

Dynamic Modeling and Simulation of Cross Flux Permanent Magnet Generator and its Application in Wind Turbines

Mahmoud Zadehbagheri¹, Assistant Professor, Vahdat Nazerian², Assistant Professor

¹ Department of Electrical Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran

² Department of Electrical Engineering, Mazandaran University, Babolsar, Iran

Abstract:

Machines with permanent magnet excitation have higher efficiency and more reliability than machines with electric excitation. Among the permanent magnet machines, the crossover machines have a higher ratio of power to volume and electric torque to volume, so that at the same power, their size is smaller than the usual permanent magnet machines. And this is the reason why researchers have paid attention to crossover machines in recent years. Cross-phase generators can be made with a smaller pole pitch than other machines. These features make these machines have a higher power density than other permanent magnet machines. The copper winding of the crossover generators is simple, and their passive copper winding is considerably less than other machines, so the mass of active materials required to produce power and electric torque can be less than other machines. In other words, a smaller volume of active materials per unit of electric torque can be obtained by these machines. Therefore, this generator creates high power and torque by creating a large number of poles and a small pole pitch, and it can be a suitable option for use in the production of electrical energy from wind power, especially at low wind speeds. The lack of a suitable dynamic model and the application of this generator, dynamic modeling and simulation, are necessary to analyze its performance under different conditions. Therefore, this article presents a dynamic model for this generator to be connected to the wind turbine, and then simulates the wind turbine based on this generator by simulating the turbine-generator system.

Keywords: Dynamic Modeling, Permanent Magnet Synchronous Machines, Cross-Flux Machines, Wind Turbines.

Received: 15 August 2022

Revised: 19 September 2022

Accepted: 24 October 2022

Corresponding Author: Dr. Mahmoud Zadehbagheri, Ma.zadehbagheri@iau.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1966753.1035>



مدل سازی و شبیه سازی دینامیکی ژنراتور آهنربای دائم شارمتقاطع و کاربرد آن در توربین های بادی

محمود زاده باقری^۱، استادیار، وحدت ناظریان^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، کهگیلویه و بویراحمد، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه مازندران، بابلسر، مازندران، ایران

چکیده: ماشین های با تحریک آهنربای دائم دارای بازده بالاتر و قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به ماشین های با تحریک الکتریکی می باشند. در میان ماشین های آهنربای دائم، ماشین های شارمتقاطع نسبت توان به حجم و گشتاور الکتریکی به حجم بالاتری دارند، بطوریکه در توان های یکسان سائز آن ها از ماشین های معمول آهنربای دائم کوچک تر است، و این، دلیل توجه محققان به ماشین های شارمتقاطع در سال های اخیر است. مولدهای شارمتقاطع می توانند با گام قطب کوچک تری، نسبت به دیگر ماشین ها ساخته شوند. این ویژگی ها باعث می شوند که این ماشین ها، چگالی نیروی بالاتری نسبت به دیگر ماشین های آهنربای دائمی داشته باشند. سیم پیچی مسی مولدهای شارمتقاطع ساده است و سیم پیچی مسی غیرفعال آن ها به صورت فراوانی نسبت به دیگر ماشین ها کمتر است، بنابراین جرم مواد فعال برای تولید توان و گشتاور الکتریکی مورد نیاز، می تواند کمتر از دیگر ماشین ها باشد. به عبارتی دیگر، حجم کوچک تر مواد فعال به واحد گشتاور الکتریکی را توسط این ماشین ها می توان به دست آورد. بنابراین این مولد با ایجاد تعداد قطب زیاد و گام قطب کوچک ایجاد توان و گشتاور بالایی می کند، و می تواند گزینه مناسبی برای استفاده در تولید انرژی الکتریکی از نیروی باد، به خصوص در سرعت های کم باد باشد. نبود مدل دینامیکی مناسب و کاربرد این مولد، مدل سازی و شبیه سازی دینامیکی، برای تحلیل عملکرد آن تحت شرایط مختلف ضروری است. بنابراین، این مقاله یک مدل دینامیکی برای این مولد جهت اتصال به توربین بادی ارائه نموده، سپس با شبیه سازی سیستم توربین-ژنراتور به شبیه سازی توربین بادی بر اساس این مولد پرداخته است.

واژه های کلیدی: مدل سازی دینامیکی، ماشین های سنکرون آهنربای دائمی، شار متقاطع، توربین های بادی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۲۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲

نویسنده ی مسئول: دکتر محمود زاده باقری، Ma.zadehbagheri@iau.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1966753.1035>





۱- مقدمه

اخیراً، انرژی‌های تجدید پذیر با توجه به فاکتورهای مختلفی از قبیل؛ عوامل زیست‌محیطی مانند آلودگی هوا و گرمای روزافزون کره زمین با استفاده از سوخت‌های آلاینده، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. علیرغم این فاکتورهای اصلی، استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر می‌تواند به کوچک کردن ابعاد واحدهای تولید توان و ازدیاد واحدهای تولید پراکنده، نزدیک بودن واحدهای تولید و مصرف توان الکتریکی و در نتیجه کاهش تلفات و افزایش بازده و... نام برد. در این میان نیروگاه‌های بادی و سیستم‌های توربین-ژنراتور که به وسیله انرژی باد عمل می‌کنند و انرژی الکتریکی تولید می‌کنند از مهم‌ترین و پرکاربردترین انرژی‌های تجدید پذیر است که بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با پیشرفت تکنولوژی، پیشرفت‌های زیادی در تمامی این زیرمجموعه‌ها انجام گرفته و ادوات مختلف الکترونیک قدرت؛ مولدهای متفاوت و سیستم‌های کنترلی متفاوت ارائه شده است. در همین راستا، با پیشرفت علم مواد به ماشین‌های آهنربای دائم توجه فراوانی شده است و از آن‌ها در سیستم‌های توربین-ژنراتور بدون جعبه‌دنده مورد استفاده قرار گرفته است. با شروع انقلاب صنعتی، موتورهای که از انرژی حاصل از اشتعال سوخت فسیلی استفاده می‌کردند، جایگزین نیروی باد شدند تا به این ترتیب منبع توان باثبات‌تری در دسترس صنایع روبه گسترش قرار گیرد. در اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی با اولین شوک شدید قیمت نفت به بازار، باری دیگر انرژی باد مورد توجه قرار گرفت [۱]. هرچند این بار برخلاف تجربه‌های پیشین تمرکز برای تولید توان الکتریکی بود و نه توان مکانیکی. به این ترتیب امکان تأمین منبع جایگزین و کم‌هزینه‌ای با استفاده از فناوری‌های جدید در شبکه الکتریکی به عنوان ذخیره‌ای با قابلیت اعتماد بالا به وجود آمد. گرایش شدید به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر، به خصوص در زمینه انرژی بادی و انرژی خورشیدی، مطالعه و به‌روز سازی اجزای مختلف سیستم قدرت را می‌طلبد. مولدها و ادوات الکترونیک قدرت بعضی از این اجزای تشکیل‌دهنده سیستم قدرت در امر تولید توان هست. گرچه انواع مختلف مولد و مبدل‌ها در سیستم‌های بادی به کار گرفته می‌شوند، اما بهره‌وری حداکثر، تلفات پایین، کیفیت توان تحویلی به شبکه و سیستم‌های کنترلی کم‌هزینه، موارد مهمی در انتخاب مولد و مبدل‌های الکترونیک قدرت برای این امر هست. ظهور مجدد ماشین‌های آهنربای دائم به خصوص ماشین‌های شارمقاطع، ضمن حذف هزینه‌های اضافی استفاده از جعبه‌دنده، قابلیت تولید توان در سرعت‌های باد متفاوت را از طریق کوپل مستقیم مولد به توربین، ممکن ساخته است. خلاصه برآیند مطالعات در شاخه تولید توان از انرژی بادی به موضوعات، بررسی‌های جداگانه مدل‌های طراحی، مدل‌های ریاضی و مداری، تقویت و تبدیلات متوالی انرژی و جریان به صورت AC/DC/AC تقسیم می‌شوند [۲-۱]. بطوریکه در تمامی این زمینه‌ها فناوری جدیدی ارائه شده است. مولدهای سنکرون آهنربای دائم (PMSGs¹) دارای ویژگی‌هایی از قبیل: چگالی توان بالا، قابلیت داشتن تعداد قطب‌های زیاد و بازده بالا و... می‌باشند. بنابراین، این خانواده از ماشین‌ها، بسیار مورد توجه در کاربردهای توربین بادی می‌باشند [۳]. جدیدترین نمونه از خانواده این مولدها که در تولید انرژی الکتریکی از انرژی باد (WECSs²) در سرعت‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مولدهای (AFPMs³) می‌باشند [۴]. عضوی دیگر از خانواده ماشین‌های PM ماشین‌های شارمقاطع می‌باشند، که مطالعات زیادی بر روی ساختارهای متفاوت و بهبود ساختارهای موجود آن صورت پذیرفته است. البته بیشتر مطالعات صورت گرفته در زمینه بررسی ساختاری ماشین برای کاربرد در توربین بادی پرداخت شده است [۵-۴]. شبیه‌سازی توربین‌های بادی بوسیله نرم‌افزار، ابزار تحقیق در بررسی رفتار توربین‌های بادی است. محدودیت‌های نرم‌افزاری و شرایط کاملاً مجازی بررسی پدیده‌ها، سبب ایجاد اختلاف در نتایج شبیه‌سازی با شرایط واقعی می‌گردد. افزایش پارامترهای شبیه‌سازی و در نظر گرفتن هرچه بیشتر جزئیات سیستم، سبب افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها و در عین حال افزایش زمان شبیه‌سازی می‌گردد. بنابراین ارائه مدلی بسیار دقیق، که به سادگی بتوان برای مطالعات مختلف آنرا تغییر داد تا با کمترین زمان و بیشترین دقت مورد نیاز، به شبیه‌سازی رفتار توربین بادی بپردازد، ضروری است. از مهمترین مسائلی که امروزه در ارتباط با توربین‌ها و مزارع بادی در شبکه‌های موجود مورد توجه می‌باشد، قابلیت اطمینان توان بدست آمده (از لحاظ پایداری سیستم) و تاثیر مزارع بادی بر کیفیت توان می‌باشد. هرچند تعیین موقعیت مزارع بادی با توجه به ویژگی‌های بادی محل می‌باشد، اما قدرت شبکه در محل اتصال مزارع بادی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. امروزه با بروز خطا در شبکه، توربین‌های بادی از شبکه جدا شده و تحویل کل توان به منابع معمول واگذار می‌شود که به سبب نقش کم مزارع بادی در کل تولید، مشکل ساز نیست. اما با افزایش سهم توربین‌های بادی در تولید، این کار به سادگی میسر نخواهد بود. از سوی دیگر فلیکر ولتاژ در محل مصرف‌کننده‌هایی که نزدیک به مزارع تولید انرژی الکتریکی از باد هستند، مشاهده می‌شود که این مشکل نیز با افزایش سهم مزارع بادی افزایش می‌یابد. در این کار، مدل الکترومکانیکی دقیقی از توربین بادی ارائه شده است. مدل‌های متداولی که بطور گسترده برای توربین‌های بادی استفاده می‌شود،



به سبب صرفنظر کردن از برهم کنش‌های مکانیکی و مکانیکی آیرودینامیکی و نوسانات توان ناشی از آنها منجر به پاسخ‌های ناصحیح در مطالعات کیفیت توان می‌شود. از سوی دیگر این مدل‌ها کل عناصر متحرک توربین بادی را کاملاً صلب در نظر گرفته و بصورت جرم واحد دوار می‌کنند. مدل ژنراتور نیز یک مدل ساده دینامیکی است و مسلماً نتایج دقیقی در پی نخواهند داشت [۶]. در حال حاضر دو انستیتوی معتبر تحقیقاتی در دنیا در حال کار بر روی مدل‌های دقیق توربین‌های بادی هستند. گروه اول به سرپرستی Nielsen, Knudsen در موسسه تحقیقاتی NESAs و دانشگاه تکنولوژی دانمارک از سال ۱۹۹۹ مشغول این فعالیت هستند. گروه دوم در آزمایشگاه‌های RISO و به سرپرستی Sorensen و Hansen در سالهای اخیر مدل‌هایی از توربین بادی ارائه داده‌اند. معایبی که به کار گروه اول وارد است عبارتند از: هیچ کاری بر روی مدلسازی باد و تاثیر اغتشاشات باد بر عملکرد دینامیکی توربین بادی انجام نشده است. - اثر بهره آیرودینامیکی (Cp) لحاظ نشده است. - مدل مناسبی برای آیرودینامیک پرها ارائه نشده است. - مدل مناسبی برای محور و drive train ارائه نشده است. کار گروه دوم نیز دارای کاستی‌هایی می‌باشد که عبارتند از: پدیده‌های فیزیکی مربوط به مکانیک و آیرودینامیک پرها و Drive train در مدل باد اعمالی به توربین آورده شده است که مسلماً فیزیکی و در انطباق با واقعیت نیست [۷]. در واقع به جای یک مدل فیزیکی، مدلی بلوکی از کل توربین بادی بدست آمده است که درک مفاهیم فیزیکی و واقعی را غیرممکن می‌کند. بعلاوه تنها دو هارمونیک ناشی از این اغتشاشات بوسیله مدل شبیه‌سازی می‌شوند که منجر به نتایج خوش‌بینانه‌ای در مطالعات کیفیت توان می‌شود- امکان اعمال مدل دینامیکی دلخواه برای باد به عنوان یک ورودی کاملاً تصادفی امکان پذیر نیست. - از برهم کنش آیرودینامیکی باد و پرها صرفنظر شده است- مدل شفت به کار رفته خیلی دقیق نیست و تقریب دو جرم متمرکز دوار که بوسیله یک محور صلب ایده‌آل بهم متصل‌اند، سبب حصول نتایج خوش‌بینانه‌ای در مطالعات پایداری می‌شود. در بدست آوردن مدل ارائه شده، تمام سعی بر این بوده است تا برآیندی کارآمد از کلیه فعالیت‌هایی که در زمینه شبیه‌سازی دقیق توربین‌های بادی انجام گرفته‌است، بدست آید [۸-۷]. کار براساس مدلسازی و نمایش مدولار استوار است. این خاصیت به این معناست که مجموعه‌ای از بلوک‌ها که هر کدام نماینده یک پدیده فیزیکی و یا خاصیت الکترومکانیکی است، مدلی کامل و دقیق را تشکیل می‌دهند. این نوع مدل‌سازی، دست را در انجام تغییرات موردنظر و اعمال اصلاحات در بخش‌های دلخواه و افزودن و یا کاستن جزئیات، باز می‌گذارد. همچنین برای شبیه‌سازی هر مورد خاص، تنها بلوک‌هایی که موثر در پدیده مورد مطالعه هستند، در مدل قرار می‌گیرند. امکان ترکیب بلوک‌های فیزیکی مدل توربین بادی و مدل‌های داخلی ابزار شبیه‌سازی وجود دارد و با توجه به مطالعات موردنظر، مدل به سادگی و با حذف بلوک‌های مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در انتخاب و اصلاح احتمالی مدل برای هر بخش و پدیده فیزیکی، صحت کار انجام شده بوسیله ارائه دهندگان و تطابق آن با نتایج تست‌های واقعی و یا واقعیات فیزیکی مدنظر بوده است. ماژور بخش‌های محدود و ساخت ماشین از نظر مواد بکار رفته، ابعاد و بهینه نمودن پارامترهای الکترومغناطیسی مانند گشتاور الکترومغناطیسی بوده است و در زمینه مطالعات دینامیکی برای این مولد مطالعه‌ای صورت نگرفته و یا بسیار اندک بوده است. بنابراین با توجه به ویژگی‌های ماشین‌های آهنربای دائم، به خصوص خانواده شار متقاطع نسبت به دیگر مولدها و نبود و یا فقر مطالعات دینامیکی آن، لزوم تحقیق و مطالعه در این زمینه مشخص خواهد شد. برای این منظور مدل دینامیکی مولد موردنظر برای توسعه توربین بادی بر اساس این مولد ارائه شده و جزئیات آن بیان می‌شود. در ادامه به ارائه نتایج مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌های مربوط به سیستم پیشنهادی پرداخته و در نهایت بحث و جمع‌بندی پژوهش و ارائه پیشنهادها آورده خواهد شد.

۲- اجزای توربین بادی

۲-۱- کنترل کننده

سیستم کنترل به‌طور مداوم اطلاعات موردنیاز برای انجام وظایف خود را که شامل شرایط مختلف توربین، وضعیت سرعت و جهت باد و ... می‌گردد را توسط سنسورهای نصب‌شده در مکانهای حساس توربین و تجهیزاتی نظیر بادنما و بادسنج دریافت می‌دارد و با اطلاعات کسب‌شده، وظایف کنترلی خود را که شامل مواردی نظیر روشن و خاموش نمودن توربین می‌گردد، به انجام می‌رساند. اطلاعات دریافتی توسط این سیستم، معمولاً از طریق مودم به مرکز کنترل اصلی ارسال می‌گردد [۷-۶].



۲-۲- جعبه‌دنده

توربین‌های بادی در سرعت‌های نسبتاً پایینی کار می‌کنند. سرعت نوک پره‌ها عموماً بین ۵۵ تا ۹۰ متر بر ثانیه بدون توجه به اندازه موتورها است. نوعاً، پره‌های یک توربین با قطر تقریبی ۳۰ متر با سرعتی در حدود ۳۵ تا ۵۰ دور در دقیقه دوران می‌کنند. بنابراین یک جعبه‌دنده افزایشده لازم است تا بتوان سرعت شفت خروجی را که با سرعت سنکرون ژنراتور (که نوعاً ۱۵۰۰ دور در دقیقه است) مطابقت دارد، بدست آورد. چرخ‌دنده‌ها از یک طرف به شفت سرعت پایین متصل و از طرف دیگر به شفت با سرعت بالا متصل می‌باشند. هزینه ساخت گیربکس‌ها بالاست و در ضمن گیربکس‌ها بسیار سنگین هستند. دو نوع اصلی جعبه‌دنده‌هایی که استفاده می‌شوند عبارت‌اند از جعبه‌دنده با محور سیاره‌ای و یا محور موازی، طرح محور موازی ساده ولی نسبتاً سنگین هست و محور خروجی معمولاً خارج از محور است. در توربین‌های بادی با قطر بزرگ‌تر از ۲۵ متر، مزایای هزینه کمتر و وزن سبک‌تر جعبه‌دنده‌های سیاره‌ای، به‌طور فزاینده‌ای قابل توجه است.

۲-۳- پره‌ها

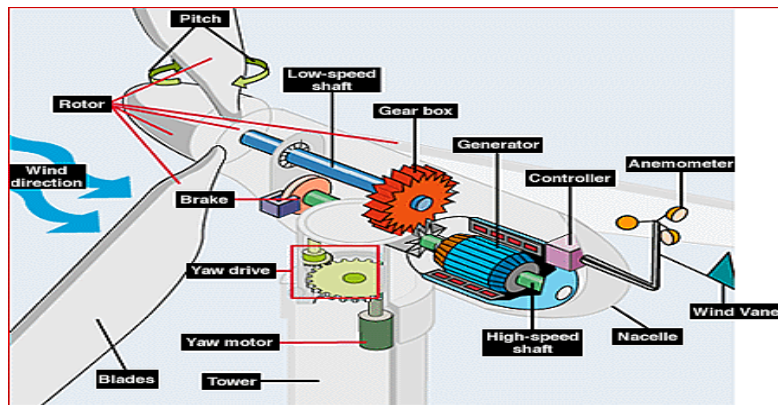
پره‌ها را می‌توان از فایبرگلاس تقویت‌شده با پلی‌استر، چوب چندلایه، آلومینیم یا فولاد ساخت. پره‌های ساخته‌شده از فایبرگلاس تقویت‌شده با پلی‌استر نسبتاً سبک بوده و تنش کمتری بر یاتاقان‌ها وارد می‌کنند. پره‌های فولادی به دلیل آسانی ساخت، بالابودن قدرت و هزینه ساخت کم عموماً مورد استفاده قرار می‌گیرند. توان قابل تولید یک توربین بادی برای یک سرعت باد مشخص با سطح دایره‌ای شکلی که از چرخش رتور به وجود می‌آید، متناسب است.

۲-۴- سیستم گرداننده توربین

وسیله‌ای است که وضعیت توربین را هنگامی که جهت باد عوض می‌شود، تغییر داده و همواره راستای توربین را در راستای باد قرار می‌دهد. توربین‌های بادی که به این سیستم مجهز می‌باشند، انرژی بیشتری تولید نموده و دارای راندمان بیشتری هستند. موتور انحراف (Yaw motor) برای به حرکت درآوردن این سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۵- برج

برج‌های خرپائی یا لوله‌ای دو نوع برج عمده هستند. در کالیفرنیا، توربین‌های بادی نصب‌شده به‌طور مساوی از این دو نوع برج استفاده می‌کنند. برج خرپائی ارزان‌تر است. عموماً برج لوله‌ای خوش منظره‌تر به نظر می‌رسد. دستیابی به بدنه توربین برای تعمیرات در شرایط نامناسب هوا از درون برج لوله‌ای که به تعمیرکار در مقابل شرایط نامناسب هوا پناه می‌دهد، عملی‌تر است. انتظار می‌رود که بیشتر مزارع بادی اروپائی در آینده از برج‌های لوله‌ای استفاده کنند. اجزای مختلف یک توربین بادی در شکل ۱ نشان داده‌شده است.



شکل (۱): اجزاء مختلف یک توربین بادی [۶].

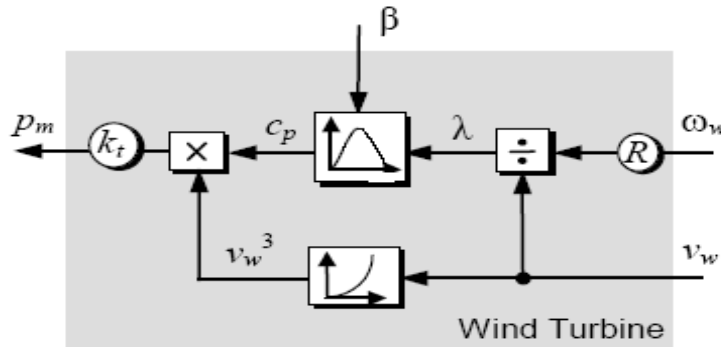
۳- محاسبه گشتاور و توان در توربین‌های بادی

نیروی مکانیکی که از توربین بادی خارج می‌گردد به پارامترهای زیادی وابسته هست. یک معادله ساده برای توصیف گشتاور و توان توربین بادی اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷].

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p (\lambda, \beta) V_w^3 \quad (1)$$

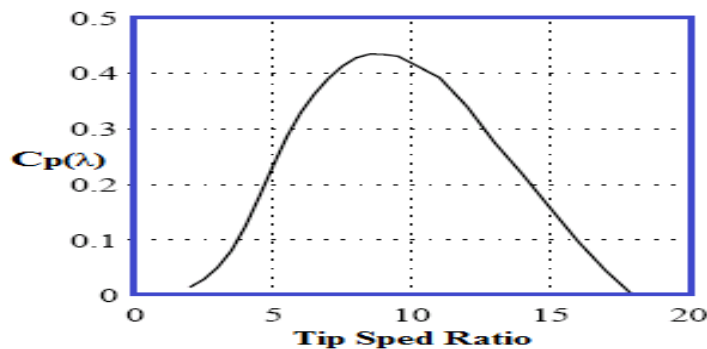


که در این رابطه V_w حجم باد (m^3)، C_p ضریب توان (تابعی از λ)، λ ضریب سرعت نوک $\left(\lambda = \frac{R\omega_w}{V_w}\right)$ ، ω_w سرعت زاویه‌ای توربین (rad/s)، R شعاع روتور توربین (m)، ρ چگالی باد (kg/m^3)، A سطح مقطع توربین (m^2) هست. شکل ۲ نمایش بلوک دیاگرامی این پارامترها را نشان می‌دهد، که در آن β زاویه Pitch هست.



شکل (۲): بلوک دیاگرام کنترلی مدل آئرودینامیکی توربین [۷]

در رابطه (۱)، ضریب توان $C_p(\lambda)$ به ویژگی آئرودینامیکی توربین بادی تحت شرایط عملکردی وابسته است. برای یک زاویه Pitch ثابت (β)، ضریب توان می‌تواند به‌عنوان تابعی از نسبت سرعت نوک (λ) بیان گردد. شکل ۳ منحنی ضریب توان برحسب سرعت نوک توربین را نشان می‌دهد.



شکل (۳): منحنی ضریب توان برحسب سرعت نوک.

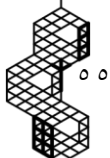
برای زاویه Pitch متغیر، ضریب توان به‌صورت یک پارامتر دوبعدی بیان می‌گردد. در نهایت رابطه بین گشتاور و توان مکانیکی با معادله زیر داده می‌شود [۸].

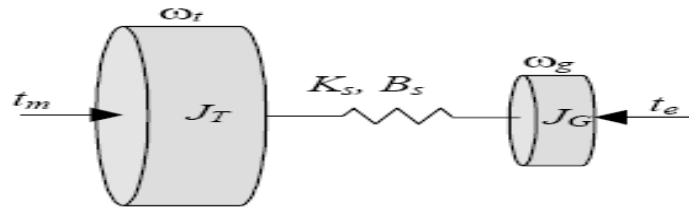
$$T_m = p_m \frac{R}{G\lambda V_w} \text{ (N.m)} \quad (2)$$

که در این رابطه G نسبت جعبه افزایشدهنده سرعت هست. از مشخصه گشتاور - توان توربین بادی در بازده و توان حداکثر می‌توان سرعت روتور را به دست آورد.

۴- مدل دینامیکی توربین بادی

به‌طور کلی، طراحی سیستم کنترل و آنالیز یک Plant نیازمند مدل دینامیکی دقیقی از آن هست. یک مدل دینامیکی ساده‌شده توربین بادی شامل دو جرم که منجر به یک مؤید تک رزونانسی می‌شود، در شکل ۴ نشان داده شده است. انگیزه استفاده از این مدل ساده بودن آن هست [۹].





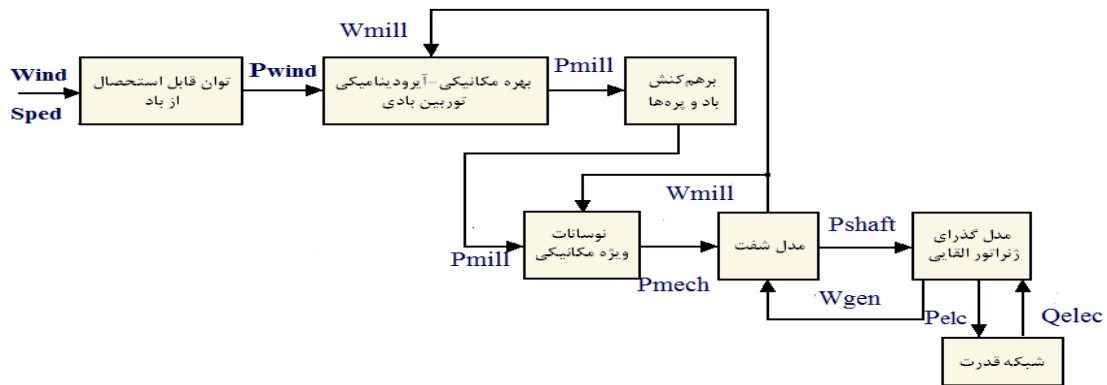
شکل (۴): مدل دینامیکی ساده‌شده توربین بادی

مدل دینامیکی با معادلات زیر توصیف می‌شود [۹].

$$\begin{cases} T_m - T = J_T \omega_T \\ T - T_e = J_G \omega_G \end{cases} \quad (۲)$$

$$T = K_s \int (\omega_T - \omega_G) dt + B_s (\omega_T - \omega_G)$$

که در این رابطه J_T اینرسی توربین بادی، J_G اینرسی ژنراتور، ω_g سرعت چرخشی توربین، ω_g سرعت چرخشی ژنراتور، K_s سختی محور و B_s نوسان محور است. در ادامه اجزا مختلف توربین بادی بررسی می‌شود.



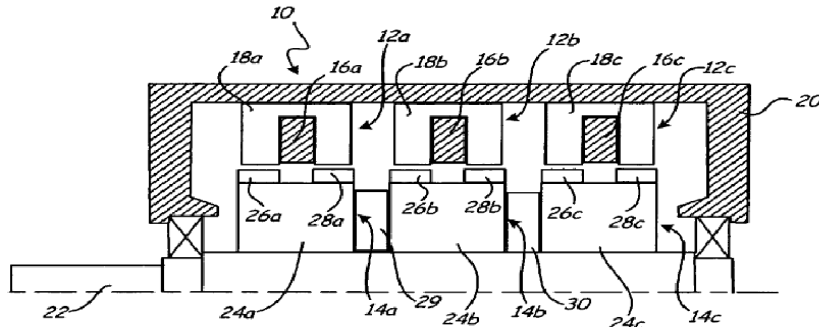
شکل (۵): مدل فیزیکی توربین بادی با استفاده از ژنراتور القایی [۱۰].

ژنراتور مورد مطالعه و مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اجزای محدود به منظور کو پل با توربین بادی بدون نیاز به جعبه‌دنده در این مقاله، ژنراتور آهنربای دائم شارمتقاطع هست. این ژنراتورها در زمینه‌های زیادی که، به ماشین‌های با چگالی گشتاور بالا و ماشین‌های با تعداد قطب‌های زیاد مورد نیاز است، بکار گرفته می‌شود [۱۰].

۵- مدل‌سازی مولد آهنربای دائمی شار متقاطع (TFPM)

ساختار مطالعاتی مولد آهنربای دائم در نظر گرفته‌شده در این مقاله، ساختار معرفی‌شده توسط دانشگاه NEVEDA هست و نمای عرضی آن در شکل ۶ نشان داده شده است. این ساختار $TFPM^4$ شامل سه استاتور خارجی است $12a, 12b, 12c$ (هر کدام برای هر فاز a, b, c) و رتور مربوط به آن‌ها $14a, 14b, 14c$ هست. هر استاتور شامل سیم‌پیچی حلقوی یا رینگی شکل است (۱۶)، قطب‌های مغناطیسی U شکل از استیل ورقه شده ساخته شده است (۱۸) [۱۱]. اعضای رتور (۱۴)، به شافت (۲۲)، متصل شده است که شامل هسته فرو مغناطیسی سیلندری شکل (۲۴) و آهنرباهای دائمی (۲۶ و ۲۸) هست. هر کدام از فازهای نشان داده‌شده در شکل ۶ عملکردی مجزا دارند. بنابراین کارکرد هر سه فاز، با در نظر گرفتن یک فاز با اعضای استاتور $12a$ و اعضای رتور $14a$ توضیح داده می‌شود. زمانی که ماشین در حالت ژنراتوری عمل می‌کند، آهنرباهای $26a, 28a$ با چرخش شافت ۲۲ به چرخش درمی‌آیند و یک میدان مغناطیسی متناوب درست می‌کنند.

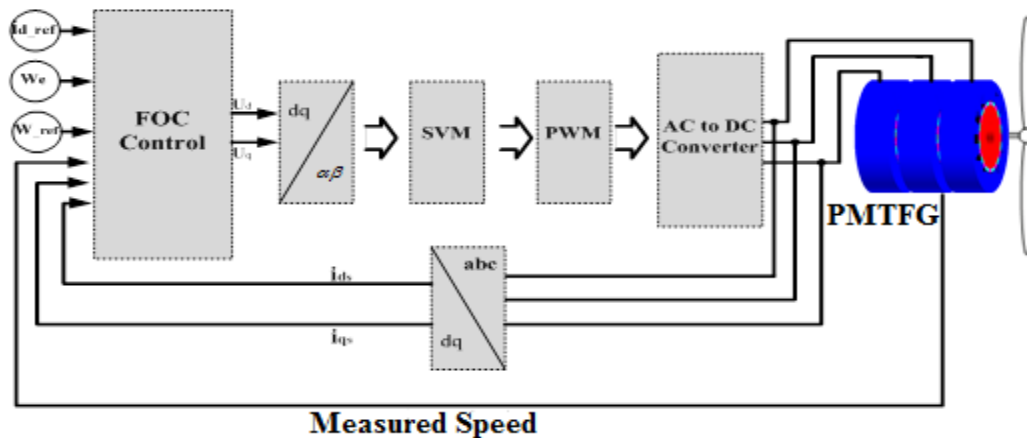




شکل (۶): نمای عرضی ماشین آهنربای دائمی شار متقاطع (TFPM) [۱۱].

۶- مدل سازی توربین بادی بر اساس TFPM

برای مدل سازی سیستم تبدیل انرژی بادی (WECS) بر پایه مولد TFPM، در ادامه مولد مورد نظر، سپس توربین بادی و سیستم کنترلی مدل سازی خواهند شد. شماتیک کلی مدل پیشنهادی WECS بر اساس مولد PMTFG مدل سازی شده در این بخش در شکل ۷ نشان داده شده است.

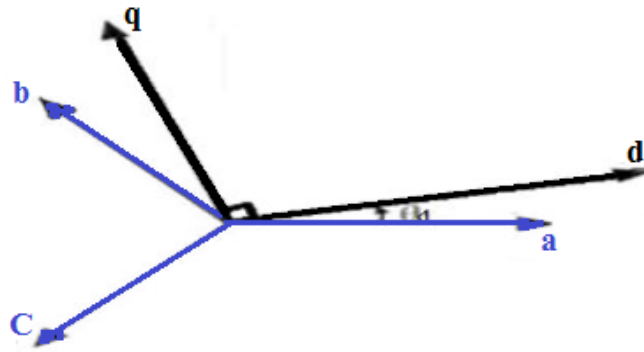


شکل (۷): شماتیک کلی سیستم تبدیل انرژی بادی (WECS) پیشنهادی بر پایه TFPM [۱۲].

۶-۱- مدل سازی و شبیه سازی دینامیکی مولد آهنربای دائم شار متقاطع

۶-۱-۱- محاسبات مدل دینامیکی

مدل دینامیکی ماشین های الکتریکی برای بررسی شرایط دینامیکی و خطاهای احتمالی ضروری است. مدل سازی دینامیکی بر پایه معادلات ولتاژ-جریان، شار-جریان و تبدیلات پارک صورت می گیرد. روابط موجود در این بخش برگرفته از [۱۲] می باشند. ماشین های الکتریکی معمولاً در محور متعام $dq0$ قاب مرجع گردان رو تور که محور q به اندازه 90° درجه جلوتر از محور مستقیم، d هست در نظر گرفته می شوند. شکل ۸ قاب مرجع سه فاز abc و قاب مرجع گردان $dq0$ را نشان می دهد. در این شکل زاویه θ_d ، زاویه مکانیکی بین محور d رو تور و محور استاتور هست. تبدیل مختصات چهارچوب سه فاز استاتور به چهارچوب مرجع $dq0$ با استفاده از تبدیل پارک انجام می شود. فرم کلی تبدیل پارک و عکس آن به در ادامه آورده شده است [۱۳-۱۴].



شکل (۸): قاب مرجع سه فاز abc و قاب مرجع گردان dqo

۶-۱-۲- شبیه‌سازی دینامیکی

در ماشین‌های الکتریکی بسته به متغیرهای ورودی و خروجی می‌توان شبیه‌سازی‌های متنوعی انجام داد. در این جا با توجه به نحوه به‌کارگیری این ژنراتور در ترکیب با توربین بادی و سیستم کنترلی انتخاب‌شده برای توربین-ژنراتور، سرعت ماشین به‌عنوان ورودی و جریان‌های سه فاز ماشین به‌عنوان خروجی در نظر گرفته‌شده‌اند. لذا معادلات دینامیکی به شکل ذیل تغییر می‌یابد [۱۶-۱۵].

$$i_{ds} = \frac{1}{s} (-v_{ds} - R_s i_{ds} + \omega_e L_q i_{qs}) / L_d \quad (4)$$

$$i_{qs} = \frac{1}{s} (-v_{qs} - R_s i_{qs} - \omega_e L_d i_{ds} + \omega_e \lambda_M) / L_q \quad (5)$$

توان تحویل داده‌شده به بار را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$P_s = P_m - P_{cus} = T_e \frac{\omega_e}{p} - r R_s I_s^2 \quad (6)$$

$$P_s = P_m - P_{cus} = T_e \frac{\omega_e}{p} - r R_s I_s^2 \quad (7)$$

$$I_s = \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2} \quad (8)$$

شبیه‌سازی دینامیکی ماشین در برنامه MATLAB/SIMULINK انجام‌شده است. تمام بلوک‌ها با استفاده از روابط ریاضی حاکم بر سیستم ایجاد شده‌اند. با استفاده از این مدل آزمایش‌های مختلفی را می‌توان انجام داد. در این شبیه‌سازی از بار سه فاز ستاره استفاده شده است. در این مدل ورودی مکانیکی سرعت روتور است که در حالت ژنراتوری از طریق توربین دریافت می‌شود.

۶-۲- مدل‌سازی WECS

در ادامه مطالب این بخش به مدل‌سازی کل سیستم تولید توان بادی پرداخته خواهد شد. از آنجایی که مولد مورد استفاده در بخش قبلی مدل شده است، مدل‌سازی باد، توربین بادی و سیستم کنترلی، مطلوب این بخش هست. [۱۷].

۶-۲-۱- مدل‌سازی باد و توربین بادی

برای به دست آوردن یک بیان مناسب از انرژی باد، باید این انرژی را به نحوی اندازه گرفت. انرژی باد از نوع انرژی جنبشی است. در صورتی که مدلی به شکل جرم برای باد بتوان به دست آورد. محاسبه انرژی با قوانین ساده فیزیک کلاسیک، (۹) انرژی جنبشی باد محاسبه خواهد شد. [۱۹-۱۸].

$$E_{wind} = \frac{1}{2} m V_w^2 \quad (9)$$

در این رابطه m ، جرم معادل حجمی از هوای گذرنده از توربین است. فرض می‌شود کل این حجم از باد، با سرعت یکسان V_w در حرکت باشد. واحد سرعت باد متر بر ثانیه (m/s) است. با توجه به یکسان فرض شدن سرعت حجمی از باد که به پره‌های توربین برخورد می‌کند، یک بازه زمانی t ، می‌توان این جرم را به صورت زیر تعریف کرد. [۲۰-۲۱].

$$m = \rho A V_w t = \rho \pi R^2 V_w t \quad (10)$$

که ρ چگالی هوا، A مساحت جاروب شده توسط پره‌های توربین و R شعاع پره توربین هست. با جایگذاری (۱۰) در رابطه (۹) انرژی جنبشی باد به شکل زیر بیان خواهد شد [۲۲].

$$E_{wind} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 t \quad (11)$$

با استفاده از رابطه فوق توان حقیقی موجود در نیروی باد، در هر لحظه از زمان به شکل زیر محاسبه خواهد شد. [۲۳].

$$P_{wind} = \frac{E_{wind}}{t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 \quad (12)$$

رابطه فوق نشان می‌دهد انرژی از باد شدیداً به سرعت باد وابسته است. این وابستگی با توان سوم سرعت باد مشخص شده است. بنابراین تغییر جزئی در سرعت باد، تغییر قابل توجهی در انرژی باد ایجاد خواهد کرد. همچنین دریافت انرژی بیشتر از باد با افزایش شعاع پره‌های توربین امکان پذیر است. در هر حال توان محاسبه شده در رابطه (۱۲) مقدار بالقوه توان باد است که در سرعت باد V_w و شعاع پره توربین R محاسبه می‌شود. از این مقدار تنها درصدی از آن به انرژی مکانیکی توربین تبدیل می‌شود. این درصد با استفاده از روش معرفی شده توسط **Albert Betz** در سال ۱۹۱۹ تعیین می‌گردد [۲۴]. بر اساس این روش هنگام قرار گرفتن پره‌های توربین در مسیر باد، سرعت باد کاهش یافته و در نتیجه انرژی دریافتی توسط توربین کمتر از مقدار ماکزیمم انرژی در سرعت باد V_w خواهد بود. ارتباط بین انرژی دریافتی توسط توربین، $P_{turbine}$ ، به ماکزیمم انرژی بالقوه باد، P_{wind} ، با ضریب توان توربین بادی، C_p ، به شکل زیر بیان می‌شود [۲۵].

$$C_p = \frac{P_{turbine}}{P_{wind}} \quad (13)$$

این ضریب به صورت زیر قابل محاسبه است [۲۶-۲۷]:

$$C_p = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\alpha} - c_3 \beta - c_4 \beta^x - c_5 \right) e^{-c_6 \frac{1}{\alpha}} \quad (14)$$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V_w} \quad (16)$$

در روابط فوق β زاویه پره روتور بوده، λ نرخ شدت سرعت توربین بادی و ω_m سرعت زاویه‌ای ژنراتور و توربین بادی می‌باشند. مقادیر ثابت‌های (c_1 تا c_6) به نوع توربین بستگی دارد [۲۸] در زاویه $\beta = 0$ حداکثر توان قابل دسترسی است. در نهایت رابطه پره توربین به شکل زیر خواهد بود:

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V_w^3 \quad (17)$$

گشتاور مکانیکی توربین، T_m ، از رابطه زیر به دست می‌آید. [۲۹].

$$T_m = \frac{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V_w^3}{\omega_m} \quad (18)$$

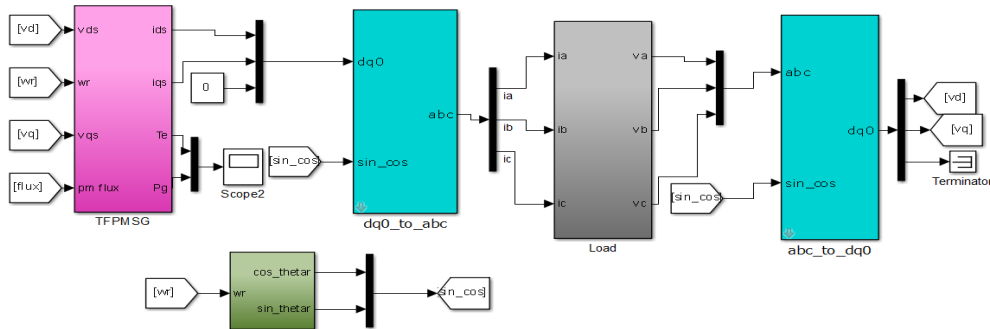
در ادامه مطالب فوق با شبیه‌سازی سمت باد، تأثیر β بر مقدار C_p بررسی شده و نرخ شدت سرعت بهینه، λ_{opt} که به ازای آن $C_{p_{opt}}$ حاصل می‌شود، محاسبه خواهد شد. برای رسیدن به این هدف پارامترهای c_1 تا c_6 (رابطه (۱۴)) به شرح زیر در نظر گرفته شده‌اند [۳۰].
برای مدل‌سازی باد در اینجا از مدل خطی که به شکل شیب‌های افزایشی و کاهش می‌دهنده، استفاده شده است.

جدول (۱): ثابت‌های C_1 تا C_6

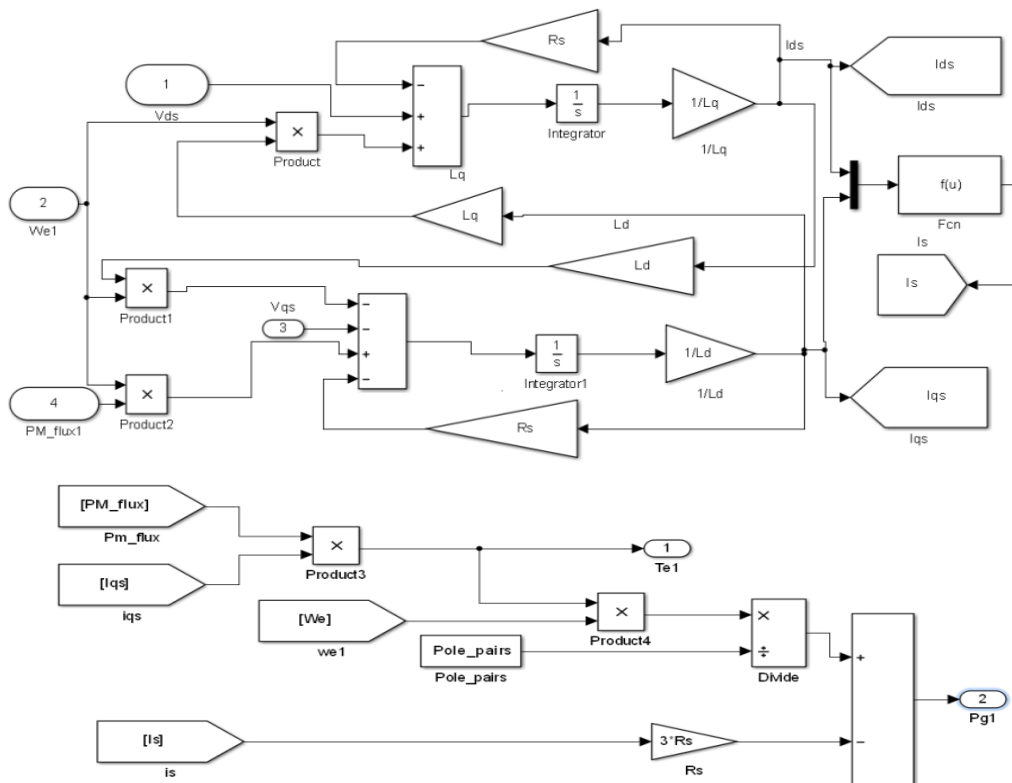
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
۰.۵	۱۱۶	۰.۵	۰	۵	۲۱

۷- نتایج شبیه‌سازی و بحث

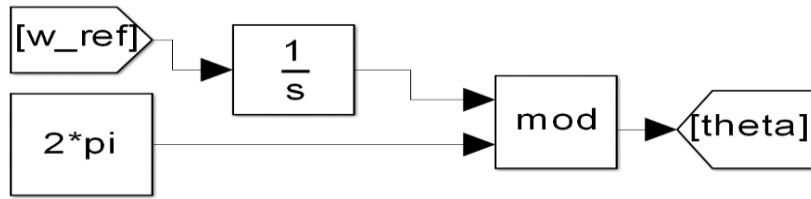
در بخش قبل، به شبیه‌سازی دینامیکی مولد سنکرون آهنربای دائمی شارمتقاطع و آنالیز آن برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیکی توربین بادی سرعت متغیر بر اساس این مولد پرداخته شد. در این بخش نتایج مدل‌سازی دینامیکی استخراج می‌شود و سپس نتایج شبیه‌سازی و مدل‌سازی سیستم توربین بادی برای سیستم پیشنهادی ارائه شده است، که عملکرد کل سیستم را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.



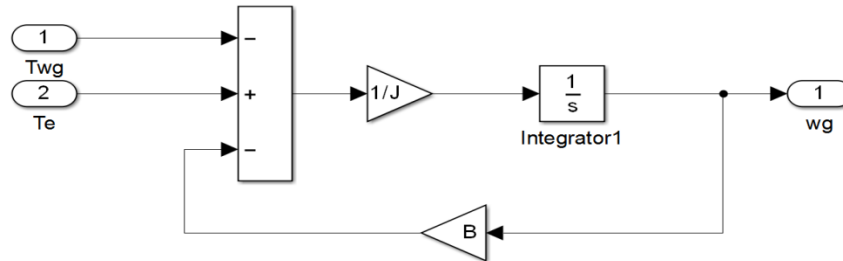
شکل (۹): مولد آهنربای دائمی شارمتقاطع متصل به بار ستاره.



شکل (۱۰): بلوک‌های مدل‌سازی ریاضی مولد آهنربای دائمی شارمتقاطع.



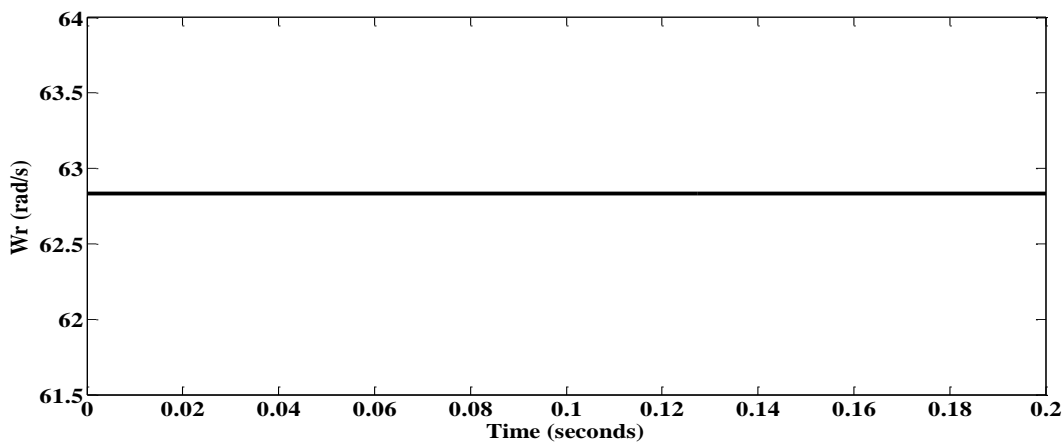
شکل (۱۱): بلوک محاسبه‌ی زاویه‌ی رتور.



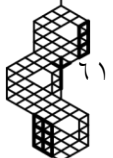
شکل (۱۲): بلوک محاسبه سرعت مکانیکی مولد.

۷-۱- نتایج مدل‌سازی دینامیکی

در بخش‌های قبلی عملکرد دینامیکی مولد سنکرون آهنربای دائم شارمتقاطع به صورت مجزا بررسی شد. در این بخش به تجزیه و تحلیل عملکرد سیستم توربین بادی بر پایه مولد پیشنهادی پرداخته خواهد شد. شکل ۹ بلوک‌های شبیه‌سازی شده در MATLAB/SIMULINK برای مولد آهنربای دائم شار متقاطع را نشان می‌دهد که بر اساس روابط درج‌شده در بخش قبل پیاده‌سازی شده‌اند. در این شبیه‌سازی روابط مربوط به مولد موردنظر در بلوک TFPMSG آمده است که در محور متعامد dq پیاده‌سازی شده است، جریان‌های خروجی از این بلوک به وسیله تبدیل dq به abc به جریان سه فاز تبدیل می‌شود. بلوک‌هایی که تفسیر رفتار مولد آهنربای دائم شار متقاطع را بر اساس روابط (۴) تا (۸) بر عهده دارند در شکل ۱۰ به نمایش در آمده است. بلوک Load بیانگر بار سه فاز اهمی است که به صورت ستاره است و مقدار آن ۳.۵ اهم است و بلوک آخر، بلوک تبدیل abc به dq است که ولتاژ سه فاز را تبدیل به ولتاژ متعامد کرده تا ورودی‌های بلوک TFPMSG تأمین شود. بلوک محاسبه زاویه رتور در شکل ۱۱ مشخص شده و شکل ۱۲ بلوک‌های شبیه‌سازی شده برای محاسبه سرعت مکانیکی مولد مورد استفاده قرار گرفته است. سرعت نامی مولد برابر است با ۶۰۰ دور بر دقیقه، بنابراین بر اساس رادیان بر ثانیه حدود ۶۲.۸ هست. سرعت زاویه‌ای مربوطه بر حسب رادیان بر ثانیه در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

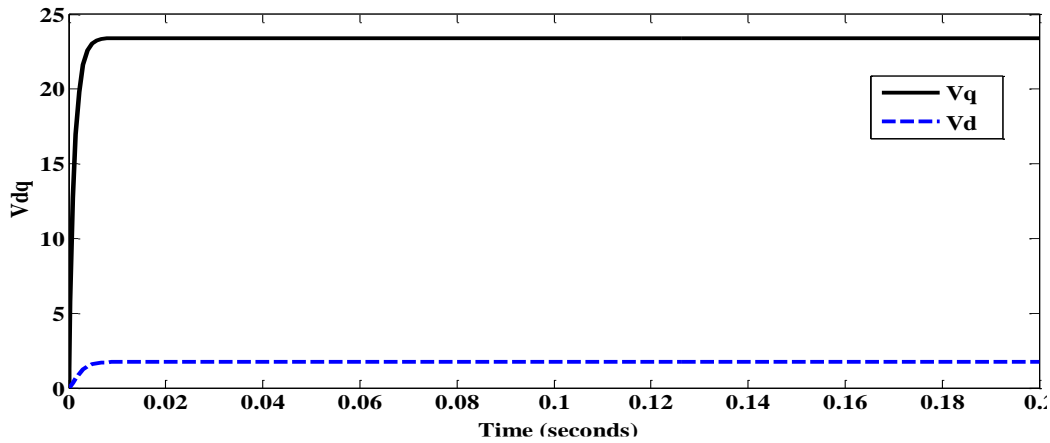


شکل (۱۳): سرعت نامی رتور بر حسب رادیان بر ثانیه.

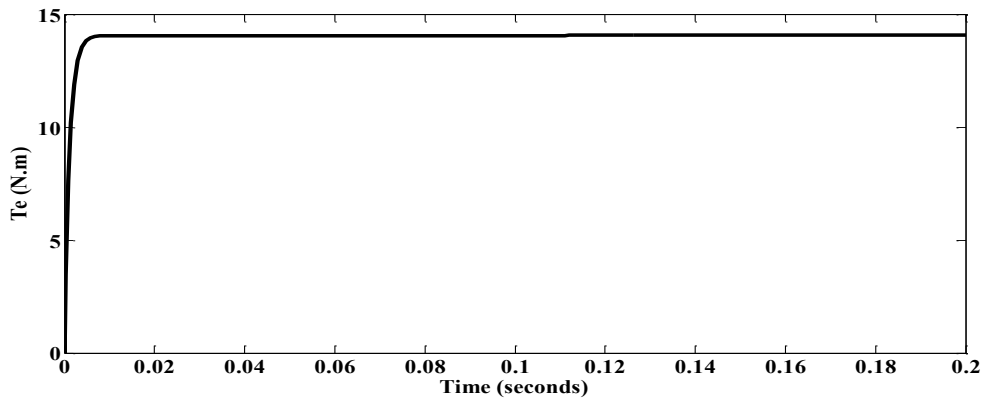




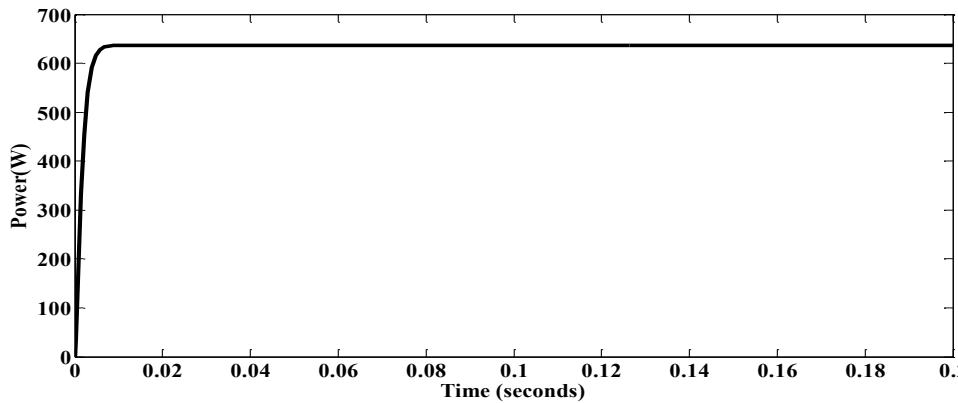
ولتاژهای متعامد d و q استاتور در سرعت نامی در شکل ۱۴ آمده، گشتاور الکتریکی و توان تحویلی به بار سه‌فاز اهمی این مولد در همین سرعت نیز در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب نشان داده شده است.



شکل (۱۴): ولتاژهای محورهای d و q



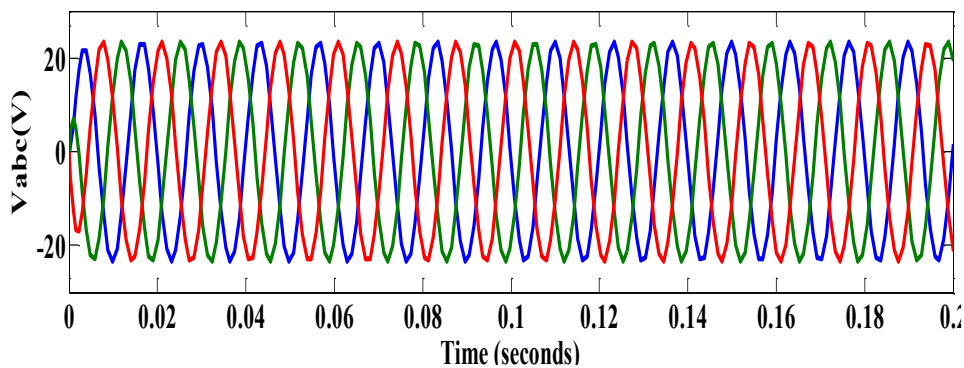
شکل (۱۵): گشتاور الکتریکی در سرعت نامی (N.m)



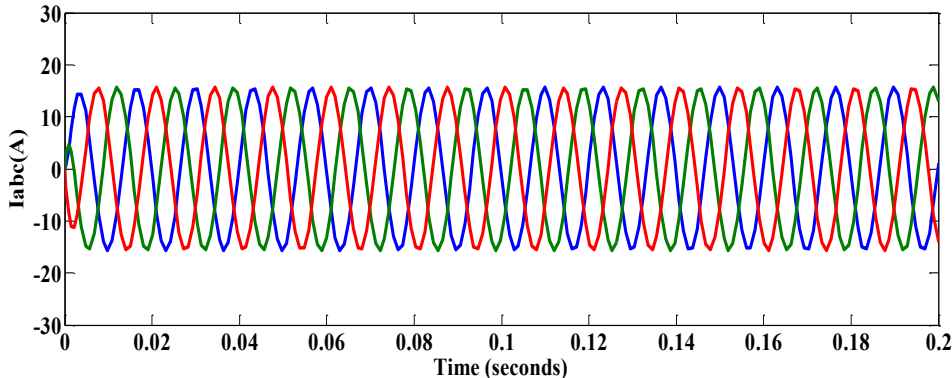
شکل (۱۶): توان تحویلی به بار سه‌فاز ستاره (۱.۵ اهم) در سرعت نامی (N.m)

شکل ۱۷ و ۱۸ ولتاژ سه‌فاز دو سر بار و جریان بار را در سرعت نامی ۶۰۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد.



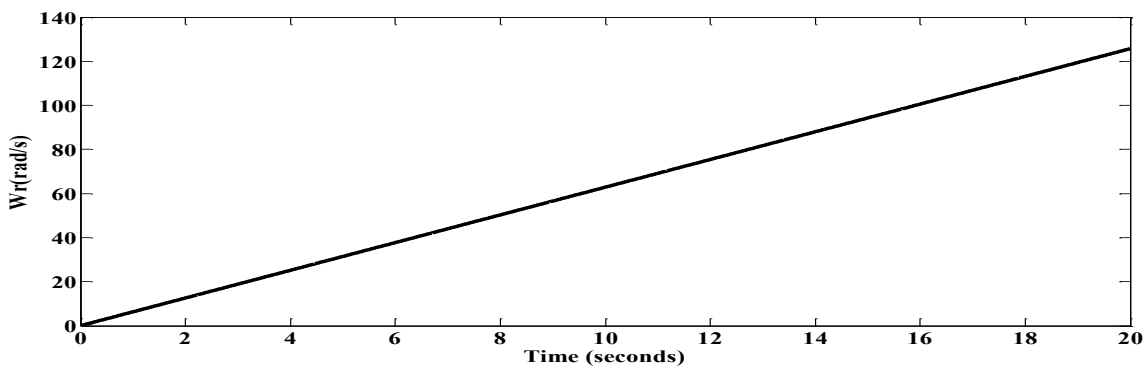


شکل (۱۷): ولتاژ سه فاز دو سر بار اهمی ستاره در سرعت نامی ۶۰۰ دور بر دقیقه

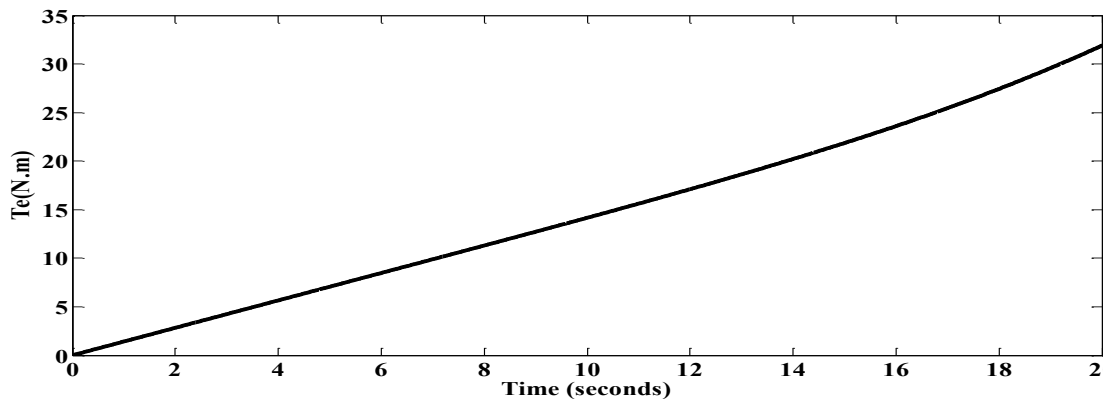


شکل (۱۸): جریان سه فاز بار اهمی در سرعت نامی ۶۰۰ دور بر دقیقه.

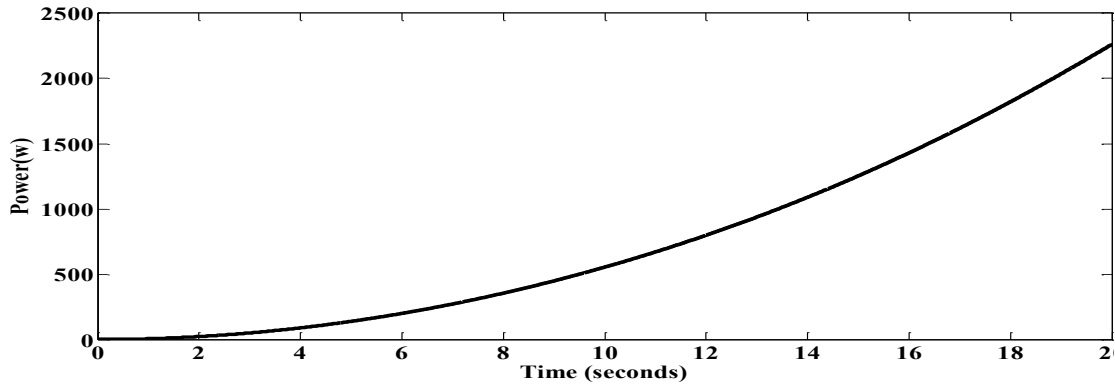
با تغییر سرعت مولد از ۰ تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه در ۲۰ ثانیه (شکل ۱۹) مشخصات ژنراتور به صورت زیر خواهد بود.



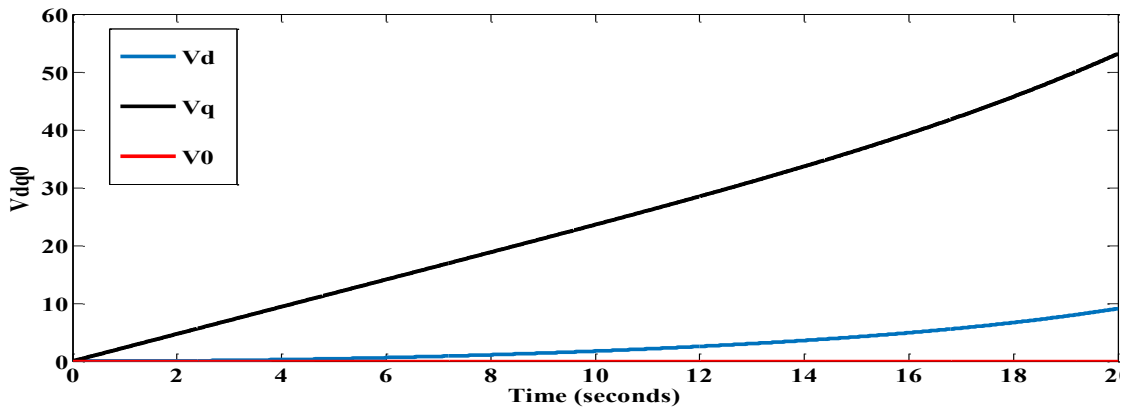
شکل (۱۹): تغییرات اعمالی سرعت رتور بر حسب رادیان بر ثانیه طی ۲۰ ثانیه.



شکل (۲۰): گشتاور الکتریکی در سرعت‌های متفاوت.

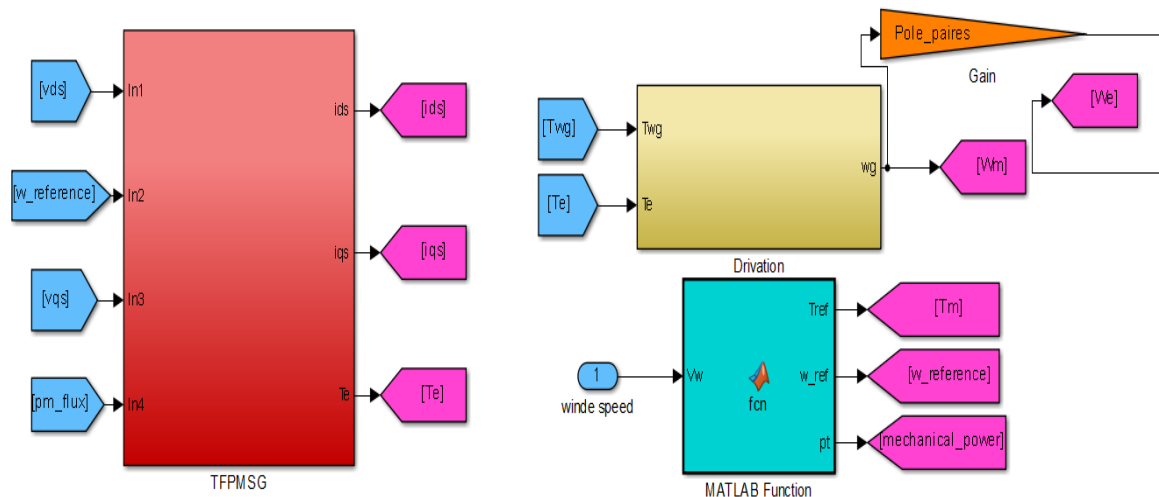


شکل (۲۱): توان تحویلی به بار سه فاز ستاره (۱.۵ اهم) در سرعت‌های متفاوت (N.m).



شکل (۲۲): ولتاژهای متعامد استاتور در سرعت‌های متفاوت.

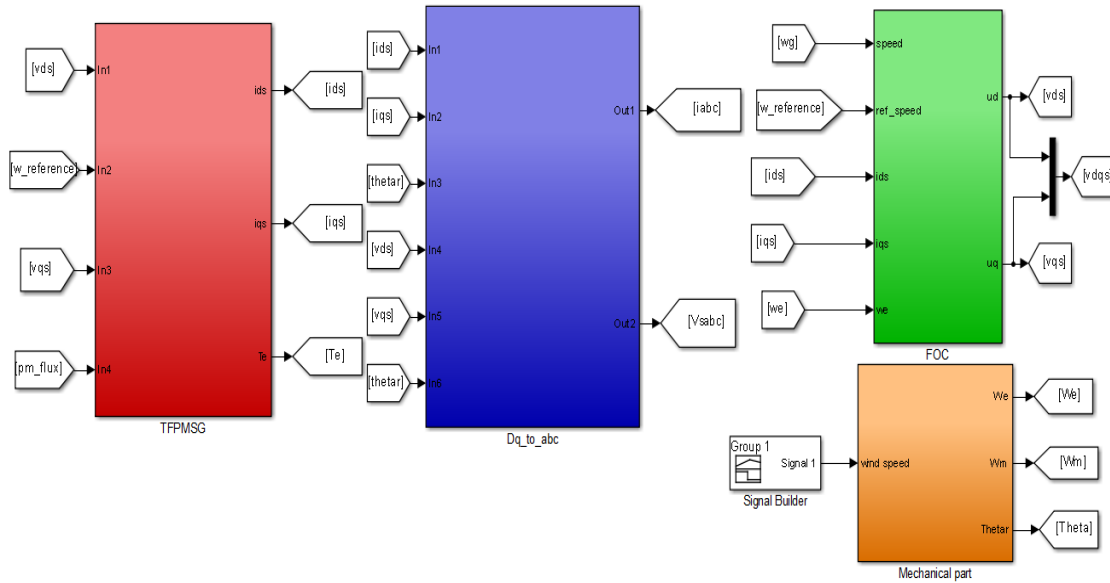
پس از شبیه‌سازی دینامیکی مولد و ارائه نتایج آن در سرعت نامی و سرعت‌های متفاوت به ارائه نتایج شبیه‌سازی سیستم توربین بادی بر اساس مولد آهنربای دائم شارمقاطع پرداخته خواهد شد. نخست شمای کلی سیستم توربین بادی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK نمایش داده شده است.



شکل (۲۳): بلوک‌های شبیه‌سازی سیستم توربین بادی.

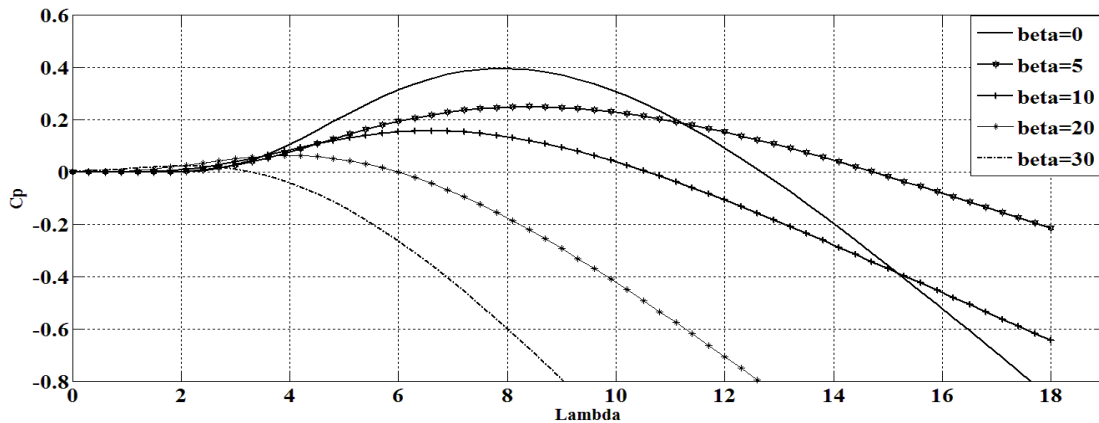
بلوک‌های شبیه‌سازی سیستم توربین بادی در شکل فوق نشان داده شده‌اند. بلوک Matlab function حاوی دستوره‌های محاسبه MPPT و اعمال آن است که جزئیات آن در فصل قبل ارائه شده است. بلوک Drivation سرعت زاویه‌ای رتور و سرعت الکتریکی را تولید می‌کند

و اما بلوک‌های مولد TFPMSG و بلوک‌های کنترلی آن در TFPMSG جای داده شده است که می‌توان درون این Subsystem را در شکل زیر دید.



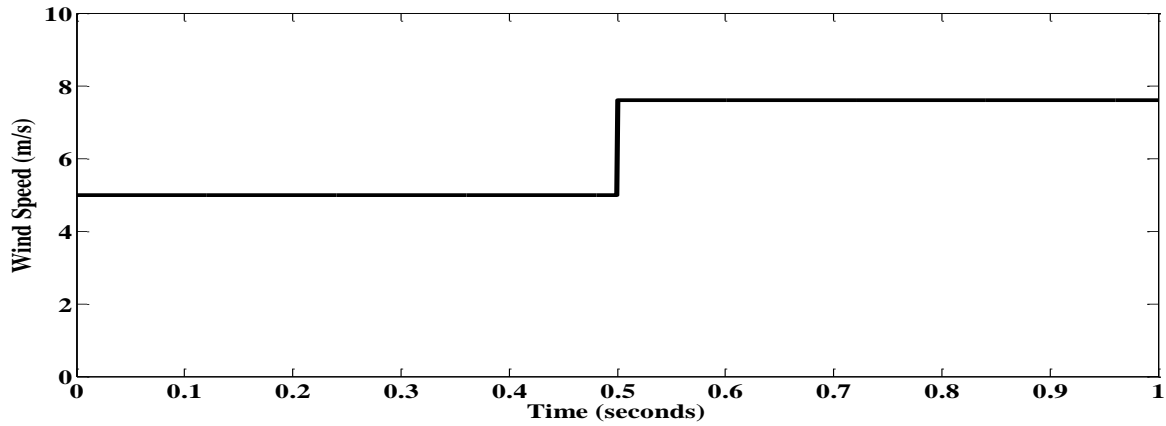
شکل (۲۴): بلوک‌های تشکیل‌دهنده زیرسیستم TFPMSG در شکل قبل.

در ادامه، نخست تغییرات ضریب توربین به ازای λ و β های مختلف استخراج شده و در شکل ۲۵ نشان داده شده است. این تغییرات بیان‌گر وجود یک λ بهینه است، که در آن ضریب توربین بادی حداکثر مقدار خود را دارد. با توجه باینکه حداکثر مقدار این ضریب در زاویه پره توربین برابر با صفر، حاصل می‌شود، بهینه‌سازی و لحاظ کردن بحث ماکزیمم توان با $\beta = 0$ انجام می‌شود. بنابراین مقدار بهینه C_p و λ به ازای این زاویه به ترتیب برابر با ۰.۴۱۰۵ و ۸.۱ هست. شعاع توربین برابر با ۰.۹ متر فرض شده است. با استفاده از مقادیر فوق به ازای هر سرعت باد، سرعت مولد و در نتیجه عملکرد آن قابل کنترل خواهد بود.

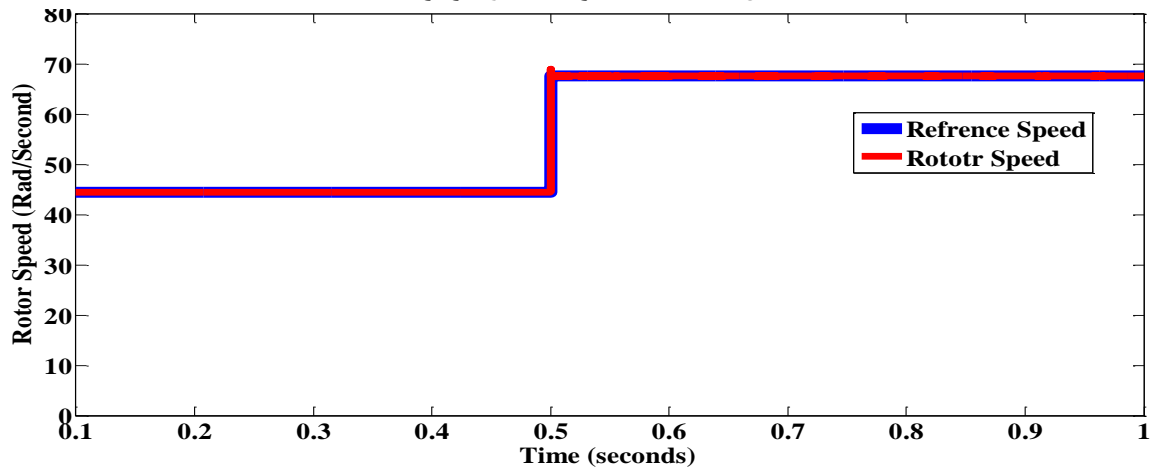


شکل (۲۵): تغییرات $C_p(\lambda, \beta)$ نسبت به λ و β .

در ادامه با توجه به توضیحات فوق و مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های ارائه شده در بخش قبل با استفاده از شکل موج سرعت باد در نظر گرفته شده، نتایج عملکرد سیستم ارائه خواهد شد. شکل موج سرعت باد در نظر گرفته شده در شکل ۲۶ آمده است، که بر اساس این شکل موج سرعت باد، سرعت مرجع محاسبه شده بر اساس روش تعقیب ماکزیمم نقطه توان مطابق با شکل ۲۷ خواهد بود. برای حصول اطمینان از تعقیب ماکزیمم نقطه توان جهت تولید حداکثر توان الکتریکی از انرژی مکانیکی تحویلی توسط توربین، سرعت روتور باید با سرعت مرجع یکسان باشد. در شکل ۲۷ دو سرعت مرجع و سرعت زاویه‌ای مکانیکی ژنراتور باهم مقایسه شده‌اند.



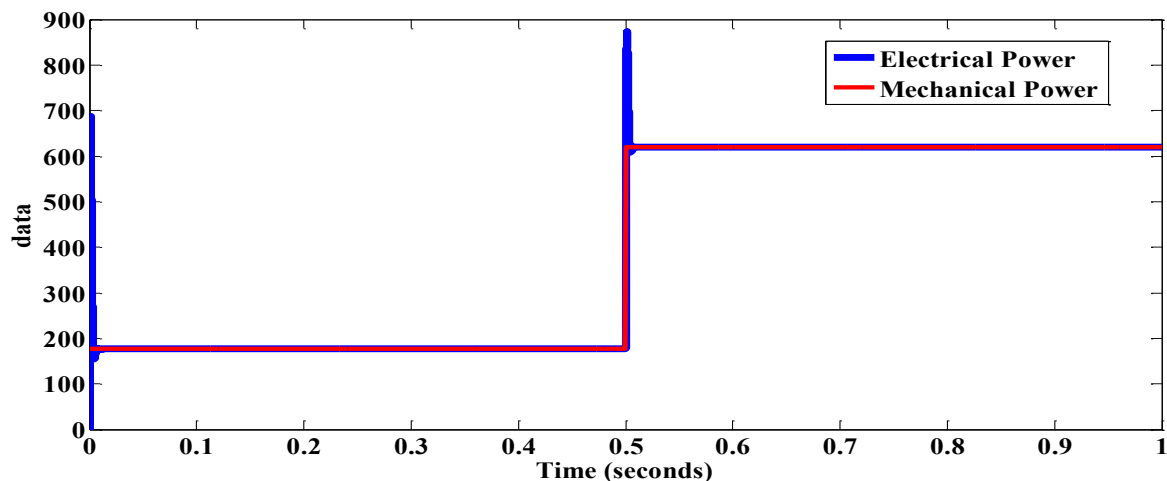
شکل (۲۶): مشخصه سرعت باد در نظر گرفته شده.



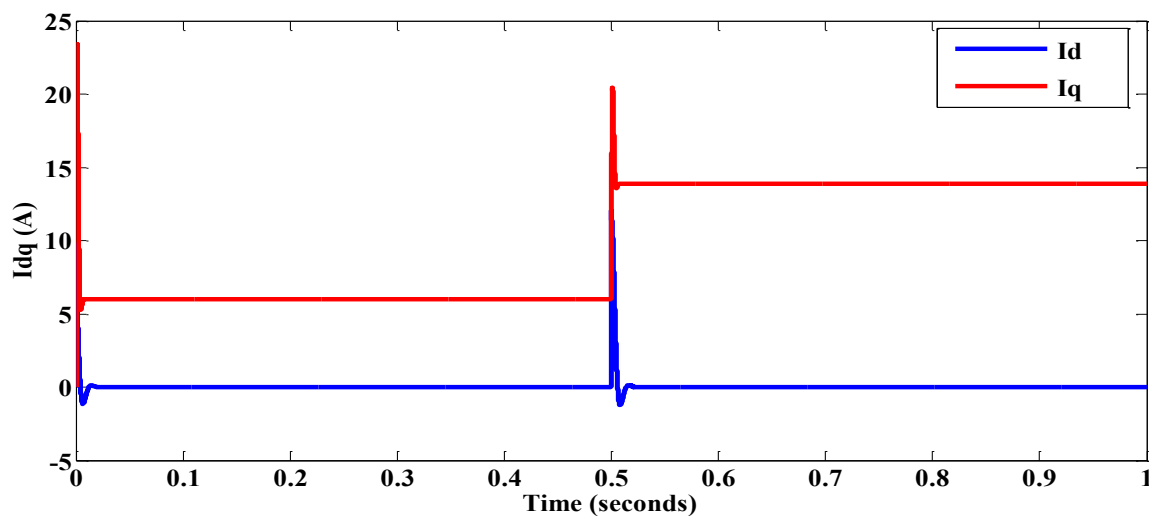
شکل (۲۷): سرعت مرجع و مقایسه آن با سرعت روتور.

چنان‌که در شکل بالا مشخص است سرعت ژنراتور به خوبی کنترل شده است. برای توان خروجی ژنراتور نیز نمودار مشابهی در ادامه آمده است (شکل ۲۸). تمامی این نتایج به سبب وجود الگوریتم کنترلی صحیح حاصل شده است. از بررسی این شکل‌ها مشاهده می‌شود که روش کنترل تعقیب ماکزیمم نقطه توان از دقت مناسبی برخوردار بوده و ژنراتور ضمن تطبیق دادن خود با سرعت جدید، خروجی‌های گشتاور و توان مطلوبی را نتیجه می‌دهد. قسمت عمده فرآیند کنترلی بکار برده شده در این مقاله، به کنترل جریان محورهای d و q اختصاص دارد. به عبارتی دیگر توان بهینه در نتیجه کنترل مناسب جریان محورهای متعامد حاصل شده است. برای رسیدن به این هدف، جریان محور d در مقدار صفر نگه‌داشته شده است تا جریان محور q و در نتیجه‌ی آن توان تولیدی حداکثر گردد. این فرآیند در شکل ۲۹ نمایش داده شده است.



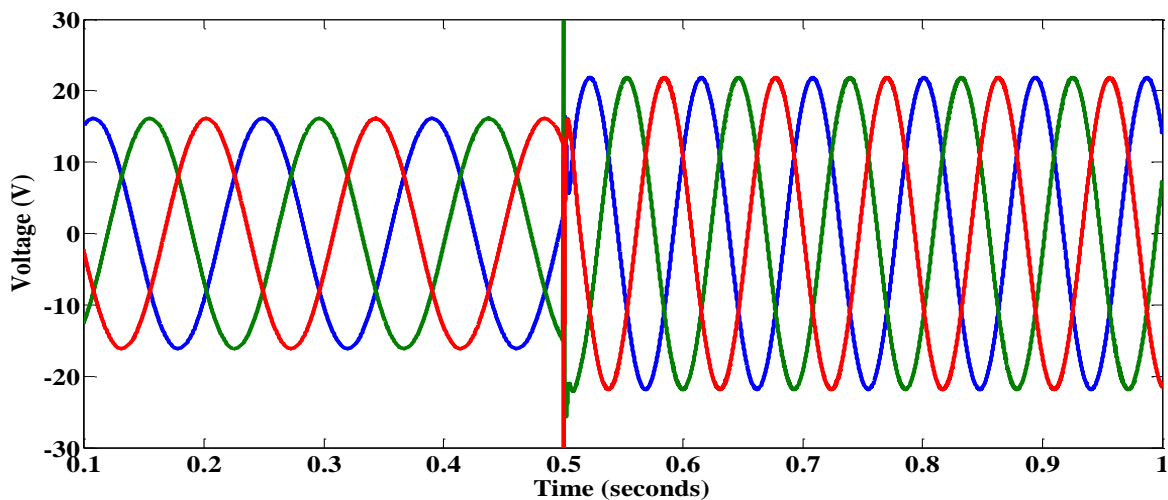


شکل (۲۸): مقایسه مقادیر توان حاصل از انرژی باد با ملاحظات ردیاب نقطه حداکثر توان (MPPT).

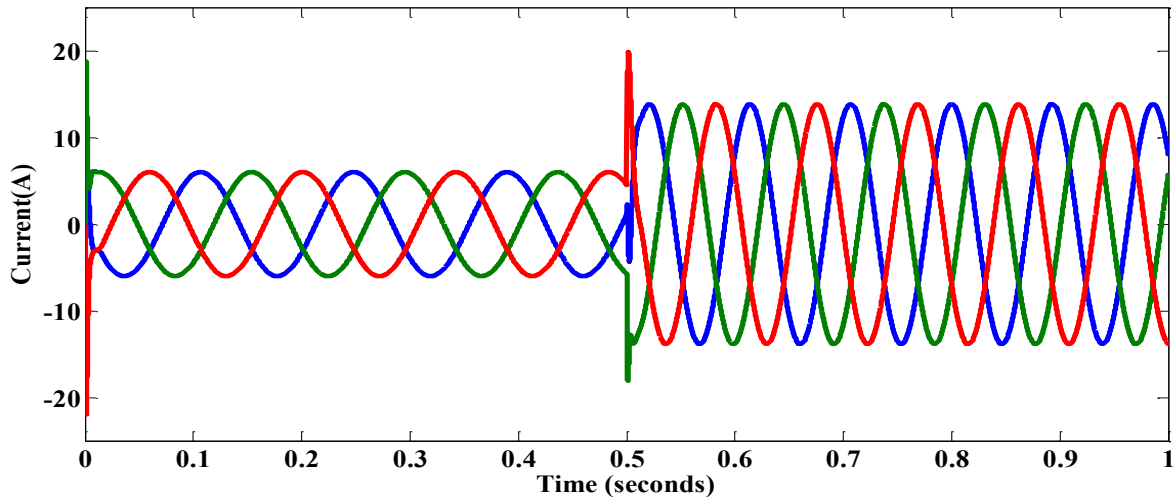


شکل (۲۹): جریان محورهای d و q مولد شبیه‌سازی شده.

شکل فوق بیانگر تنظیم مناسب کنترل‌کننده‌های تناسبی انتگرالی بکار رفته در ساختار FOC هست. در نهایت شکل موج‌های ولتاژ و جریان تولیدشده توسط مولد سنکرون آهنربای دائم شار محور به ترتیب در شکل‌های ۳۰ و ۳۱ آورده شده است.



شکل (۳۰): ولتاژ سه فاز استاتور به دست آمده از مدل دینامیکی توربین باد



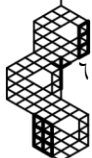
شکل (۳۱): جریان سه فاز استاتور به‌دست‌آمده از مدل دینامیکی توربین بادی

در این بخش از مقاله نتایج شبیه‌سازی ارائه گردیده است. در ابتدا نتایج حاصل از مدل‌سازی مولد PMTF به‌وسیله نرم‌افزار MATLAB ارائه گردید و سپس با تحلیل این نتایج و با قرار دادن در سیستم توربین بادی، نتایج سیستم توربین بادی سرعت متغیر بر اساس این مولد و کنترل FOC برای انتقال ماکزیمم توان الکتریکی به شبکه ارائه شده است. نتایج ارائه شده صحت مدل‌سازی سیستم و کنترل آن را نشان می‌دهد.

۸- نتیجه‌گیری

با توجه به چارچوب پژوهشی این مقاله، در زمینه مدل‌سازی مولد شارمتقاطع، در این تحقیق به‌صورت هدفمند این ژنراتور مورد مطالعه قرار گرفته شد و به دلیل نبود مدل دینامیکی، مدل دینامیکی این مولد ارائه شد. سپس به‌وسیله این مدل دینامیکی سیستم توربین بادی بر اساس مولد شارمتقاطع پیشنهاد و شبیه‌سازی شد. آنچه از بررسی‌ها نتیجه می‌شود این است که؛ بدون تردید ماهیت الکترومغناطیسی و الکتریکی ماشین‌های سنکرون آهنربای دائم شارمتقاطع با همتای دارای شار شعاعی و شارمحوری آن‌ها یکسان است. اما به لحاظ کمی پارامترهای مختلف ماشین دستخوش تغییر بوده و همچنین حساسیت ماشین نسبت به تغییرات جزئی، به‌ویژه در کاربردهای سرعت‌پایین مانند توربین‌های بادی بیشتر است. در این مقاله انتخاب این ساختار به دلیل ظرفیت داشتن تعداد قطب‌های زیاد و ارائه گشتاور الکتریکی به حجم بالا، باعث کاهش حجم ماشین نسبت به ماشین‌های آهنربای دائم معمول شده و در سرعت‌های باد پایین نیز قادر به تولید توان است. پس از مدل‌سازی کامل مولد سنکرون آهنربای دائم شارمتقاطع، این مولد به یک توربین بادی مقیاس کوچک متصل و مدل‌سازی اجزای مختلف یک سیستم توربین-مولد به‌طور کامل ارائه شده و عملکرد آن با اعمال کنترل‌کننده مبتنی بر تعقیب ماکزیمم نقطه توان مورد ارزیابی قرار گرفت. بنابراین مطالعه از مرور نیروگاه‌های بادی و انواع آن شروع شده و با معرفی ماشین‌های آهنربای دائم ادامه یافته است. در همین راستا مولدهای شارمتقاطع و مولد مورد نظر مقاله برای شبیه‌سازی و استفاده در توربین‌های بادی معرفی شدند و با شبیه‌سازی این مولد و سیستم توربین بادی بر پایه این مولد، این رسالت به پایان می‌رسد. نتایج بیانگر صحت روند انجام مطالعات بوده و بسترهای مناسبی برای پژوهش‌های آتی در موضوع تولید توان از انرژی پاک و تجدید پذیر و رایگان ایجاد می‌نماید که در ادامه به تعدادی از آن‌ها در قالب پیشنهاد برای ادامه کار مطرح می‌شود.

- [1] M. R. Khan, M. F. Khan and M. Sartaj, "Consideration of Dynamic Cross Saturation in Mathematical Modeling of an Asymmetrical Six-Phase SEIG for Wind Energy Applications, " *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE)*, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/PESGRE52268.2022.9715949.
- [2] M. Rosyadi, A. Umemura, R. Takahashi and J. Tamura, "Detailed and Average Models of a Grid-Connected MMC-Controlled Permanent Magnet Wind Turbine Generator," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 3, pp. 1619, 2022, doi: 10.3390/app12031619.
- [3] R. Nasiri-Zarandi, A. Mohammadi Ajamloo and K. Abbaszadeh, "Cogging torque minimization in transverse flux permanent magnet generators using two-step axial permanent magnet segmentation for direct drive wind turbine application, " *International Journal of Engineering*, vol. 34, no. 4, pp. 908-918, 2021, doi: 10.5829/ije.2021.34.04a.17.
- [4] J. L. Acosta, K. Combe, S. Ž. Djokic and I. Hernando-Gil , ""Performance Assessment of Micro and Small -Scale Wind Turbines in Urban Areas," *IEEE System Journals*, vol. 6, no. 1, pp. 152-163, 2011, doi: 10.1109/JSYST.2011.2163025.
- [5] H. W. Kim, S. S. Kim and H. S. Ko, "Modeling and control of PMSG-based variable-speed wind turbine," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 1, pp. 46-52, 2010, doi: 10.1016/j.epr.2009.08.003.
- [6] J. Liu, L. Huang, Q. Zhang and J. Chen, "Characteristic analysis and optimization of an asymmetric-primary axial-flux hybrid-excitation generator for vertical-axis wind turbines, " *IET Electric Power Applications*, vol. 16, no. 10, pp. 1148-1157, 2022, doi: 10.1049/elp2.12215.
- [7] L. M. Fernández, C. A. Garcia and F. Jurado, "Operating capability as a PQ/PV node of a direct-drive wind turbine based on a permanent magnet synchronous generator, " *Renewable Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 1308-1318, 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.11.046.
- [8] C. C. W. Chang, T. J. Ding, T. J. Ping, K. C. Chao and M. A. S. Bhuiyan, "Getting more from the wind: Recent advancements and challenges in generators development for wind turbines," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, p. 102731, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102731.
- [9] Y. M. You, K. Y. Hwang and B. I. Kwon, "Optimal design of distributed winding axial flux permanent magnet synchronous generator for wind turbine systems, " in *Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, IEEE, 2010, doi: 10.1109/CEFC.2010.5481063.
- [10] Y. Chen, P. Pillay and A. Khan, "PM wind generator comparison of different topologies," in *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Society*, pp 800-807, October 2004, doi: 10.1109/ias.2004.1348606.
- [11] E. Youssef, A. Obbadi and S. Sahnoun, "Development of a nonlinear backstepping approach of grid-connected permanent magnet synchronous generator wind farm structure, " in *Renewable Energy Systems. Academic Press*, 2021, pp. 65-87, doi: 10.1016/B978-0-12-820004-9.00008-5.
- [12] W. Jara, A. Martin and J. A. Tapia, "Axial Flux PM Machine for Low Wind Power Generation," in *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, Rome, doi: 10.1109/icelmach.2010.5607862.
- [13] M. Aydin, Z. Zhu, T. Lipo and D. Howe, "Minimization of cogging torque in axial-flux permanent-magnet machines: Design concepts, " *IEEE transactions on magnetics*, vol. 43, no. 9, pp. 3614-3622, 2007, doi: 10.1109/tmag.2007.902818.
- [14] P. M. Anderson, A. A. Fouad and H. H. Happ, "Power System Control and Stability," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 2, pp. 103-103, Feb. 1979, doi: 10.1109/TSMC.1979.4310158.
- [15] J. F. Gieras, R. J. Wang and M. J. Kamper, "Axial flux permanent magnet brushless machines," Springer Science & Business Media ,Springer, 2008, pp. 1–362. doi: 10.1007/978-1-4020-8227-6.
- [16] H. Benbouhenni, and N. Bizon. "Advanced direct vector control method for optimizing the operation of a double-powered induction generator-based dual-rotor wind turbine system," *Mathematics*, vol. 9, no. 19, pp. 2403, 2021, doi: 10.3390/math9192403.
- [17] Y. Wang and N. Bianchi, "Modeling and Investigation of Self-Excited Reluctance Generators for Wind Applications, " *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 6, pp. 5809-5817, Nov.-Dec. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2935931.





- [18] T. F. Chan, W. Wang and L. L. Lai, "Performance of an Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator From 3-D Finite-Element Analysis," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 3, pp. 669-676, Sept. 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2042057.
- [19] B. Lu and A. Zanj, "Development of an integrated system design tool for helical Vertical Axis Wind Turbines (VAWT-X)," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 8499-8510, 2022. doi:10.1016/j.egy.2022.06.038.
- [20] M. A. Ahmed, T. Messo, P. Rasilo, and J. Rekola, "Dynamic modelling of grid-connected permanent magnet synchronous generator wind turbine: rectifier dynamics and control design," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 18, pp. 5202-5207, 2019. doi: 10.1049/joe.2018.9343.
- [21] S. A. Mirnikjoo, F. Asadi, K. Abbaszadeh and S. E. Abdollahi, "Effect of Rotor Topology on the Performance of Counter-Rotating Double-Sided Flux Switching Permanent Magnet Generator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 37, no. 1, pp. 65-74, March 2022, doi: 10.1109/TEC.2021.3103555.
- [22] A. J. Balbino, B. d. S. Nora and T. B. Lazzarin, "An Improved Mechanical Sensorless Maximum Power Point Tracking Method for Permanent-Magnet Synchronous Generator-Based Small Wind Turbines Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 5, pp. 4765-4775, May 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3084176.
- [23] M. Malinowski, A. Milczarek, R. Kot, Z. Goryca and J. T. Szuster, "Optimized Energy-Conversion Systems for Small Wind Turbines: Renewable energy sources in modern distributed power generation systems," in *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 2, no. 3, pp. 16-30, Sept. 2015, doi: 10.1109/MPEL.2015.2447631.
- [24] N. A. Bhuiyan and A. McDonald, "Optimization of Offshore Direct Drive Wind Turbine Generators With Consideration of Permanent Magnet Grade and Temperature," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 2, pp. 1105-1114, June 2019, doi: 10.1109/TEC.2018.2879442.
- [25] M. A. González-Cagigal, J. A. Rosendo-Macías and A. Gómez-Expósito, "Parameter Estimation of Wind Turbines With PMSM Using Cubature Kalman Filters," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 1796-1804, May 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2945778.
- [26] G. Feng, C. Lai, J. Tjong and N. C. Kar, "Noninvasive Kalman Filter Based Permanent Magnet Temperature Estimation for Permanent Magnet Synchronous Machines," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 12, pp. 10673-10682, Dec. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2018.2808323.
- [27] C. L. Sabioni, M. F. O. Ribeiro and J. A. Vasconcelos, "Robust Design of an Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Based on Many-Objective Optimization Approach," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 3, pp. 1-4, March 2018, Art no. 8101704, doi: 10.1109/TMAG.2017.2766229.
- [28] D. Bourlis, "Multiple Model Adaptive Estimation of the Aerodynamic Torque for the Control of Variable Speed Wind Turbines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 37, no. 1, pp. 316-326, March 2022, doi: 10.1109/TEC.2021.3090101.
- [29] J. H. Im, J. -K. Kang and J. Hur, "Static and Dynamic Eccentricity Faults Diagnosis in PM Synchronous Motor Using Planar Search Coil," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, doi: 10.1109/TIE.2022.3212402.
- [30] Y. Bai, B. Kou and C. C. Chan, "A Simple Structure Passive MPPT Standalone Wind Turbine Generator System," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015, Art no. 8204704, doi: 10.1109/TMAG.2015.2439043.

زیر نویس‌ها

- ¹ Permanent Magnet Synchronous Generators
- ² Axial flux permanent magnet machines
- ³ Wind Energy Conversion Systems
- ⁴ Transverse-Flux Permanent Magnet

