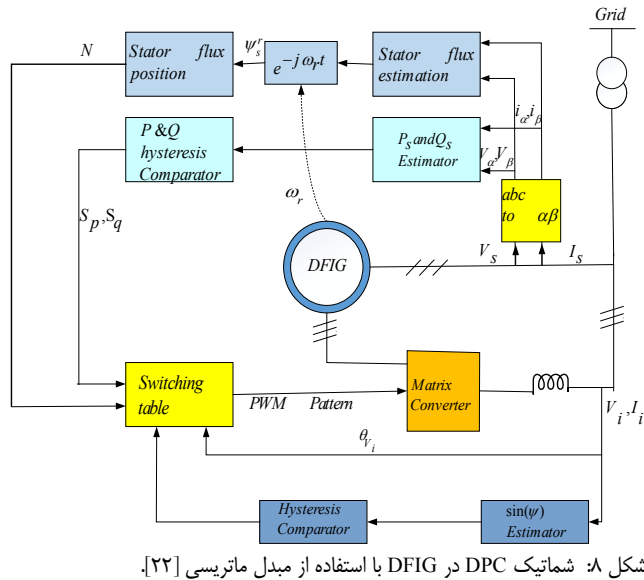
روش DPC با استفاده از مبدل ماتریسی یک ترتیب سوئیچ زنی مناسب برای کنترل توان اکتیو و راکتیو تحت محدودیت ضریب توان واحد انتخاب می‌شود. مقدار ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی خط به خط ارزیابی می‌شود؛ به عنوان مثال V_1 ، بردار ولتاژ خروجی VSI در روش DPC است. از شکل ۵ و جدول ۲ مشخص است که بردارهای ولتاژ (±۱, ±۲, ±۳) باید انتخاب شوند.

دو بردار کوچک نمی‌توانند برای روش DPC استفاده شوند که علت آن، تغییر علامت در میانه سکتور است. درجه آزادی برای کنترل ضریب توان ورودی استفاده می‌شود. اگر مقدار متوسط ولتاژ $\sin \psi$ نیاز به کاهشی باشد، باید بردار ولتاژ -۳ را انتخاب کرد؛ در مقابل اگر مقدار متوسط $\sin \psi$ افزایشی باشد، باید بردار ولتاژ +۱ انتخاب شود.

۲-۳ کنترل مستقیم توان در ژنراتور القایی تغذیه

دوسویه با استفاده از مبدل ماتریسی

استراتژی کنترل مستقیم توان در DFIG، روش مناسبی به دلیل کنترل



شکل ۷: شش سکتور بردارهای ولتاژ ورودی [۲۲].

شکل ۸: شماتیک DPC در DFIG با استفاده از مبدل ماتریسی [۲۲].

جدول ۳: سوئیچینگ مبدل ماتریسی [۲۲].

	سکتور ۱		سکتور ۲		سکتور ۳		سکتور ۴		سکتور ۵		سکتور ۶	
	+۱	-۱	+۱	-۱	+۱	-۱	+۱	-۱	+۱	-۱	+۱	-۱
V_1	-۳	۱	۲	-۳	-۱	۲	۳	-۱	-۲	۳	۱	-۲
V_2	۹	-۷	-۸	۹	۷	-۸	-۹	۷	۸	-۹	-۷	۸
V_3	-۶	۴	۵	-۶	-۴	۵	۶	-۴	-۵	۶	۴	-۵
V_4	۳	-۱	-۲	۳	۱	-۲	-۳	۱	۲	-۳	-۱	۲
V_5	-۹	۷	۸	-۹	-۷	۸	۹	-۷	-۸	۹	۷	-۸
V_6	۶	-۴	-۵	۶	۴	-۵	-۶	۴	۵	-۶	-۴	۵

اعوجاج در ولتاژ ورودی به خروجی منتقل می‌شود، این اعوجاج‌ها اثر نامطلوبی بر روی توان‌ها دارند که باعث افزایش هارمونیک‌ها و عملکرد نادرست سوئیچ‌ها می‌شوند. این مشکل را با ایجاد فیلتر در ورودی و خروجی مبدل ماتریسی می‌توان برطرف کرد. بنابراین طراحی فیلتر، مسأله مهمی می‌باشد و بهتر است فیلتری طراحی شود که ساختاری ساده، کمترین پیچیدگی و حداقل هزینه را داشته باشد و تلفات هارمونیک را کاهش دهد؛ بنابراین فیلتر پسیو گزینه مناسبی است و ویژگی‌های فوق را دارد. این فیلتر پسیو به صورت سری و موازی در ورود و خروج مبدل استفاده شده است. فیلتر سری از سلف و خازن و فیلتر موازی از فیلتر پسیو تک‌تنظیمی تشکیل شده است.

مبدل‌های الکترونیک قدرت، جریان و ولتاژ هارمونیک را تولید و به سیستم تزریق می‌کنند؛ بنابراین از فیلترهای هارمونیک موازی در سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود که باعث کاهش اعوجاج و هارمونیک ولتاژ و کاهش نوسانات توان‌ها می‌شوند.

فیلتر پسیو علاوه بر کاهش هارمونیک‌ها باعث اصلاح ضریب توان نیز می‌شود. ساختار فیلترهای پسیو یا غیرفعال از سلف، خازن و مقاومت تشکیل و به صورت سری و موازی یا هیبرید به یکدیگر متصل می‌شوند که برای کنترل هارمونیک‌های مورد نظر پیکربندی و تنظیم شده‌اند. مزیت اصلی آنها ارزانی و ساختار ساده است.

در شکل ۹ فیلتر پسیو مشاهده می‌شود که شامل یک فیلتر پسیو به صورت سری با سیستم و یک فیلتر پسیو تک‌تنظیمه است. فیلتر پسیو تک‌تنظیمه شامل مقاومت، خازن و سلف است که به صورت موازی به شبکه قدرت متصل شده و فیلتری که در ورودی مبدل قرار گرفته است، مؤلفه‌های فرکانس بالای جریان‌های ورودی مبدل ماتریسی را کاهش

خط به خط ارزیابی می‌شود. بردارهای جریان ورودی و ولتاژ خروجی اکتیو در یک مبدل ماتریسی سه‌فاز در شکل‌های ۵ و ۶ آمده‌اند [۲۲]. مقدار ولتاژ خروجی به ولتاژهای خط به خط ورودی وابسته است. شکل ۷ ولتاژهای ورودی خط به خط و شش سکتور را که به این بردارها تقسیم می‌شوند، نشان می‌دهد. شکل ۸ دیاگرام DPC در DFIG با استفاده از مبدل ماتریسی را نشان می‌دهد [۲۲]. بردار ولتاژ خروجی در روش DPC از شکل ۵ و جدول ۲ مشخص است که بردارهای ولتاژ $(\pm 1, \pm 2, \pm 3)$ باید انتخاب شوند.

در شکل ۷ در هر سکتور شش بردار ولتاژ وجود دارد. دو بردار کوچک در روش DPC به دلیل تغییر علامت در میانه سکتور نمی‌توانند استفاده شوند. اگر ولتاژ ورودی خنثی به خط در سکتور یک واقع باشد، از پیکربندی سوئیچینگ +۱ و -۳ می‌توان استفاده کرد. اگر مقدار متوسط $\sin \psi$ کاهشی باشد بردار ولتاژ -۳ باید انتخاب شود. در مقابل اگر مقدار متوسط $\sin \psi$ افزایشی باشد، بردار ولتاژ +۱ به کار برده می‌شود. جدول سوئیچینگ بهینه بر اساس نمونه ذکر شده برای به کارگیری بردار ولتاژ در جدول ۳ آمده است [۲۲]. ستون اول مربوط به بردارهای ولتاژ خروجی با روش DPC انتخاب می‌شوند. شش ستون دیگر شامل سکتورها که به بردارهای ولتاژ ورودی خنثی به خط واقع شده است. اگر مقدار متوسط $\sin \psi$ افزایشی (کاهشی) باشد، راست (چپ) زیرستون انتخاب می‌شود.

۳-۳ مدل‌سازی روش پیشنهادی جهت بهبود تلفات هارمونیک و کیفیت توان با استفاده از فیلتر پسیو هیبریدی

در مبدل ماتریسی به دلیل نبود لینک DC که هر گونه اختلال و



شکل ۱۱: فلوجارت مراحل انجام کار.

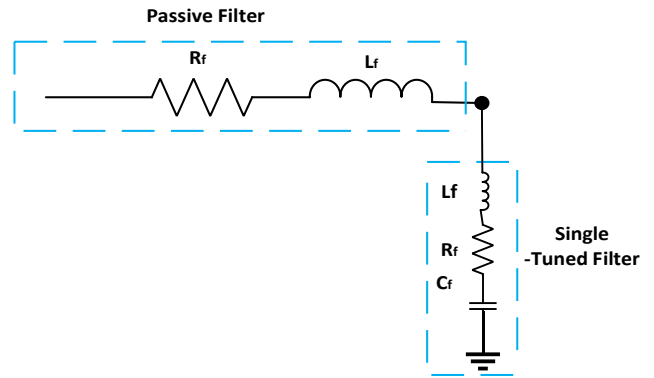
مرتب در مدار، از یک فیلتر پسیو تک‌تنظیمه با فرکانس تشدید برابر با فرکانس هارمونیک استفاده می‌شود که قصد حذف آن را داریم. در فیلتر پسیو تک‌تنظیمه در فرکانس هارمونیک مورد نظر، مدار فیلتر به حالت تشدید می‌رود، نتیجه امپدانس آن بسیار کوچک شده و سیگنال با فرکانس هارمونیک مورد نظر را به سمت زمین هدایت می‌کند و مانع از جاری شدن آن در سیستم قدرت می‌شود.

در شکل ۱۰ بلوک دیاگرام مبدل ماتریسی با حضور فیلتر و در شکل ۱۱ فلوجارتی از مراحل انجام کار را مشاهده می‌کنید.

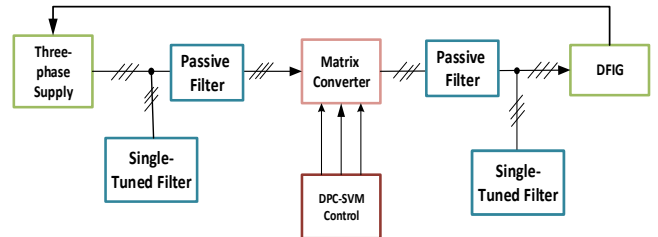
۴- نتایج و شبیه‌سازی

شبیه‌سازی بر اساس شکل ۸ انجام شده و شکل ۱۲ شبیه‌سازی سیستم را در محیط سیمولینک متلب نشان می‌دهد. پارامترهای DFIG ۲ مگاوات در جدول ۴ آمده و پهنای باند جبران‌ساز هیستریزس سه‌سطحی توان اکتیو و توان راکتیو برابر $\pm 4\%$ مقدار توان نامی ژنراتور یعنی ۲ مگاوات می‌باشد. در حالی که توربین، روتور DFIG را می‌چرخاند و مبدل طرف روتور غیرفعال است، استاتور DFIG تغذیه می‌گردد. این فرایند در شبیه‌سازی نشان داده نشده است.

در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود سرعت متغیر توربین در بازه زمانی ۱ تا ۱/۵ ثانیه از ۰/۸ پریونیت به ۱/۲ پریونیت می‌رسد.



شکل ۹: فیلتر پسیو هیبریدی.



شکل ۱۰: بلوک دیاگرام مبدل ماتریسی با حضور فیلتر در ورودی و خروجی مبدل سیستم.

جدول ۴: پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده DFIG. (ستون سمت راست حذف شد)

۲ MW	توان نامی
۶۹۰ V	ولتاژ استاتور
۰/۳	نسبت دوره‌های استاتور به روتور
۰/۰۱۰۸ Pu	مقاومت استاتور
۰/۰۱۲۱ Pu	مقاومت روتور
۳/۳۶۲ Pu	اندوکتانس مغناطیس‌شونده
۰/۱۰۲ Pu	اندوکتانس استاتور
۰/۱۱ Pu	اندوکتانس روتور
۲	تعداد قطب‌ها
۰/۵ S	اینرسی ثابت

می‌دهد و باعث کاهش اعوجاج جریان استاتور و روتور در مبدل ماتریسی می‌شود. وجود خازن می‌تواند به بهبود تلفات THD کمک کند.

فرکانسی در فیلتر پسیو تک‌تنظیمه وجود دارد که در این فرکانس، امپدانس خازن برابر امپدانس سلف بوده و امپدانس فیلتر صرفاً مقاومتی خواهد بود

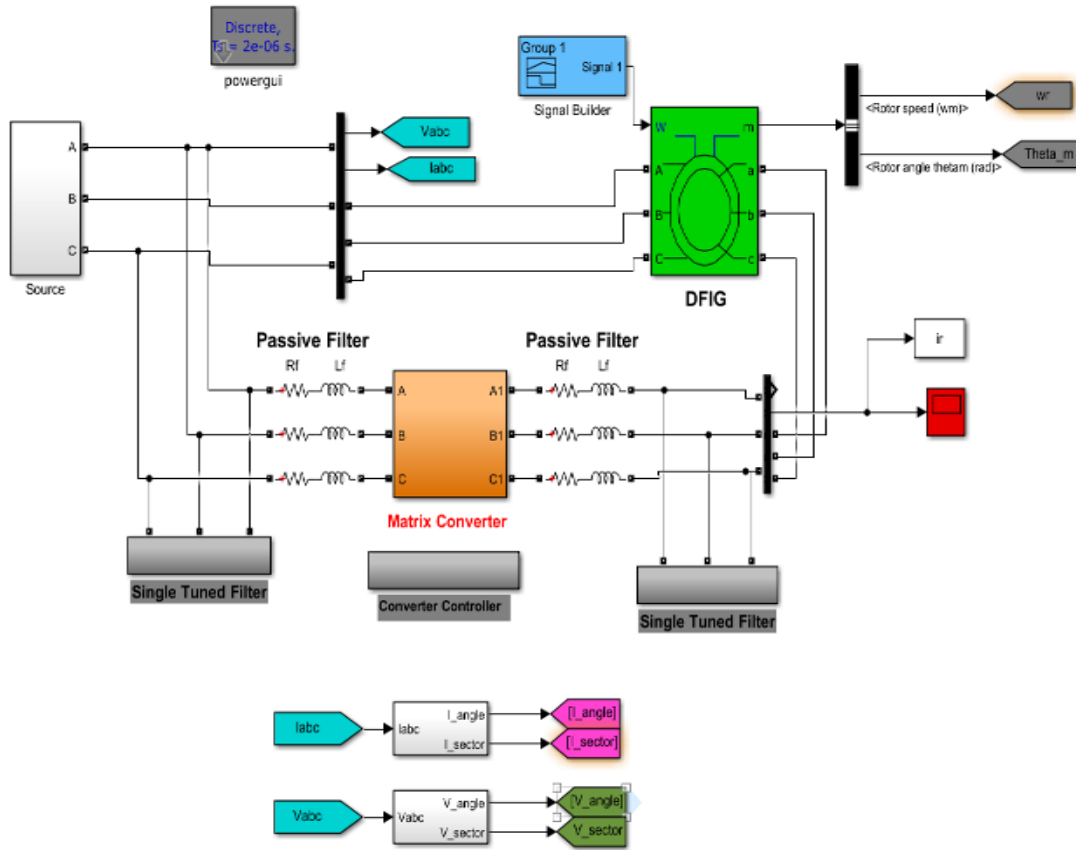
$$Z = R + j\omega_n L + \frac{1}{j\omega_n C} = R \quad (16)$$

که Z امپدانس فیلتر، R اندازه مقاومت، L اندوکتانس سلف، C ظرفیت خازن و ω_n فرکانس تشدید فیلتر پسیو قرار می‌گیرد فرکانس تشدید می‌گویند

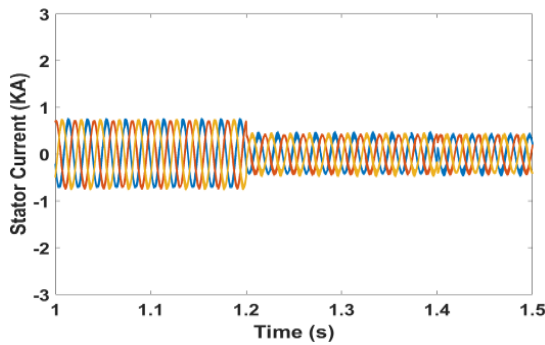
$$X_{Ln} = X_{Cn} \Rightarrow \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} \Rightarrow \omega_n = n\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (17)$$

که ω فرکانس نامی سیستم و X_{Ln} و X_{Cn} راکتانس سلفی و خازنی فیلتر در فرکانس تشدید هستند.

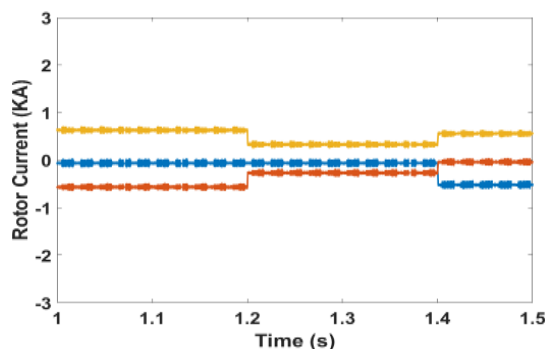
برای عملکرد مطلوب این فیلتر، نیاز به انتخاب دقیق مقادیر مقاومت، سلف و خازن می‌باشد تا در فرکانس هارمونیک معین عمل کرده و هارمونیک مربوطه را کاهش دهد. برای از بین بردن هارمونیک‌های هر



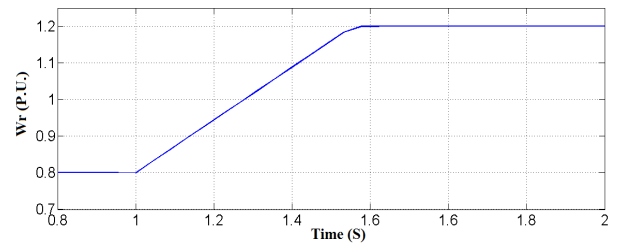
شکل ۱۲: بلوک دیاگرام سیستم در محیط سیمولینک متلب.



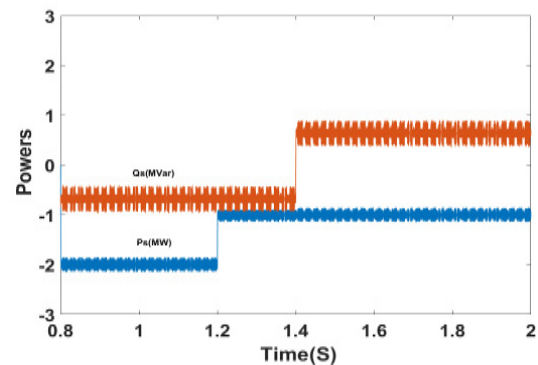
شکل ۱۵: جریان استاتور در سرعت سنکرون.



شکل ۱۶: جریان روتور در سرعت سنکرون.



شکل ۱۳: سرعت متغیر توربین.

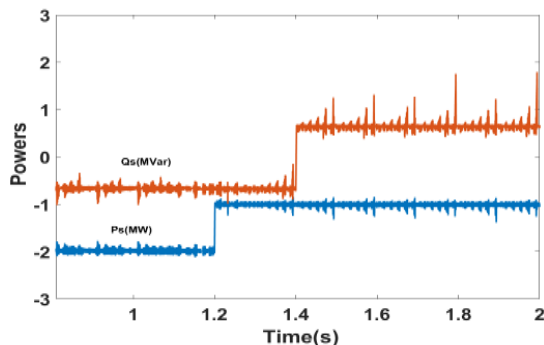


شکل ۱۴: توان‌های اکتیو و راکتیو کنترل مستقیم توان در DFIG با استفاده از مبدل ماتریسی.

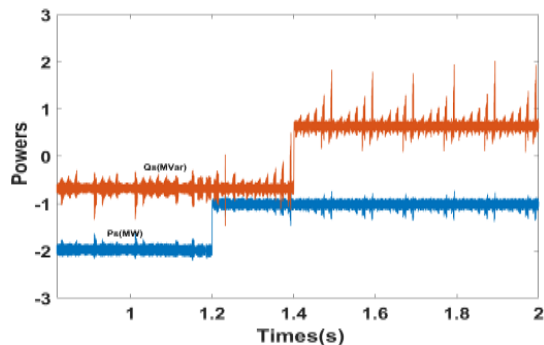
۴-۱ نتایج شبیه‌سازی در سرعت سنکرون بدون فیلتر

در شکل ۱۴ مقادیر توان اکتیو و راکتیو واقعی DFIG با استفاده از مبدل ماتریسی بدون فیلتر در سرعت سنکرون ۱ پریونیت آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود، توان‌های واقعی به خوبی مقادیر مرجع خود را دنبال نمودند. شکل‌های ۱۵ و ۱۶، شکل موج‌های جریان استاتور و روتور

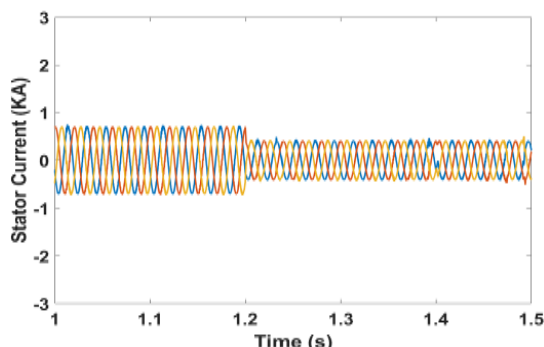
مبدل طرف روتور در لحظه ۰/۸ ثانیه فعال می‌گردد و سرعت سنکرون برابر با ۱ پریونیت در نظر گرفته می‌شود. فرض شده که مقدار مرجع توان در لحظه ۰/۸ ثانیه برای توان اکتیو ۲- مگاوات و برای توان راکتیو ۰/۶۶- مگاوار باشد. در لحظه ۱/۲ ثانیه مرجع توان اکتیو به ۱ MW- می‌رسد و مقدار مرجع توان راکتیو در لحظه ۱/۴ ثانیه از ۰/۶۶ MVAR- به ۰/۶۶ MVAR می‌رسد.



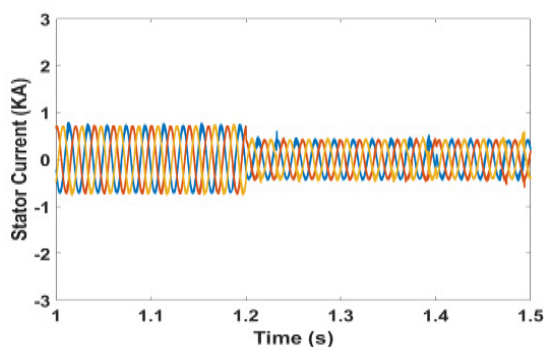
شکل ۱۷: توان‌های اکتیو راکتیو در سرعت متغیر توربین.



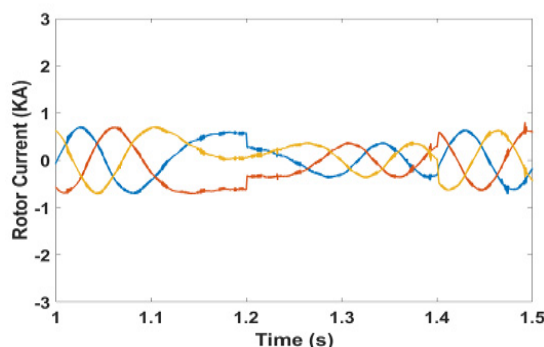
شکل ۱۸: جریان استاتور در سرعت متغیر توربین.



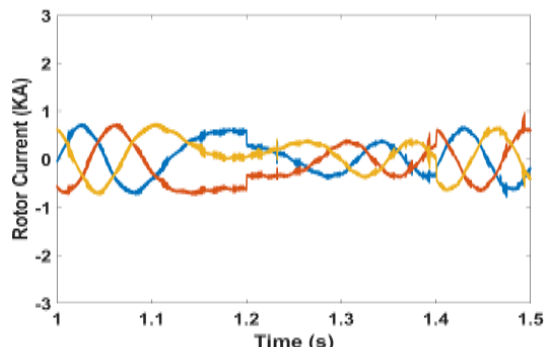
شکل ۱۹: جریان روتور در سرعت متغیر توربین.



شکل ۲۰: توان‌های اکتیو راکتیو در سرعت متغیر توربین.



شکل ۲۱: جریان استاتور با حضور فیلتر در سرعت متغیر توربین.



شکل ۲۲: جریان روتور با حضور فیلتر در سرعت متغیر توربین.

را با استفاده از مبدل ماتریسی در سرعت متغیر توربین با استفاده از فیلتر پسو نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود با وجود فیلتر در سرعت متغیر توربین، توان‌های اکتیو و راکتیو به خوبی مقادیر مرجع را دنبال می‌کنند و پاسخ دینامیکی سریعی دارند و جریان‌های استاتور و روتور شکل موج‌های سینوسی هستند. فیلتر باعث کاهش ریبیل توان‌های اکتیو و راکتیو و هارمونیک جریان‌های استاتور و روتور می‌شود. با مقایسه شکل‌های ۲۳ تا ۲۶ به خوبی مشاهده می‌شود فیلتر باعث کاهش ریبیل توان‌ها می‌شود.

۴-۴ تحلیل FFT با فیلتر پسو

شکل‌های ۲۷ تا ۳۰، آنالیز تحلیل FFT را نشان می‌دهند. آنالیز تحلیل FFT جریان استاتور بدون فیلتر و با فیلتر در مبدل ماتریسی در سرعت متغیر توربین از ۰/۸ ثانیه تا ۵ سیکل در شکل‌های ۲۷ و ۲۸ در نظر گرفته شده که THD با استفاده از فیلتر مقدار کمتری را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۲۹ و ۳۰ آنالیز تحلیل FFT جریان روتور بدون فیلتر و با فیلتر در سرعت متغیر توربین بررسی THD از ۰/۸ ثانیه تا ۲ سیکل در نظر گرفته شده که THD با استفاده از فیلتر مقدار کمتری را نشان می‌دهد. در جدول ۵ مقایسه مقدار THD جریان‌های استاتور و روتور را بدون فیلتر و با استفاده از فیلتر برحسب درصد مشاهده می‌کنید. THD تا مرتبه

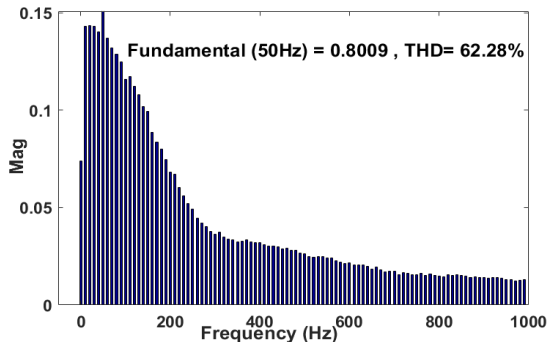
را با استراتژی کنترل مستقیم توان در DFIG با استفاده از مبدل ماتریسی بدون فیلتر در سرعت سنکرون یک پریونیت نشان می‌دهند. همان طور که دیده می‌شود، جریان‌های استاتور و روتور شکل موج سینوسی دارند.

۴-۲ نتایج شبیه‌سازی در سرعت متغیر توربین بدون فیلتر

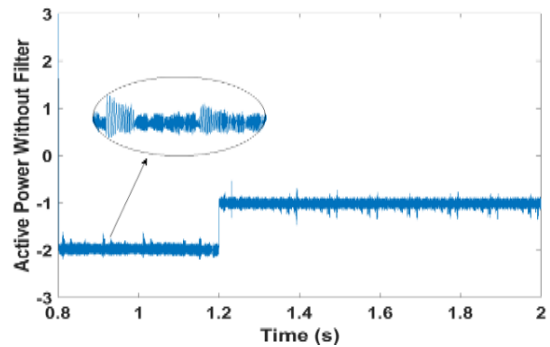
شکل ۱۷ نتایج شبیه‌سازی کنترل مستقیم توان در DFIG را با استفاده از مبدل ماتریسی در سرعت متغیر توربین بدون فیلتر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با وجود سرعت متغیر توربین، توان‌های اکتیو و راکتیو به خوبی مقادیر مرجع را دنبال می‌کنند و پاسخ دینامیکی سریعی دارند. در شکل‌های ۱۸ و ۱۹، شکل موج‌های جریان استاتور و روتور را با استراتژی کنترل مستقیم توان در DFIG با استفاده از مبدل ماتریسی بدون فیلتر در سرعت متغیر توربین مشاهده می‌کنید. جریان‌های استاتور و روتور دارای شکل موج‌های سینوسی هستند.

۴-۳ نتایج شبیه‌سازی در سرعت متغیر توربین با استفاده از فیلتر پسو

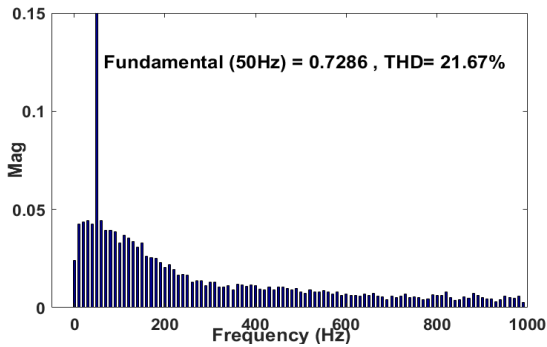
شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ نتایج شبیه‌سازی کنترل مستقیم توان در DFIG



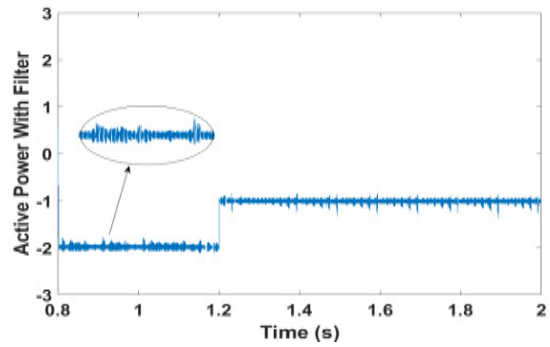
شکل ۲۷: جریان استاتور بدون فیلتر.



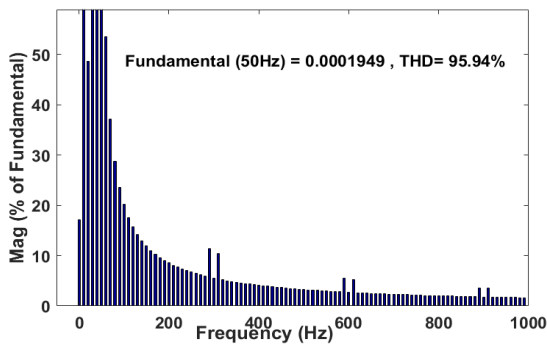
شکل ۲۳: توان اکتیو بدون فیلتر در سرعت متغیر توربین.



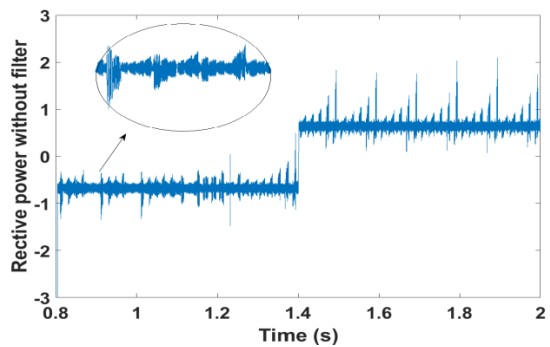
شکل ۲۸: جریان استاتور با استفاده از فیلتر.



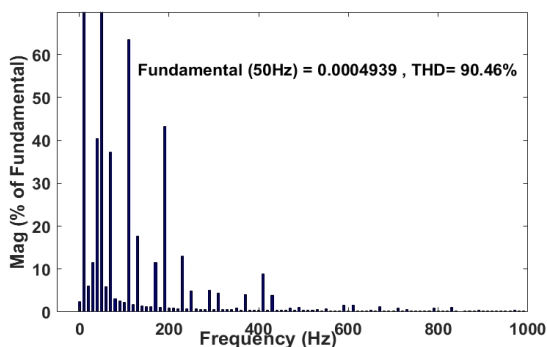
شکل ۲۴: توان اکتیو با حضور فیلتر در سرعت متغیر توربین.



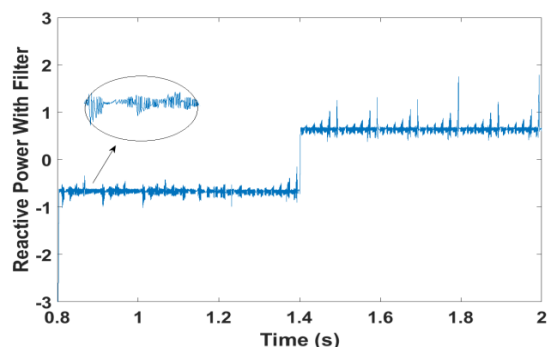
شکل ۲۹: جریان روتور بدون فیلتر.



شکل ۲۵: توان راکتیو بدون فیلتر در سرعت متغیر توربین.



شکل ۳۰: جریان روتور با استفاده از روتور.



شکل ۲۶: توان راکتیو با حضور فیلتر در سرعت متغیر توربین.

در (۱۸) مشاهده می‌کنید. هارمونیک‌ها از مرتبه دو به بعد فرکانس اصلی نیست بلکه اعوجاج است. هرچه هارمونیک‌ها بالاتر روند THD به مراتب افزایش می‌یابد و افزایش THD نشان می‌دهد که شکل موج از حالت فرکانس اصلی دور شده است

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (18)$$

جدول ۵: مقایسه مقدار THD فیلتر پسیو و بدون فیلتر در مبدل ماتریسی.

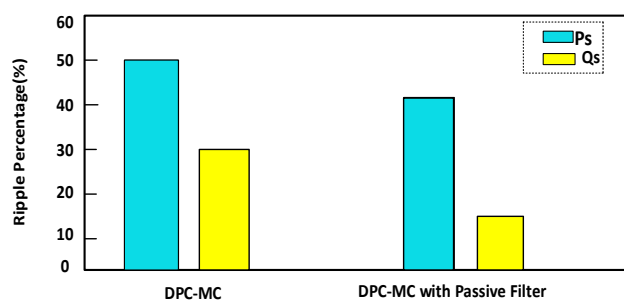
THD%	جریان استاتور	جریان روتور
بدون فیلتر	۶۲٫۲۸٪	۹۵٫۹۴٪
فیلتر پسیو	۱۲٫۶۷٪	۹۰٫۴۶٪

۲۰ از مؤلفه‌ها در نظر گرفته شده است. مجموع اغتشاش هارمونیک‌های جریان (THD)، نسبت مقدار مؤثر مؤلفه‌های هارمونیک‌های یک شکل موج به مقدار مؤثر مؤلفه اصلی است که

راکتیو و به دست آوردن مقدار ثابت توان است و نهایتاً شکل موج‌های سینوسی جریان بررسی شد. شاخصه مهمی که برای تشخیص و ارزیابی فیلتر هیبریدی ورودی و خروجی مبدل ماتریسی مورد توجه قرار می‌گیرد، به منظور کاهش ریبیل توان‌ها و میزان کاهش THD جریان‌های استاتور و روتور و افزایش کیفیت توان است که نتایج مقایسه در جدول ۵ مشاهده شد که میزان کاهش THD فیلتر پسیو نسبت به حالت بدون فیلتر است.

مراجع

- [1] S. Sharma and V. K. Tayal, "Optimised controller design for frequency control of a wind turbine driven doubly fed induction generator," *International J. of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 7197-7206, 2022.
- [2] A. Soyed, A. Kadri, O. Hasnaoui, and F. Bacha, "Direct power and voltage oriented control strategies of grid-connected wind energy conversion system based on permanent magnet synchronous generator," *Cybernetics and Systems*, vol. 53, no. 1, pp. 103-125, 2022.
- [3] S. A. Mohd-Shafri, et al., "Optimal design of SMPMSM using genetic algorithm based on finite element model," in Proc. of the 11th Int. Conf. on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications: Enhancing Research and Innovation through the 4th Industrial Revolution, pp. 721-726, Penang, Malaysia, 5-6 Apr. 2022.
- [4] Z. J. Andaloussi, A. Raihani, A. Elmagri, and R. Lajouad, "Toward the optimization of a pmsg wind energy conversion system on-grid by a robust mixed controller," in *Proc Int. Conf. on Energy and Green Computing.*, vol. 336, Article ID: 00043, 8 pp., Meknes, Morocco 9-10 Dec. 2021.
- [5] M. Basic, M. Bubalo, D. Vukadinovic, and I. Grgic, "Sensorless maximum power control of a stand-alone squirrel-cage induction generator driven by a variable-speed wind turbine," *J. of Electrical Engineering & Technology*, vol. 16, pp. 333-347, 2021.
- [6] A. Munteanu, "Fault tolerant fractional-slot concentrated-wound permanent magnet synchronous motor with redundancy for critical applications," in *Proc. Int. Conf. on Electromechanical and Energy System*, 5 pp., Iasi, Romania, 6-8 Oct. 2021.
- [7] P. S. Flannery and G. Venkataramanan, "A Grid Fault Tolerant Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine via Series Connected Grid Side Converter," arXiv preprint arXiv:2201.08879, Jan. 2022.
- [8] I. Khan, et al., "Dynamic modeling and robust controllers design for doubly fed induction generator-based wind turbines under unbalanced grid fault conditions," *Energies*, vol. 12, no. 3, Article ID: 0454, 2019.
- [9] K. Kerrouche, A. Mezouar, and K. Belgacem, "Decoupled control of doubly fed induction generator by vector control for wind energy conversion system," *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 239-248, 2013.
- [10] A. Yousefi-Talouki, S. A. Gholamian, M. Yousefi-Talouki, and M. Yazdani-Asrami, "A new direct power control of doubly-fed induction generator using matrix converter," *Australian J. of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 307-320, Jan. 2013.
- [11] I. Yaichi, A. Semmah, P. Wira, and S. M. El-Amine, "An improved direct power control based on SVM strategy of the doubly fed induction generator," in *Proc. 7th Int. Renewable and Sustainable Energy Conf.*, 8 pp., Agadir, Morocco, 27-30 Nov. 2019.
- [12] A. Yousefi-Talouki, S. Zalzar, and E. Poursmaeil, "Direct power control of matrix converter-fed DFIG with fixed switching frequency," *Sustainability*, vol. 11, no. 9, Article ID: 2604, May 2019.
- [13] A. Mishra and K. Chatterjee, "Harmonic analysis and attenuation using LCL-filter in doubly fed induction generator based wind conversion system using real time simulation based OPAL-RT," *Alexandria Engineering J.*, vol. 61, no. 5, pp. 3773-3792, May 2022.
- [14] C. Chhabra, et al., "Grid integration of doubly-fed induction machine using indirect field oriented control," *J. of Information and Optimization Sciences*, vol. 43, no. 1, pp. 219-223, 2022.
- [15] A. Dida, F. Merahi, and S. Mekhilef, "New grid synchronization and power control scheme of doubly-fed induction generator based wind turbine system using fuzzy logic control," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 48, Article ID: 106647, Jun. 2020.
- [16] F. Mazouz, S. Belkacem, I. Colak, S. Drid, and Y. Harbouche, "Adaptive direct power control for double fed induction generator used in wind turbine," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 114, Article ID: 105395, Jan. 2020.



شکل ۳۱: مقایسه ریبیل توان‌ها.

۵- مقایسه و نتایج

در این مقاله از کنترل مستقیم توان در ژنراتور القایی تغذیه دوسویه با استفاده از مبدل ماتریسی استفاده شده است. استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت به دلیل سوئیچینگ، باعث هارمونیک و اعوجاج جریان‌های استاتور و روتور می‌شود. از طرفی استفاده از مبدل ماتریسی به دلیل آنکه فاقد خازن لینک DC است، هر گونه اغتشاش را از ورودی به خروجی منتقل می‌کند و باعث هارمونیک و ریبیل توان‌های اکتیو و راکتیو می‌شود. در این مقاله از فیلتر پسیو هیبریدی به دلیل ارزان و ساختار ساده استفاده شده که نهایتاً باعث بهبود تلفات هارمونیک و ریبیل کمتر توان‌ها گردیده است. در جدول ۵ دیده شد که استفاده از فیلتر باعث حداقل شدن هارمونیک جریان‌ها و بهبود کیفیت توان می‌شود.

مقایسه ریبیل توان‌های اکتیو و راکتیو بدون فیلتر و با فیلتر را در شکل ۳۱ مشاهده می‌کنید که استفاده از فیلتر باعث کاهش ریبیل توان‌ها و عملکرد خوب سیستم شده است.

روش پیشنهادی این مقاله، استفاده از فیلتر پسیو هیبریدی است که باعث حداقل شدن نوسانات توان اکتیو و راکتیو سیستم می‌شود که در مقایسه با [۱۲] از تکنیک کنترل مستقیم توان در ژنراتور القایی تغذیه دوسویه در مبدل ماتریسی پیشنهاد شده است. توان‌های اکتیو و راکتیو در فرکانس سوئیچینگ ثابت با استفاده از تکنیک مدولاسیون بردار فضایی غیرمستقیم (ISVM) تنظیم می‌شوند؛ با وجود این، توان‌ها دارای ریبیل هستند و نیز با کنترل نادرست باعث اعوجاج جریان‌ها می‌شوند.

در [۲] از مبدل ماتریسی برای ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم استفاده شده که توان راکتیو دارای نوسانات زیاد و جریان استاتور دارای اعوجاج است؛ اما در این مقاله علاوه بر اینکه باعث کاهش نوسانات تزریق توان‌ها شده و دارای حداقل THD جریان‌ها می‌شود.

در [۱۳] ژنراتور توان بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تغذیه دوسویه با استفاده از مبدل Back-to-Back و فیلتر LCL در هر دو طرف مبدل سمت شبکه و روتور طراحی شده است. وجود فیلتر باعث ریبیل توان‌ها شده و بنابراین روش مورد استفاده در این مقاله، علاوه بر آنکه باعث کاهش نوسانات تزریق توان‌ها شده، باعث حداقل شدن THD جریان‌ها نیز شده است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، استراتژی کنترل DPC برای DFIG با استفاده از مبدل ماتریسی پیشنهاد شد و برای بهبود تلفات THD از فیلتر پسیو هیبریدی در ورودی و خروجی مبدل ماتریسی استفاده گردید. سپس با استفاده از این روش پیشنهادی، دو حالت سرعت سنکرون و سرعت متغیر توربین (بدون فیلتر و با استفاده از فیلتر) مقایسه گردید. استراتژی DPC، استفاده از مبدل ماتریسی در زمینه‌های کاهش نوسانات تزریق توان‌های اکتیو و

ندا قادری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی برق الکترونیک و کارشناسی ارشد برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۶ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد ملایر و دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی، کنترل هوشمند، ادوات FACTS، سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی، انتقال توان بی‌سیم، مدل‌سازی و کیفیت توان.

هدی نادری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی برق مخابرات و کارشناسی ارشد برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۵ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد بروجرد و دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: انرژی‌های نو و تجدیدپذیر، میکروگرید، کنترل، ماشین‌های الکتریکی، شبکه هوشمند، ذخیره‌کننده‌های انرژی و سیستم مدیریت باتری، بهینه‌سازی، سیستم قدرت و الکترونیک قدرت.

محمد عابدینی در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را به ترتیب از دانشگاه آزاد اسلامی و دانشگاه بوعلی سینا دریافت نمود. از سال ۱۳۹۲ در دانشگاه بوعلی سینا همدان به عنوان دانشجوی دکتری مشغول به فعالیت گردید و در سال ۱۳۹۴ فارغ‌التحصیل گردید. دکتر عابدینی در سال ۱۳۹۵ در دانشگاه آیت‌الله بروجردی در گروه برق مشغول فعالیت شد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند انرژی‌های نو، ریزشبکه، مدل‌سازی و کنترل نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و منابع تولید پراکنده، بهینه‌سازی و هوش مصنوعی می‌باشد.

محمد حسن مرادی در سال‌های ۱۳۶۹ و ۱۳۷۲ مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را به ترتیب از دانشگاه صنعتی شریف و دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. از سال ۱۳۷۲ در گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا همدان به عنوان عضو هیأت علمی مشغول به فعالیت گردید. ایشان در سال ۱۳۷۷ به دوره دکتری مهندسی برق در دانشگاه استراسکالاید در گلاسکو اسکاتلند وارد گردید و در سال ۱۳۸۱ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند انرژی‌های نو، ریزشبکه، مدل‌سازی و کنترل نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و فرایندهای صنعتی، کیفیت توان و اتوماسیون و هوش مصنوعی می‌باشد.

- [17] E. Reyes, R. Pena, R. Cardenas, J. Clare, and P. Wheeler, "Control of a doubly-fed induction generator with an indirect matrix converter with changing DC voltage," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics*, pp. 1230-1235, Bari, Italy 4-7 Jul. 2010.
- [18] C. Klumpner, I. Boldea, F. Blaabjerg, "The matrix converter: overvoltages caused by the input filter, bidirectional power flow, and control for artificial loading of induction motors," *Electric Machines & Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 129-142, Feb. 2000.
- [19] J. Tavoosi, et al., "A machine learning approach for active/reactive power control of grid-connected doubly-fed induction generators," *Ain Shams Engineering J.*, no. 2, Article ID: 101564, Mar. 2022.
- [20] P. P. Pradhan, B. Subudhi, and A. Ghosh, "A robust multiloop disturbance rejection controller for a doubly fed induction generator-based wind energy conversion system," *IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 5, pp. 6266-6273, Mar. 2022.
- [21] Y. Sahri, et al., "New intelligent direct power control of DFIG-based wind conversion system by using machine learning under variations of all operating and compensation modes," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 6394-6412, Nov. 2021.
- [22] A. Yousefi-Talouki and M. Negnevitsky, "Direct power control of matrix converter-fed doubly fed induction generator," in *Proc. Australasian Universities Power Engineering Conf.*, 6 pp., Hobart, Australia, 29 Sept.-3 Oct. 2013.
- [23] D. Li, X. Deng, C. Li, X. Zhang, and E. Fang, "Study on the space vector modulation strategy of matrix converter under abnormal input condition," *Alexandria Engineering J.*, vol. 61, no. 6, pp. 4595-4605, Jun. 2022.
- [24] M. A. Beniss, H. El Moussaoui, T. Lamhamdi, and H. El Markhi, "Performance analysis and enhancement of direct power control of DFIG based wind system," *International J. of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 1034-1044, Jun. 2021.